

MARIANE BRUMATTI

**MINERALOGIA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DAS ZONAS DE
XENÓLITOS, MINA DE CAJATI, SP**

**São Paulo
2008**

MARIANE BRUMATTI

**MINERALOGIA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DAS ZONAS DE
XENÓLITOS, MINA DE CAJATI, SP**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Mestre em Engenharia**

**São Paulo
2008**

MARIANE BRUMATTI

**MINERALOGIA APLICADA AO BENEFICIAMENTO DAS ZONAS DE
XENÓLITOS, MINA DE CAJATI, SP**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia de Minas**

**Orientadora:
Profa. Dra. Lília Mascarenhas
Sant'Agostino**

**São Paulo
2008**

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

São Paulo, 23 de janeiro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Brumatti, Mariane

Mineralogia aplicada ao beneficiamento das Zonas de Xenólitos, Mina de Cajati, SP / M. Brumatti. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

160 p.

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

1.Caracterização tecnológica de minérios 2.Fosfatos 3.Métodos magnéticos (Otimização) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a meus pais, pelo eterno apoio, mesmo quando em dúvida se faço a escolha a certa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente à Profa. Lília Mascarenhas Sant'Agostino, pela excelente orientação e dedicação na elaboração desse trabalho.

À empresa Bunge Fertilizantes S.A., por possibilitar a realização desse trabalho com o fornecimento de dados e infra-estrutura.

Ao Prof. Henrique Kahn, coordenador do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e toda sua equipe, por permitir a utilização de dependências e equipamentos do laboratório.

Aos meus pais, Ana e Roberto, pois sem eles eu não estaria aqui.

Ao Carlos (Sfincter), por muita, muita compreensão, apoio, paciência e correlatos.

Aos meus amigos: Andréia, sempre prestativa para tirar minhas dúvidas, Liz, que colaborou para a finalização desse trabalho, principalmente na hora da impressão, e Frederico (Jaú) e Letícia (Polegar), pelas cervejas no Franguinho.

RESUMO

A mina de carbonatito de Cajati contém mineralização de apatita, utilizada na fabricação de ácido fosfórico, que é aplicado a matéria-prima carbonática para obtenção de fosfálio, suplemento mineral em rações animais.

Dentre as unidades litológicas em lavra destacam-se as Zonas de Xenólitos, formadas pela interação da rocha encaixante com o magma carbonatítico. São constituídas de fragmentos do jacupiranguito de dimensões métricas distribuídos de forma aparentemente errática na massa carbonatítica e zonas de reação centimétricas, compostas por minerais carbonáticos e silicáticos neoformados. Essas regiões apresentam apatita e constituem significativa parcela dos recursos minerais da jazida, porém devido à abundância de minerais silicáticos, essencialmente flogopita, diopsídio, forsterita e tremolita, seus teores de MgO e SiO₂ são elevados e lhe conferem características distintas das unidades carbonatíticas, interferindo no processo de beneficiamento.

Visando fornecer subsídios para o desenvolvimento de processos que otimizem o aproveitamento das Zonas de Xenólitos como minério de fosfato foram realizados ensaios de separação em escala de caracterização utilizando o Frantz de Barreiras (modelo LB-1). O procedimento objetivou o conhecimento do comportamento magnético dos silicatos em oposição ao da apatita e dos carbonatos; para o que foram coletadas amostras volumétricas em diferentes pontos da mina.

Os silicatos, todos portadores de MgO, mostraram variações de cores e de composição química além de distribuição peculiar em cada litotipo componente das Zonas de Xenólitos. Diopsídio ocorreu principalmente no litotipo jacupiranguito, enquanto flogopita, forsterita e tremolita foram mais abundantes na zona de reação.

Esses minerais ocorreram em intervalos de campo magnético bem definidos, concentrando-se principalmente entre 0,25 e 0,75 A (equivalentes a 2.800 e 8.800 Gauss, respectivamente), e distintos da fluorapatita e dos carbonatos, minerais predominantemente diamagnéticos. Para campo magnético da ordem de 13.800 Gauss obteve-se um produto com 95,2% do P₂O₅ total contido no intervalo granulométrico adotado para o ensaio e apenas 1,0% de SiO₂ associado. Aplicando-

se um campo magnético de menor intensidade (aproximadamente 5.700 Gauss) o conteúdo de P_2O_5 aumenta (97,4%) assim como o de SiO_2 (11,1%).

Assim mostrou-se viável a utilização de separação magnética como método complementar no beneficiamento de fluorapatita proveniente das Zonas de Xenólitos, desde que o campo magnético aplicado tenha um gradiente de campo adequado para melhor seletividade entre o mineral de minério e os silicatos.

Os trabalhos de caracterização desenvolvidos também mostraram uma outra possibilidade de aproveitamento da unidade litológica, a partir da classificação granulométrica após a britagem secundária. Nessa etapa observou-se tendência à segregação dos litotipos, com geração de um material fino (abaixo de 12,7 mm) enriquecido em P_2O_5 (2,48 a 4,08%) que contém de 26,4 a 59,8% do P_2O_5 total da amostra.

Palavras-chave: Mina de Cajati. Minério de fosfato. Zonas de Xenólitos. Frantz de Barreiras. Minerais silicáticos.

ABSTRACT

The Cajati carbonatite mine produces apatite used for phosphoric acid manufacturing. This material is added to carbonatic raw material in order to obtain phoscalcium (*foscálcio*), used as mineral supply for animal feeding.

Among the exploited lithological units there are the Xenolithic Zones, which are generated by assimilation process between the host rock and the carbonatitic magma. They are constituted by jacupiranguite blocks (metric sizes) of random distribution within the carbonatitic matrix and by the reaction zones (centimetric thickness), composed by neoformed carbonatic and silicate minerals. These regions show apatite mineralization and represent a significant part of the mineral resources of the deposit. However their abundance of silicate minerals, essentially phlogopite, diopside, forsterite and tremolita, leads to high MgO e SiO₂ contents, which implies in distinct characteristics from carbonatites, interfering on the concentration plant process.

Intending to support the development of new processes seeking the utilization of the Xenolithic Zones as phosphate ore, a laboratory study of mineral separation was taken at the Barrier Frantz Magnetic Separator (model LB-1). Such procedure aims the characterization of magnetic behavior of silicates versus apatite and carbonates, using bulk samples collected in different parts of the mine.

Silicates, all Mg-bearing, showed color and chemical composition variations with non-systematic distribution within each lithotipe comprising the Xenolithic Zones. Diopside occurred mainly in the jacupiranguite, while phlogopite, forsterite and tremolite were most abundant in the reaction zone.

These minerals occurred in well defined magnetic field intervals, specially between 0,25 and 0,75 A (equivalent to 2.800 and 8.800 Gauss, respectively), and distinct from fluorapatite and carbonates, which are mainly diamagnetics. For magnetic field around 13.800 Gauss a product with 95,2% of total P₂O₅ content was obtained in the granulometric interval used for the separation procedures with 1,0% of SiO₂ associated. Using a lower intensity magnetic field (around 5.700 Gauss) the P₂O₅ content rises (97,4%) as well as the SiO₂ (11,1%).

Thus the use of complementary magnetic separation procedures was proved to be a practicable method for beneficiation of fluorapatite from the Xenolithic Zones by applying a magnetic field with adequate field gradient for the selectivity of ore mineral and silicates.

Another possibility for utilization of the lithological unit showed by the characterization studies was the grain-size classification after secondary crushing. In this stage a lithotype segregation was observed and generation of fine material (below 12,7 mm) P_2O_5 enriched (2,48 to 4,08%), with 26,4 to 59,8% of total P_2O_5 content in the sample.

Key-words: Cajati mine. Phosphate ore. Xenolithic Zones. Barrier Frantz Magnetic Separator. Silicate minerals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área e acessos (Alves, 1999).	21
Figura 2 – Mapa geológico do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga (Raposo, 2002).	26
Figura 3 – Mapa das intrusões carbonatíticas (Raposo, 2002). Legenda: C1, C3 e C4- sovitos calcíticos; C2- sovito dolomítico; C5- rauhaugito; Jac-Jacupiranguito.....	28
Figura 4 – Mapa geológico (à esquerda) e modelo tridimensional (à direita) do corpo carbonatítico atualizado em 2004 (fornecido pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).	30
Figura 5 – Mapa do afloramento das Zonas de Xenólitos Norte (XENorte) e Leste (XELeste) com topografia da cava atualizada em 2004 (fornecido pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).....	33
Figura 6 – Curvas de susceptibilidade magnética dos minerais: (a) ferromagnéticos (magnetita) e (b) paramagnéticos (hematita) e diamagnéticos (quartzo) (Hayes, 1985).....	37
Figura 7 – Gráfico de relação entre intensidade de corrente (A) e de campo magnético (Gauss) para o Frantz Isodinâmico modelo L-1 (informação pessoal) ¹	40
Figura 8 – Gráfico de relação entre intensidade de corrente (A) e gradiente de campo (Gauss ² /cm) para o Frantz Isodinâmico modelo L-1 e Frantz de Barreiras modelo LB-1 (curvas azul e verde, respectivamente) e de campo magnético (Gauss) para o Frantz de Barreiras (curva vermelha) (informação pessoal) ³	43
Figura 9 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	49
Figura 10 – Mapa de localização das frentes de lavra amostradas nas regiões de afloramento das Zonas de Xenólitos Norte (XENorte) e Leste (XELeste), com topografia da cava atualizada em 2004 (fornecido pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).....	50
Figura 11 – Gráfico de distribuição em massa dos produtos da britagem secundária.	83

Figura 12 – Distribuição acumulada dos principais teores analisados nos produtos da britagem secundária.....	85
Figura 13 – Proporção em massa dos litotipos individualizados por catação para as frações acima de 6,35 mm.	86
Figura 14 – Amostras totais. Distribuição em massa na classificação granulométrica do produto de moagem abaixo de 0,833 mm.....	91
Figura 15 – Amostras totais. Distribuição acumulada dos teores na classificação granulométrica do produto de moagem abaixo de 0,833 mm.	93
Figura 16 – Amostras de catação. Distribuição em massa na classificação granulométrica no produto de moagem abaixo de 0,833 mm.	95
Figura 17 – Amostras de catação. Distribuição acumulada dos teores na classificação granulométrica no produto de moagem abaixo de 0,833 mm.	98
Figura 18 – Partição em massa dos produtos da separação em líquido denso para a fração -0,295+0,147 mm.	99
Figura 19 – Partição em massa dos produtos da separação magnética para a fração -0,295+0,147 mm.	102
Figura 20 – Curvas de separabilidade magnética (fração -0,295 +0,147 mm).....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fases minerais silicáticas das Zonas de Xenólitos identificadas por difração de raios X.	35
Tabela 2 – Susceptibilidade magnética das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas.	38
Tabela 3 – Comportamento no Frantz Isodinâmico das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas compilado de Parfenoff (1970).	41
Tabela 4 – Comportamento no Frantz Isodinâmico das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas compilado de Rosenblum & Brownfield (2000).	42
Tabela 5 – Classificação dos minerais para fins de beneficiamento, indicando as principais fases minerais presentes nas amostras estudadas.	45
Tabela 6 – Classificação de separadores magnéticos industriais.	45
Tabela 7 – Densidade relativa das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas.	58
Tabela 8 – Características dos minerais obtidas por observações em estereomicroscopia.	64
Tabela 9 – Fases minerais identificadas por DRX e suas respectivas composições químicas teóricas.	67
Tabela 10 – Identificação por DRX dos produtos compostos obtidos na separação magnética.	68
Tabela 11 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de flogopita.	70
Tabela 12 – Microanálises por MEV-EDS em grãos de flogopita apresentando zoneamento.	71
Tabela 13 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de diopsídio.	74
Tabela 14 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de forsterita.	76
Tabela 15 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de tremolita.	78
Tabela 16 – Composição química dos principais silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos efetuadas por MEV-EDS.	80

Tabela 17 – Composições químicas teórica e de publicações referentes ao Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga dos principais silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos.....	81
Tabela 18 – Balanço metalúrgico para a etapa de classificação granulométrica dos produtos da britagem secundária.....	84
Tabela 19 – Balanço metalúrgico para a etapa de individualização dos litotipos por catação para as frações acima de 6,35 mm.....	87
Tabela 20 – Composição química dos litotipos constituintes das Zonas de Xenólitos (fração -44,5+12,7 mm).....	90
Tabela 21 – Amostras totais. Balanço metalúrgico para as etapas de “desmagnetização” e classificação granulométrica após moagem abaixo de 0,833 mm.	92
Tabela 22 – Amostras de catação. Balanço metalúrgico para as etapas de “desmagnetização” e classificação granulométrica após moagem abaixo de 0,833 mm.	96
Tabela 23 – Balanço metalúrgico da separação em líquido denso para a fração - 0,295+0,147 mm.	100
Tabela 24 – Balanço metalúrgico da separação magnética para a fração - 0,295+0,147 mm.	104
Tabela 25 – Balanço metalúrgico da separação magnética para as amostras total e de zona de reação com valores compostos a partir dos produtos flutuados e afundados (fração -0,295+0,147 mm).	105
Tabela 26 – Composição química das amostras coletadas em frentes de lavra das Zonas de Xenólitos.	106
Tabela 27 – Composição química dos litotipos individualizados das Zonas de Xenólitos.	107
Tabela 28 – Comportamento no Frantz de Barreiras das principais fases minerais identificadas nas amostras das Zonas de Xenólitos (fração -0,295+0,147 mm), com valores correspondentes de campo magnético e de gradiente de campo.	110

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – B30F689/4. Frente de lavra (à esquerda) e blocos desmontados (à direita) mostrando o contraste de cores dos litotipos carbonatito e jacupiranguito.	51
Foto 2 – B-10F304/3. Frente de lavra mostrando o contraste de cores dos litotipos carbonatito e jacupiranguito.	51
Foto 3 – B30F688. Frente de lavra (à esquerda) e blocos desmontados (à direita) mostrando o contraste de cores dos litotipos carbonatito e jacupiranguito.	51
Foto 4 – Retro-escavadeira Liebherr carregando caminhão Random com caçamba para 30 toneladas na operação de retomada das frentes de lavra amostradas.	52
Foto 5 – Britagem primária em 203,2 mm.	52
Foto 6 – Britagem secundária, com diâmetro máximo de 44,5 mm.	52
Foto 7 – Litotipos individualizados por catação. Da esquerda para a direita (em cada amostra): carbonatito, zona de reação e jacupiranguito.	54
Foto 8 – Moinho de bolas utilizado para moagem das amostras estudadas.	56
Foto 9 – Tambor magnético com campo de baixa intensidade para retirada de magnetita.	56
Foto 10 – Classificação granulométrica via úmida em 0,295 mm, 0,147 mm e 0,074 mm.	56
Foto 11 – Centrífuga utilizada para separação em líquido denso.	57
Foto 12 – Frantz de Barreiras modelo LB-1 e seus principais componentes, utilizado para separação magnética das fases minerais presentes nas amostras estudadas.	59
Foto 13 – Detalhe dos recipientes de coleta dos produtos magnético e não-magnético.	59
Foto 14 – Espectômetro de raios X da marca Panalytical, modelo Axios Advanced, para realização de análises químicas por FRX.	62
Foto 15 – Estereomicroscópio Marca ZEISS, modelo STEMI SV8, utilizado na observação das características físicas das fases minerais.	62
Foto 16 – Difractômetro de raios X da marca Philips, modelo MPD 1880, utilizado para identificação das fases minerais.	62

Foto 17 – Microscópio eletrônico de varredura acoplado a espectrômetro de dispersão de energia da marca Oxford, modelo LEO 440, utilizado para determinação da composição química dos principais silicatos.62

LISTA DE FOTOMICROGRAFIAS

- Fotomicrografia 1 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de flogopita no produto flutuado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação.....70
- Fotomicrografia 2 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 5”. Flogopita apresentando zoneamento, com inclusões de forsterita (Mg-Si-O) e sulfeto de ferro (FeS). A porção escura [K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise A e a porção clara [Ba-K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na)] corresponde à análise B da tabela 12.71
- Fotomicrografia 3 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 8”. Flogopita apresentando zoneamento, com inclusões de magnetita (Fe-O) e pirocloro (Nb-Ca-Ti-O). A porção escura [K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise A e a porção clara [Ba-K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise B da tabela 12.72
- Fotomicrografia 4 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 18”. Flogopita apresentando zoneamento, com inclusão de pirocloro (Nb-Ca-Ti-O). A porção clara [K-Mg-Fe-Ti-Al-Si-O (Na)] corresponde à análise A e a porção escura [K-Mg-Fe-Ti-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise B da tabela 12.72
- Fotomicrografia 5 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 52”. Flogopita apresentando zoneamento. A porção clara [Ba-K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise A e a porção escura [K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na)] corresponde à análise B da tabela 12.73
- Fotomicrografia 6 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de diopsídio no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação....74
- Fotomicrografia 7 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de diopsídio no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de jacupiranguito.75
- Fotomicrografia 8 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de forsterita no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação. ...76
- Fotomicrografia 9 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de forsterita no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de jacupiranguito.....77
- Fotomicrografia 10 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de tremolita no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação. ...78

LISTA DE ABREVIATURAS

AF	Afundado em líquido de densidade 2,96 g/cm ³
DRX	Difração de raios X
FL	Flutuado em líquido de densidade 2,96 g/cm ³
FRX	Fluorescência de raios X
J	Jacupiranguito
MEV-EDS	Microscopia Eletrônica de Varredura – Espectômetro de Dispersão de Energia
PF	Perda ao fogo
ROM	<i>Run fo mine</i>
TBE	Tetrabromoetano
XELeste	Zona de Xenólitos Leste
XENorte	Zona de Xenólitos Norte
ZR	Zona de reação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS.....	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 Geologia regional	25
3.2 Geologia local	27
3.3 Trabalhos anteriores de caracterização tecnológica.....	31
3.4 Características das Zonas de Xenólitos.....	33
3.5 Susceptibilidade magnética dos minerais	35
3.5.1 <i>Separação magnética na caracterização tecnológica.....</i>	<i>39</i>
3.5.2 <i>Separação magnética no beneficiamento de minérios</i>	<i>44</i>
4 O COMPLEXO MÍNERO-QUÍMICO DE CAJATI	46
5 MATERIAIS E MÉTODOS	48
5.1 Amostragem.....	50
5.2 Individualização dos litotipos por catação	53
5.3 Preparação das amostras	55
5.4 Separações minerais.....	56
5.4.1 <i>Líquido denso.....</i>	<i>57</i>
5.4.2 <i>Separador magnético Frantz de Barreiras</i>	<i>58</i>
5.5 Procedimentos analíticos	60
5.5.1 <i>Análises químicas</i>	<i>60</i>
5.5.2 <i>Análises mineralógicas.....</i>	<i>60</i>
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
6.1 Caracterização mineralógica.....	63
6.1.1 <i>Identificação dos minerais: Estereomicroscopia</i>	<i>63</i>
6.1.2 <i>Identificação dos minerais: Difratomia de raios X.....</i>	<i>67</i>

6.1.3 Composição química dos silicatos: Microscopia eletrônica de varredura	69
6.1.3.1 Flogopita.....	69
6.1.3.2 Diopsídio	73
6.1.3.3 Forsterita	75
6.1.3.4 Tremolita	77
6.1.4 Consolidação da caracterização mineralógica.....	79
6.2 Individualização dos litotipos por catação	83
6.2.1 Consolidação da individualização de litotipos	88
6.3 Caracterização tecnológica	91
6.3.1 Análises granuloquímicas.....	91
6.3.1.1 Amostras totais.....	91
6.3.1.2 Amostras de catação.....	94
6.3.2 Separações minerais.....	99
6.3.2.1 Líquido denso.....	99
6.3.2.2 Frantz de Barreiras.....	101
6.3.3 Consolidação da caracterização tecnológica.....	106
6.3.3.1 Composição química das amostras estudadas.....	106
6.3.3.2 Análise granuloquímicas	107
6.3.3.3 Separações magnéticas.....	109
a) Ábaco de separação no Frantz de Barreiras	109
b) Curvas de separabilidade magnética.....	111
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	114
REFERÊNCIAS	118
ANEXO A – SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO - CROQUI DO COMPLEXO INDUSTRIAL.....	122
ANEXO B – SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO - CROQUI DO COMPLEXO QUÍMICO.....	125
ANEXO C – DESCRIÇÕES ESTEREOMICROSCÓPICAS DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	127

ANEXO D – MICROFOTOGRAFIAS DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA POR ESTEREOMICROSCOPIA	134
ANEXO E – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X.....	146
ANEXO F – MICROANÁLISES POR DETETOR DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) ACOPLADO A MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	154

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo foi desenvolvido em rochas carbonatíticas mineralizadas a fosfato situadas na região centro-sul do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga, na cidade de Cajati, São Paulo, a cerca de 240 km da capital, com acesso pela Rodovia Régis Bittencourt – BR 116, como ilustrado na figura 1.

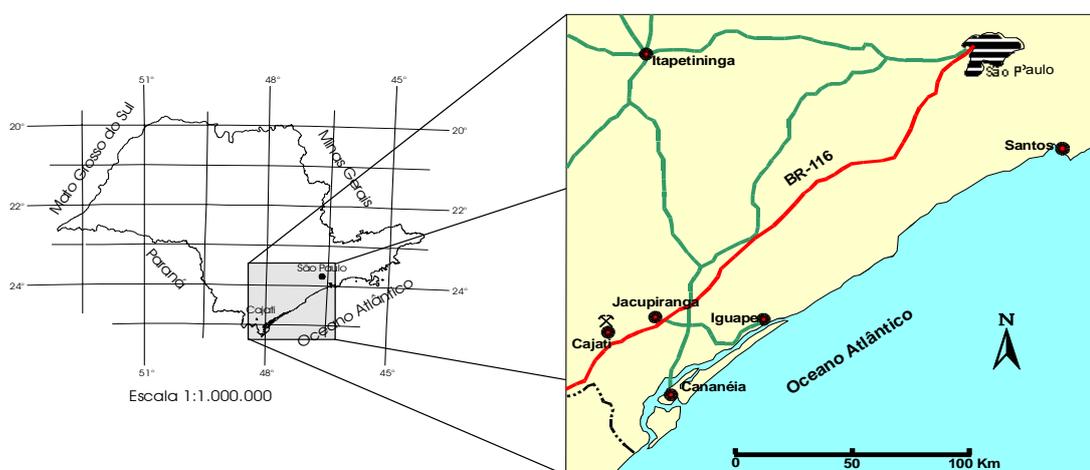


Figura 1 – Mapa de localização da área e acessos (Alves, 1999).

No local denominado Morro da Mina, iniciou-se em 1943 a exploração de minério residual, constituído basicamente de apatita, magnetita e argilominerais provenientes da dissolução e lixiviação dos carbonatos da rocha. O minério era beneficiado por lavagem e separação magnética gerando concentrados com cerca de 40% de P_2O_5 e um máximo de 2,5% de Fe_2O_3 , os quais eram utilizados na fabricação de fertilizantes.

No início da década de 70, com a exaustão do minério residual, começou a ser lavrada rocha sã (carbonatito) com teores de superiores a 3% P_2O_5 . A apatita deixou de ser a única base econômica da mina, passando a ser aproveitada a massa carbonática como matéria-prima para fabricação de cimento. Com a crise na indústria de fertilizantes no final da década de 80, iniciou-se o desenvolvimento de várias aplicações para os produtos e subprodutos da Mina: indústria alimentícia, corretivos agrícolas e agregados graúdos para construção civil.

Atualmente o principal produto da Mina continua sendo a apatita, que é processada em complexo industrial junto à mineração. Com o concentrado desse

mineral é produzido ácido fosfórico, aplicado em matéria-prima carbonática para a obtenção de foscálcio (fosfato bicálcico), suplemento mineral para alimentação animal com a função de balancear níveis de cálcio e fósforo em rações. A Mina de Cajati, explorada pela empresa Bunge Fertilizantes S.A., opera atualmente com teor médio de 12% de apatita (cerca de 5% P_2O_5) e produz em média 52.000t/mês de concentrado com 36% P_2O_5 .

No contexto geológico, o carbonatito ocorre inserido em um clinopiroxenito, historicamente denominado de jacupiranguito; no contato entre a intrusão carbonatítica e a rocha encaixante encontra-se a unidade litológica denominada *Zona de Xenólitos*, alvo de estudo desse trabalho. É constituída por um material que contém proporções variadas dos dois tipos de rocha, além de um terceiro litotipo denominado zona de reação, composta de minerais neoformados pela interação da rocha encaixante com o magma gerador do corpo de minério.

Este trabalho visou estudos tecnológicos e mineralógicos voltados ao comportamento dos silicatos e da apatita presentes nas Zonas de Xenólitos, principalmente na separação magnética. Foram aplicadas técnicas de caracterização envolvendo classificações granulométricas, separações em líquido denso e magnéticas em Frantz de Barreiras, com apoio de análises químicas por fluorescência de raios X e mineralógicas por estereomicroscopia, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura com microanálise por espectrômetro de dispersão de energia.

2 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

As Zonas de Xenólitos ocorrem em três porções individualizadas na Mina, Norte, Leste e Sul; são de ampla extensão e apresentam teores de fosfato próximos ao teor de corte da mina (3% P_2O_5). Devido sua mineralização de apatita as unidades vêm sendo incorporadas ao carbonatito para alimentação do beneficiamento industrial praticado na Mina de Cajati, porém sua composição diferencia-se do minério carbonatítico e promove a interferência no processo de beneficiamento, fato que levou as Zonas de Xenólitos a serem objeto de estudo desde 2001.

O principal problema para o beneficiamento está relacionado à elevada quantidade de minerais silicáticos, que influenciam na flotação bem como na eficiência da separação magnética, além de alterar as características mineralógicas do concentrado também com conseqüências deletérias na fabricação de ácido fosfórico.

Trabalhos anteriores de caracterização tecnológica mostraram que o comportamento do material em relação à moagem é muito similar ao de um carbonatito típico, representado pelas unidades carbonatíticas periféricas da Mina e caracterizado pela ocorrência de apatita grossa, teores em torno de 5% P_2O_5 e em torno de 4% MgO. A abundância de minerais silicáticos (essencialmente mica, piroxênio, olivina e anfibólio), provenientes dos blocos de xenólitos, atribui ao material alimentado na usina elevados teores de SiO_2 e MgO. Apesar das Zonas de Xenólitos serem assimiladas pelo processo de beneficiamento quando incorporadas em quantidades controladas às unidades carbonatíticas, Brumatti (2004) mostrou que os parâmetros de separação magnética usualmente aplicados ao minério não produzem resultados satisfatórios para este material.

A partir desse conhecimento elaborou-se um programa com o objetivo de determinar o comportamento magnético das fases minerais silicáticas presentes nas Zonas de Xenólitos, através do levantamento de curvas de separabilidade magnética utilizando o equipamento Frantz de Barreiras. Inclui-se neste programa a caracterização detalhada das fases minerais silicáticas quanto às suas composições químicas em apoio ao estudo de separação magnética.

Desse modo, buscou-se compreender os aspectos que interferem na etapa de separação magnética na usina de concentração mineral, além de avaliar a aplicabilidade de uma separação de alta intensidade de campo na remoção dos silicatos, fornecendo subsídios para um melhor aproveitamento do material proveniente desta unidade.

No contexto desse programa buscou-se também verificar o comportamento dos litotipos componentes das Zonas de Xenólitos na britagem industrial praticada na Mina. Esta linha de investigação se apoiou no conhecimento empírico da mineração de que ocorre na cominuição, essencialmente por impacto, uma visível tendência a segregação diferencial dos três litotipos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa de revisão bibliográfica englobou:

- ✓ descrição dos aspectos geológicos regionais, referentes ao Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga, e locais, referentes ao corpo de carbonatito;
- ✓ arrolamento dos trabalhos de caracterização tecnológica de interesse no tema desenvolvidos na empresa Bunge Fertilizantes S.A.;
- ✓ detalhamento das características da unidade litológica Zona de Xenólitos;
- ✓ discussão sobre a susceptibilidade magnética dos minerais.

A pesquisa bibliográfica relacionada ao contexto geológico insere as referências existentes sobre o Complexo.

O elevado número de monografias de conclusão de curso consultadas foi devido à importância dos mesmos para a evolução do conhecimento tecnológico e mineralógico dos carbonatitos que ocorrem no Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga.

A literatura existente sobre a susceptibilidade magnética dos minerais é muito escassa e repetitiva. Livros clássicos de mineralogia freqüentemente apresentam a classificação dos minerais com base nessa propriedade física, porém com informações genéricas e poucos exemplos. Informações sobre o comportamento de partículas minerais na separação magnética são encontradas em alguns livros de processamento mineral.

3.1 Geologia regional

O Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga, composto predominantemente por rochas ígneas alcalinas, foi inicialmente mencionado por Bauer (1877, *apud* Ruberti *et al.*, 1992) como uma jazida de ferro, em artigo denominado “As mina de ferro de Jacupiranga”. Foi Derby (1891) quem realizou as

primeiras descrições do Complexo e propôs o termo jacupiranguito para as rochas alcalinas piroxeníticas compostas essencialmente por titano-augita (característica fundamental para sua definição) e magnetita, tendo flogopita, olivina e nefelina como minerais acessórios.

O mapa geológico da figura 2, apresentado por Germann *et al.* (1987), mostra que o Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga compõe-se de dois corpos intrusivos principais: dunito na região setentrional e jacupiranguito na meridional. Rochas de composição insaturada em SiO₂ ocupam geograficamente duas áreas expressivas dentro do jacupiranguito: na porção SW ijolitos (rocha contendo entre 30-70% de nefelina) em forma de meia lua e mais ao centro carbonatitos, ocorrendo como um corpo alongado aproximadamente segundo NNW. Como pode ser observado no mapa e conforme Ruberti *et al.* (1992), o Complexo exibe forma ovalada (10,5 x 6,7 km) segundo NNW e encontra-se inteiramente encaixado em rochas pré-Cambrianas do Grupo Açungui (com idade de 550 Ma.): granodioritos ao Norte e mica-xisto ao Sul. Nas bordas do Complexo ocorrem fenitos, mais especificamente localizados na parte de contato deste com as suas encaixantes regionais.

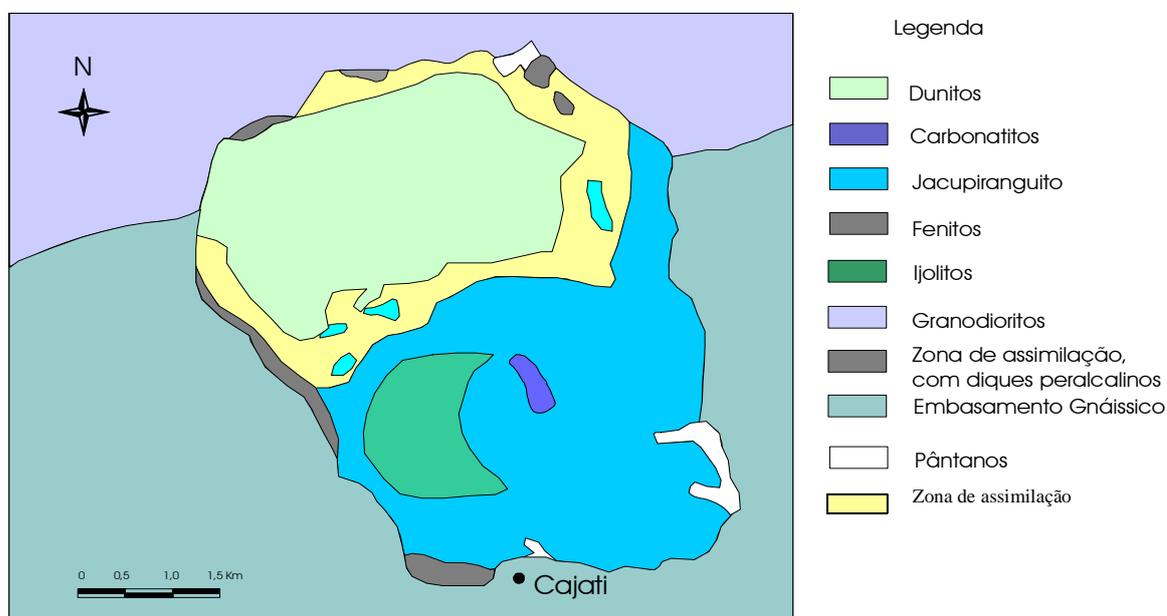


Figura 2 – Mapa geológico do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga (Raposo, 2002).

Através dos métodos de datação K/Ar e Rb/Sr, determinou-se uma idade aproximada para o Complexo de 131 ± 3 Ma. (Amaral, 1978 e Roden *et al.*, 1985,

apud Ruberti *et al.*, 1992), situando-o entre as diversas intrusões alcalinas cretáceas que ocorrem na borda da Bacia do Paraná. Ainda segundo Ruberti *et al.* (1992), essas ocorrências estão associadas à abertura do Oceano Atlântico Sul, condicionada tectonicamente pelo Arco de Ponta Grossa.

A mineralização de apatita foi interpretada por Derby (1891) como produto de metamorfismo de contato entre jacupiranguito e carbonatito. Após a remoção do manto de intemperismo por lavra a céu aberto em 1943, Melcher (1965) concluiu que o minério residual era produto de alteração intempérica dos carbonatitos e sugeriu também a origem magmática dessas rochas. Com o avanço do conhecimento verificou-se que a mineralização está associada ao corpo carbonatítico, o qual apresenta alguma interação com o jacupiranguito encaixante, principalmente nas regiões de contato.

Menezes Júnior & Martins (1984) dividiram os minerais da assembléia do depósito em dois grupos: aqueles encontrados no carbonatito e os encontrados no jacupiranguito, com a lista completa consistindo em 42 espécies. No carbonatito esses autores observaram: ancilita, aragonita (secundária), baddeleyta, barita, brucita, calcita (primária e secundária), calcopirita, titano-clinohumita, dolomita, fluorapatita, forsterita, galena, geikielita, magnésio-ilmenita, magnetita, quintinita, flogopita, pirita, pirrotita, quartzo (secundário), serpentina, estroncianita, uranopirocloro, vallerita.

No jacupiranguito os minerais encontrados por esses autores foram: titano-andradita, titano-augita, barita, calcita, calzirtita, diopsídio, dolomita, edingtonita, fluorapatita, forsterita, hornblenda, magnésio-ilmenita, magnetita, natrolita, nefelina, perovskita, flogopita, pirita, pirrotita, richterita, schorlomita, tazheranita, titanita, tremolita, vesuvianita, wollastonita, zircão e zirkelita.

3.2 Geologia local

O corpo carbonatítico do Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga tem forma alongada na direção geral do Complexo, com diâmetros aproximados de 1.000 m e 400 m e mergulho subvertical. A bem marcada expressão topográfica

constituía uma elevação, denominada “Morro da Mina”, que originalmente alcançava 225 m; atualmente, com a lavra a céu aberto, a cava atinge uma profundidade de 70 m abaixo do nível do mar.

Gaspar (1989), após efetuar um mapeamento de detalhe, com suporte de petrografia e determinações em microsonda eletrônica, revelou a ocorrência de cinco intrusões carbonatíficas distintas, divididas em duas porções: a porção Sul, com C₁, C₂ e C₃, e a porção Norte, com C₄ e C₅, como mostra o mapa da figura 3. Dada essa conclusão, determinou que a seqüência das intrusões carbonatíficas, da mais velha para a mais nova foi: C₁, C₂, C₃, C₄ e C₅.

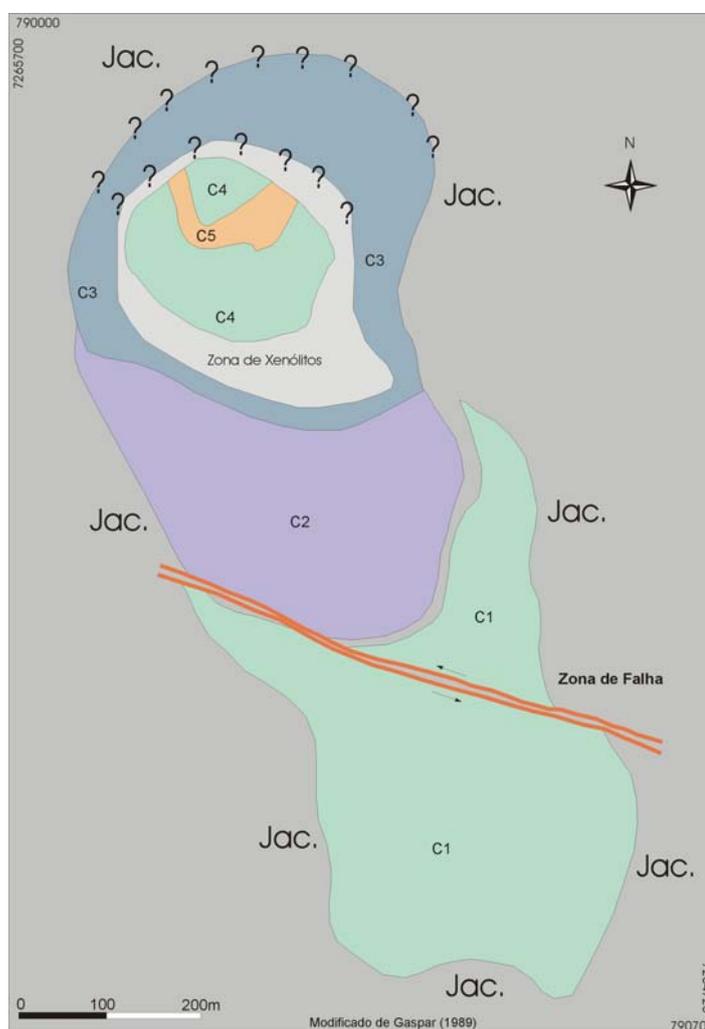


Figura 3 – Mapa das intrusões carbonatíficas (Raposo, 2002). Legenda: C₁, C₃ e C₄- sovitos calcíticos; C₂- sovito dolomítico; C₅- rauhaugito; Jac- Jacupiranguito.

Segundo o autor, C₁ é descrito como um sovito, com granulação grossa e bandamento subvertical mergulhando para Norte, composto por calcita, apatita,

magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos (toda a mineralogia é apresentada pelo autor na ordem de maior para menor abundância). A intrusão C₂ é descrita como um sovito dolomítico com granulação fina a média, finamente bandado com mergulho vertical (paralelo ao contato com C₁) e composto por: calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos. No contato entre C₂ e C₃ são observados sovito e beforsito com bandamento difuso.

A intrusão C₃ também é um sovito com granulação média a grossa, com bandamento menos evidente e composto por: calcita, apatita, magnetita, flogopita, dolomita, olivina e sulfetos. Apresenta uma característica diferente dos outros corpos: no centro o mergulho do bandamento é para Norte, entre 20° a 40°, nas bordas torna-se mais íngreme e, em alguns locais, vertical.

Na porção Norte, a intrusão cilíndrica C₄ é descrita como um sovito com granulação média e bandamento vertical, composta por calcita, apatita, magnetita, olivina, flogopita, dolomita e sulfetos. E, por último, C₅, que é descrita como um rauhaugito, com granulação média a grossa e bandamento subvertical mergulhando para Norte, composta por dolomita, apatita, flogopita, magnetita, sulfetos e calcita.

O autor propôs ainda que o termo jacupiranguito fosse evitado pois, devido à evolução dos conhecimentos sobre o Complexo, verificou-se que o principal piroxênio constituinte do jacupiranguito é o diopsídio, caracterizando a rocha como um clinopiroxenito. Porém, devido à sua popularização, o termo será mantido neste trabalho, reafirmando que o corpo encaixante do carbonatito trata-se de um magnetita-clinopiroxenito.

Frente à necessidade de reavaliação do depósito, associada à otimização do planejamento de lavra e composição do ROM (*run of mine*) para alimentação da usina de beneficiamento, Saito *et al.* (2004) realizaram um refinamento da divisão para o corpo carbonatítico, identificando no total 12 unidades geológicas ilustradas no mapa da figura 4.

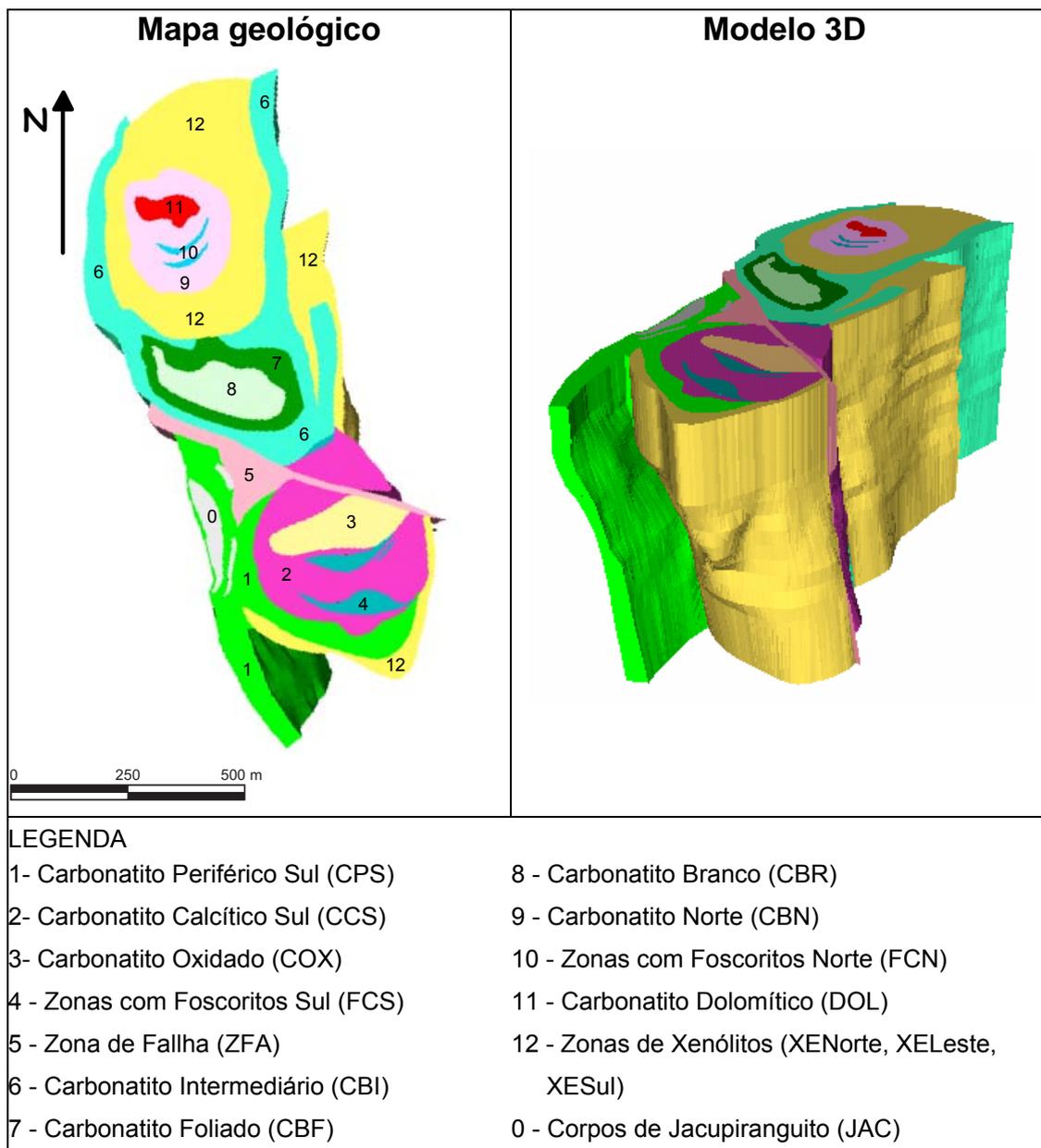


Figura 4 – Mapa geológico (à esquerda) e modelo tridimensional (à direita) do corpo carbonatítico atualizado em 2004 (fornecido pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).

Os autores distinguiram 7 unidades exclusivamente carbonatíticas (1, 2, 3, 6, 7, 8 e 9), com contatos mapeáveis, características petrográficas e organização interna distintas, apresentando foliação de fluxo concêntrica, com presença de xenólitos nas regiões de contato seja com o jacupiranguito seja entre diferentes unidades de carbonatitos, além de um corpo carbonatítico dolomítico (11) de granulação grossa a pegmatóide e contato transicional, apresentando relíctos de rocha foliada, aparentemente produtos de alteração carbonática tardia (dolomitização).

Correlacionando com o mapa de Gaspar (1989), as unidades carbonatíticas 1 a 3 correspondem à intrusão C₁, as unidades 6 a 8 correspondem à intrusão C₂, a unidade 6 também corresponde à C₃, a unidade 9 corresponde à C₄, e aparentemente o carbonatito dolomítico (11) corresponde à C₅.

Foram diferenciadas ainda lentes métricas isoladas de foscoritos a Norte e Sul (4 e 10). Além da Zona de Xenólitos a Norte (12) mapeada por Gaspar (1989), foram identificadas outras duas regiões a Leste e Sul; os xenólitos centimétricos a métricos são de jacupiranguito com bordas metassomatizadas (zonas de reação), ora suportados por matriz carbonatítica ora por jacupiranguito.

A Zona de Falha (5) corresponde a um fraturamento em regime de cisalhamento rúptil que produziu um sistema de falhas principais e subsidiárias, com atitude N75W/subvertical e componente de cisalhamento sinistral. O falhamento produziu uma série de produtos, desde brechas, cataclasitos a farinha de falha, além de permitir a alteração/oxidação pervasiva e fissural do carbonatito em diferentes intensidades.

3.3 Trabalhos anteriores de caracterização tecnológica

O corpo de carbonatito vem sendo alvo de estudos desde a década de 80, porém, com as mudanças tecnológicas, são os dados produzidos a partir do final da década de 90 que contribuem atualmente para a otimização do aproveitamento do minério apatítico. Vale ressaltar que esses dados são provenientes de trabalhos de conclusão de curso executados por estagiários em Geologia e foram de grande importância para a evolução do conhecimento tecnológico e mineralógico das diversas litologias presentes no corpo de carbonatito associado ao Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga. Dentre os estudos desenvolvidos nesse contexto destacam-se dois que forneceram subsídios para o desenvolvimento do presente trabalho:

- ✓ Alves (1999)- utilizando amostras volumétricas e da usina de concentração mineral, a autora desenvolveu uma metodologia para ensaios de caracterização tecnológica e mineralógica específica ao

minério de Cajati, que se constituiu nos procedimentos rotineiros da empresa e adotados em todos os trabalhos de caracterização posteriores. Os ensaios em laboratório foram elaborados de modo a simular, o mais próximo possível, resultados obtidos na usina industrial de beneficiamento do minério;

- ✓ Bonás (2001)- padronizou critérios de descrição macroscópica para os litotipos presentes na Mina, com vistas ao acompanhamento de lavra e pesquisa mineral. O autor criou um guia de descrição litológica envolvendo parâmetros significativos do minério, como feições geológicas (textura e estrutura da tocha) e aspectos relevantes para concentração mineral (granulação e quantidade dos principais minerais e presença e forma de menores constituintes), promovendo também a distinção das litologias com base em seu comportamento e aproveitamento industriais.

Ressaltam-se ainda outros trabalhos: Silva (2001), que estudou a mineralogia dos minerais acessórios de carbonatitos e sua influência na usina de concentração mineral, identificando flogopita, magnetita, olivina e sulfetos e confirmando os carbonatos como principais contaminantes da apatita; Raposo (2002), que em estudos mineralógicos realizados em rejeitos da usina de concentração mineral de minérios utilizados na produção de foscálcio e com elevados valores de MgO constatou serem estes provenientes principalmente de carbonatos; Brandão (2003), que avaliou o aproveitamento de uma unidade de carbonatito calcítico de coloração avermelhada para produção de foscálcio e provou ser essa coloração devida a impregnações micrométricas de óxidos/hidróxidos de ferro nos carbonatos e subordinadamente à presença de Fe-dolomita.

Finalmente, foi fundamental o estudo sobre a unidade Zona de Xenólitos realizado por Brumatti (2004), que desencadeou o presente trabalho. O foco foi o comportamento físico e químico da unidade litológica Zona de Xenólitos, revelando que a mesma apresenta teores de P_2O_5 próximos ao teor de corte da Mina, porém associados a elevados teores de MgO e SiO_2 . Bonás (2007) também desenvolveu um estudo sobre a unidade litológica, estimando as proporções de litotipos contaminantes através de dados de análise química.

3.4 Características das Zonas de Xenólitos

Segundo os dados disponibilizados pela empresa Bunge Fertilizantes S.A., as Zonas de Xenólitos ocorrem em duas regiões principais: Norte (XENorte) e Leste (XELeeste), como ilustrado na figura 5. Elas caracterizam-se pela presença de fragmentos de jacupiranguito de tamanhos variados, que chegam a atingir alguns metros, distribuídos de maneira aparentemente errática em uma massa carbonatítica. A proporção entre essas duas fases varia amplamente, sendo que em alguns locais pode atingir 70% de jacupiranguito em 30% de carbonatito. Sua área de maior abrangência é na porção Norte da Mina, que em parte se insere no meio das unidades carbonatíticas e em parte no contato com a encaixante.

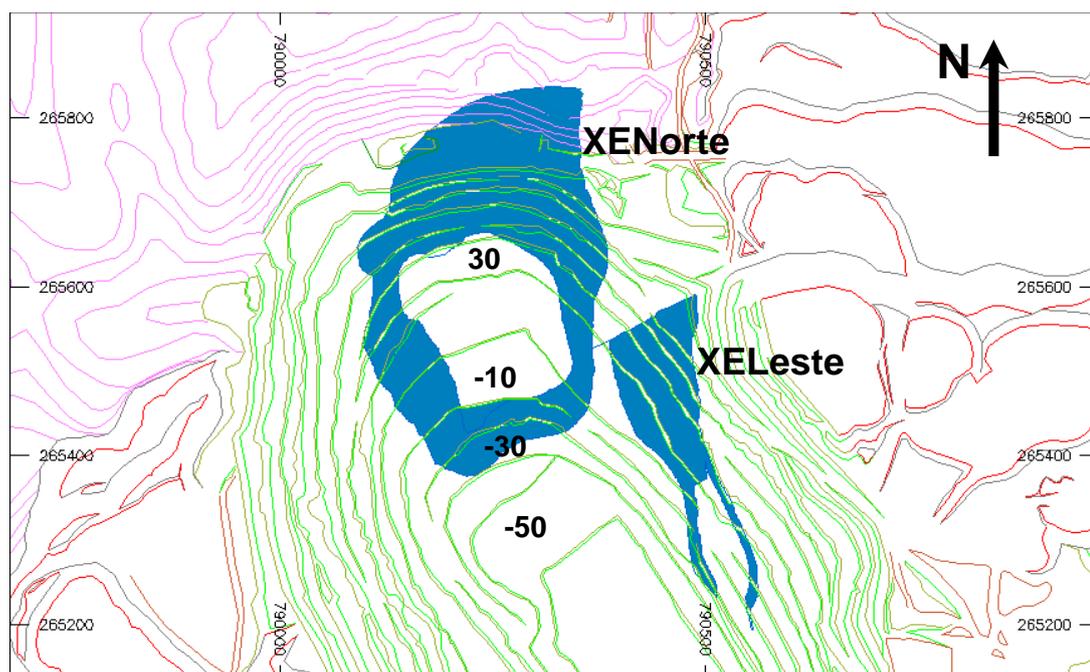


Figura 5 – Mapa do afloramento das Zonas de Xenólitos Norte (XENorte) e Leste (XELeeste) com topografia da cava atualizada em 2004 (fornecido pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).

Uma característica marcante dessa região é a presença de zonas de reação, que correspondem a um bandamento de minerais carbonáticos e silicáticos neoformados, geradas pela interação dos fluídos magmáticos com o jacupiranguito, cuja espessura varia de milímetros a centímetros, podendo atingir 30 cm.

Morbidelli *et al.* (1986) elaboraram pela primeira vez um estudo detalhado sobre as zonas de reação, denominadas por “bandas de reação” (*reactions bands*).

Os autores descreveram uma seqüência de bandas silicáticas (*shells*) que, a partir do jacupiranguito para o carbonatito, é composta por banda A (anfíbolítica), banda F (flogopítica) e banda O (olivínica).

A transição entre o jacupiranguito e a banda A é marcada por uma abrupta mudança na composição mineralógica, com cristais de piroxênio substituídos pseudomorficamente por anfibólios (predominantemente richterita); apresentando espessura variável de 1 a 5 cm e coloração verde escura mostra ainda flogopita e magnetita remanescentes. Afastando-se da encaixante faixas milimétricas de carbonatos intercalam-se com faixas centimétricas de silicatos.

A banda F, mais desenvolvida, é composta essencialmente por flogopita, além de magnetita, ilmenita e anfibólio. A estrutura bandada não é tão regular, com as porções carbonáticas ora ocorrendo como manchas ou linhas oblíquas às bordas da banda, apresentam espessura variável de poucos centímetros a 1 m e coloração vermelho vinho.

A banda O, mais externa e próxima ao carbonatito, é a mais influenciada pelos processos de interação entre encaixante e fluidos magmáticos e por vezes está ausente. É composta por olivina abundante, flogopita, magnetita e ilmenita, apresenta coloração muito escura, quase preta, e espessura centimétrica a decimétrica, sendo que a estrutura bandada é menos regular que as anteriores, deformação essa causada por veios carbonatíticos. Comumente relictos de olivina encontram-se fortemente afetados por serpentinização.

A fase carbonática pode ocorrer como bandas, manchas ou veios e é essencialmente calcítica. Em geral, apresentam apatita associada, bem desenvolvida na banda F, além de flogopita e anfibólio.

Os ensaios de caracterização tecnológica na Zona de Xenólitos Norte realizados por Silva (2001) em amostras de testemunhos de sondagens, com apoio de separações minerais em líquido denso e magnéticas (Frantz Isodinâmico), mostraram abundância de olivina, piroxênio e sulfetos na unidade em comparação aos carbonatitos devido à influência dos corpos de jacupiranguito.

Também utilizando amostras de testemunhos de sondagens, Bonás & Sant'Agostino (2004) e Bonás (2007) basearam-se nas características mineralógicas dos litotopos presentes nas Zonas de Xenólitos para estabelecer uma equação entre o teor de SiO₂ e a porcentagem de xenólitos presente (jacupiranguito + zonas de

reação), denominada de *Função Xenólitos*, com a finalidade de dar apoio à definição das reservas minerais contidas na unidade.

Os estudos de Brumatti (2004), utilizando amostras de frente de lavra das Zonas de Xenólitos, revelaram que as unidades caracterizam-se como minério de baixo teor do tipo *Magnesiano*, segundo classificação corrente da jazida ($P_2O_5 > 3\%$; $8\% > MgO > 4,2\%$). Os ensaios de caracterização mineralógica mostraram que as mesmas se assemelham a algumas unidades carbonatíticas da Mina em relação à mineralogia aos carbonatos, com o predomínio de calcita à dolomita, ao comportamento na moagem e à granulometria fina da apatita, sendo essas as unidades Carbonatito Oxidado, Carbonatito Foliado, Carbonatito Branco e Carbonatito Norte, além de apresentarem teores de P_2O_5 próximos ao teor de corte da Mina. A mineralogia principal também é similar à dos carbonatitos (essencialmente carbonatos e mica), ocorrendo ainda diversas fases silicáticas provenientes dos xenólitos de jacupiranguito e das zonas de reação, listadas na tabela 1. O estudo individual de cada litotipo componente da Zona de Xenólitos revelou que as zonas de reação representam importante parcela da mineralização da unidade, estando presentes em quantidades elevadas e podendo ser significativamente mais enriquecidas em P_2O_5 que os carbonatitos.

Tabela 1 – Fases minerais silicáticas das Zonas de Xenólitos identificadas por difração de raios X.

Mineral	Composição química
Biotita	$K(Mg_{1,46}Fe_{1,34}Ti_{0,20})(Al_{1,24}Si_{2,76}O_{10})(OH)_{1,84}O_{0,16}$
Flogopita	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}F_2$
Forsterita	Mg_2SiO_4
Diopsídio	$CaMgSi_2O_6$
Diopsídio ferroso	$(Mg_{0,992}Fe_{0,008})(Ca_{0,97}Mg_{0,022}Fe_{0,008})(Si_2O_6)$
Richterita	$Na(Ca,Na)(Mg,Al)SiO(OH)$
Clinocrisotila	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$

Fonte: Brumatti, 2004.

3.5 Susceptibilidade magnética dos minerais

Susceptibilidade magnética (χ), em algumas referências descrita como susceptibilidade magnética em volume (k) (Parfenoff, 1970; Hunt *et al.*, 1995), é a

propriedade de um mineral que determina seu comportamento quando submetido a um campo magnético (Svodoba, 1987), ou seja, seu grau de magnetização em resposta ao campo aplicado, sendo definida na equação:

$$\chi = M/H,$$

onde M é a magnetização do mineral e H é o campo magnético aplicado, ambas as grandezas são em A/m e a susceptibilidade magnética χ é uma razão adimensional. Na literatura é comum que essa propriedade seja apresentada em valores de *susceptibilidade magnética específica* (χ_s) ou *susceptibilidade magnética em massa* (χ_m), expressa em m³/kg, conforme o sistema internacional de unidades para eletromagnetismo (SI), ou cm³/g, conforme valores CGS (Hopstock, 1985), definida por:

$$\chi_s = \chi/\rho,$$

onde ρ é a densidade do mineral em (kg/m³ ou g/cm³).

De acordo com Hayes (1985) essa propriedade depende dos elementos presentes (estado de ionização e concentração) e da estrutura cristalina do mineral, não exercendo influência o tamanho e forma das partículas. Os elementos que produzem magnetismo, sendo os principais Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni e Cu, possuem elétrons livres nos orbitais da camada 3d e a intensidade desse magnetismo é proporcional à quantidade desses elétrons (Klein, 2002). A disposição desses elétrons na estrutura cristalina pode ser aleatória ou não. No primeiro caso os elétrons se orientam quando expostos a um campo magnético e tornam os minerais momentaneamente magnéticos, enquanto no segundo caso os minerais tornam-se permanente magnéticos.

Com base nessas características diversas referências, como livros clássicos de mineralogia (Parfenoff, 1970; Klein, 2002), livros de processamento mineral (Hopstock, 1985; Svodoba, 1987; Gaudin, 1987) e de metalurgia (Hayes, 1985; Chih-Wen Chen, 1986), classificando os minerais em:

- ✓ Ferromagnéticos- apresentando magnetismo permanente, são fortemente atraídos pelo campo magnético aplicado ($\chi \gg 0$; figura 6a).
Ex: magnetita, ilmenita, pirrotita;
- ✓ Paramagnéticos- fracamente atraídos pelo campo magnético aplicado ($\chi \geq 0$; figura 6b). Ex: olivina e diopsídio;

- ✓ Diamagnéticos- não atraídos pelo campo magnético aplicado ($\chi < 0$; figura 6b). Ex: calcita, albita, quartzo e apatita.

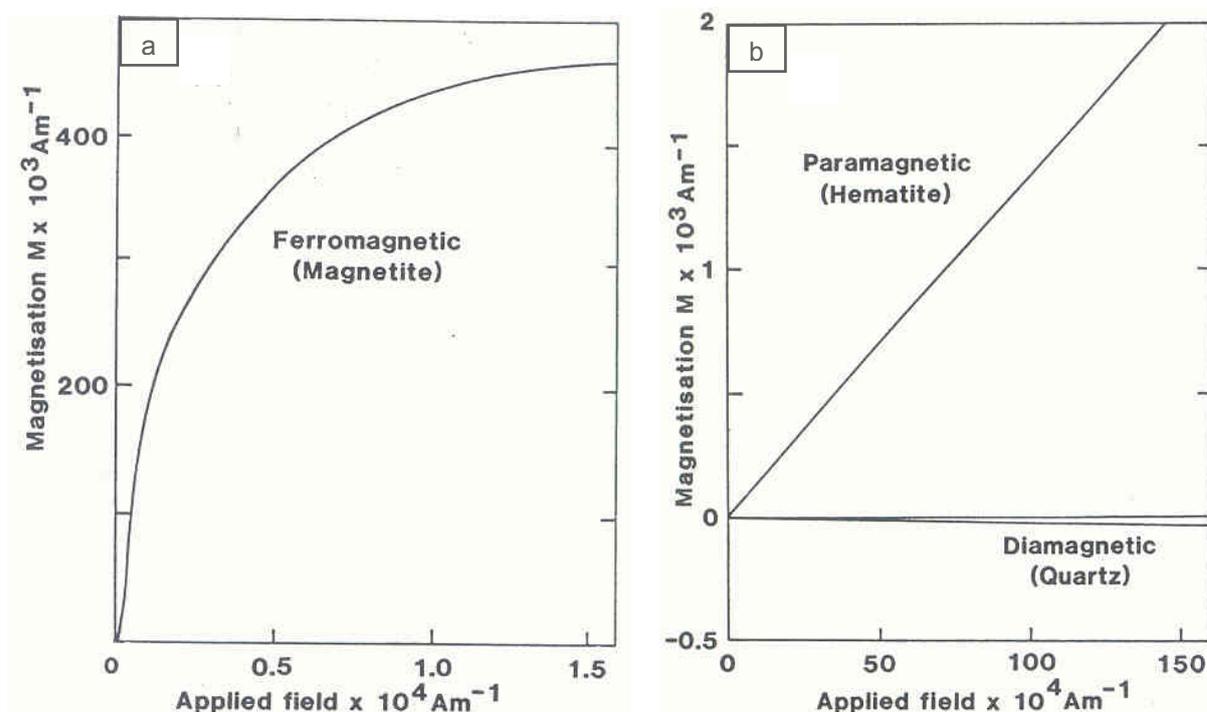


Figura 6 – Curvas de susceptibilidade magnética dos minerais: (a) ferromagnéticos (magnetita) e (b) paramagnéticos (hematita) e diamagnéticos (quartzo) (Hayes, 1985).

A tabela 2 apresenta valores de susceptibilidade magnética das principais fases minerais presentes nas Zonas de Xenólitos extraídos de três bibliografias, listados conforme a classificação acima. Segundo Dahlin and Rule (1993) dados de diferentes publicações são geralmente conflitantes devido à variabilidade composicional dos minerais, presença de inclusões e omissão de informações sobre as condições de medição da propriedade.

Apesar da discrepância entre os dados da literatura, a susceptibilidade magnética dos silicatos presentes nas amostras estudadas é significamente diferente dos carbonatos e da apatita, sugerindo a possibilidade de separação dos mesmos por processo apoiado nessa propriedade.

Tabela 2 – Susceptibilidade magnética das principais fases mineralis presentes nas amostras estudadas.

Classificação	Mineral	Fonte							
		Parfenoff (1970)		Hopstock (1985)		Hunt et al. (1995)		k	
		χ_s (m ³ /kg) ^A	χ^B	χ_s (m ³ /kg)	χ^B	χ_m (m ³ /kg)			
Ferromagnético	Magnetita	2,51 - 10,1 x 10 ⁻⁴	1,3 - 5,2	14 - 18 x 10 ^{-4C}	7,3 - 9,3	2 - 11 x 10 ⁻⁴	1 - 5,7		
	Ilmenita	14,2 - 34,1 x 10 ⁻⁷	66,7 - 160,1 x 10 ⁻⁴	13 x 10 ⁻⁷	61,1 x 10 ⁻⁴	4,6 - 800 x 10 ⁻⁷	22 - 38.000 x 10 ⁻⁴		
	Pirrotita	188,5 - 753,9 x 10 ⁻⁷	869,9 - 3.479,6 x 10 ⁻⁴	2,3 x 10 ⁻⁷	10,6 x 10 ⁻⁴	1,0 - 300 x 10 ⁻⁷	4,6 - 1.400 x 10 ⁻⁴		
	Olivina	1,9 - 4,4 x 10 ⁻⁷	7,2 - 16,8 x 10 ⁻⁴	1,1 - 12,6 x 10 ⁻⁷	4,2 - 48,1 x 10 ⁻⁴	3,6 x 10 ⁻⁷	16 x 10 ⁻⁴		
Paramagnético	Anfibólio	-	-	0,8 - 11,3 x 10 ⁻⁷	2,5 - 41,9 x 10 ⁻⁴	-	-		
	Piroxênio	1,9 - 3,1 x 10 ⁻⁷	6,1 - 10,2 x 10 ⁻⁴	0,8 - 8,0 x 10 ⁻⁷	2,6 - 26,0 x 10 ⁻⁴	-	-		
	Biotita	0,63 - 1,0 x 10 ⁻⁷	1,8 - 2,9 x 10 ⁻⁴	0,5 - 9,8 x 10 ⁻⁷	1,4 - 28,0 x 10 ⁻⁴	5,2 - 9,8 x 10 ⁻⁷	15, - 29, x 10 ⁻⁴		
	Calcopirita	-	-	0,11 - 0,55 x 10 ⁻⁷	0,46 - 2,31 x 10 ⁻⁴	0,05 - 1,0 x 10 ⁻⁷	0,23 - 4 x 10 ⁻⁴		
	Pirita	0,03 x 10 ⁻⁷	0,13 x 10 ⁻⁴	0,04 - 0,13 x 10 ⁻⁷	0,20 - 0,65 x 10 ⁻⁴	0,1 - 10 x 10 ⁻⁷	0,35 - 50 x 10 ⁻⁴		
Diamagnético	Calcita	-4,8 x 10 ⁻⁹	-1,3 x 10 ⁻⁵	-4,80 x 10 ⁻⁹	-1,3 x 10 ⁻⁵	3,0 - 14 x 10 ⁻⁹	0,75 - 3,9 x 10 ⁻⁵		
	Apatita	-33,2 x 10 ⁻⁹	-10,5 x 10 ⁻⁵	-4,78 x 10 ⁻⁹	-1,5 x 10 ⁻⁵	-	-		

A- Valores convertidos de cgs (cm³/g) em SI (m³/kg) segundo a equação: $4\pi \times 10^{-3}$ (Hopstock, 1985).

B- Valores calculados segundo a equação: $\chi_s = \chi/\rho$.

C- Fonte: Svodoba (1987).

3.5.1 Separação magnética na caracterização tecnológica

A separação magnética na caracterização tecnológica permite determinar *curvas de separabilidade* para o material estudado, que auxiliam na avaliação da eficiência dessa separação. As curvas de separabilidade possibilitam a previsão do comportamento do material na separação, uma vez que representam a distribuição de uma propriedade física no minério, fornecendo subsídios para o beneficiamento mineral (Sant'Ágostino & Kahn, 1997).

O separador magnético mais comumente utilizado em laboratório é o aparelho Frantz Isodinâmico modelo L-1, pioneiro na linha de equipamentos de bancada, devido à sua versatilidade e à existência de diversos dados publicados sobre sua aplicação (Luz, 2004). O Frantz Isodinâmico, que realiza separações a seco, consiste basicamente de uma calha vibratória, com inclinações longitudinal e lateral variáveis (0 a 90°), situada entre os pólos de um eletroímã gerador de campo magnético.

A calha é o local onde efetivamente ocorre a separação entre minerais fortemente magnéticos e fracamente magnéticos. Sua inclinação, tanto lateral quanto longitudinal, e vibração são importantes para determinar o tempo de exposição dos minerais ao campo magnético, influenciando diretamente na eficiência da separação, principalmente em função da densidade e granulometria das partículas.

O campo magnético aplicado às partículas minerais é uniforme, ou seja, a força do campo magnético, produto da intensidade do campo magnético pela intensidade do gradiente, é constante ao longo de toda calha (Abouzeid, 1990; Delboni, 1992) e seu valor máximo é de aproximadamente 20.000 Gauss, equivalente à intensidade máxima de corrente atingida pelo equipamento que é de 1,8 A segundo o site do fabricante (www.sgfrantz.com) e como ilustrado no gráfico da figura 7.

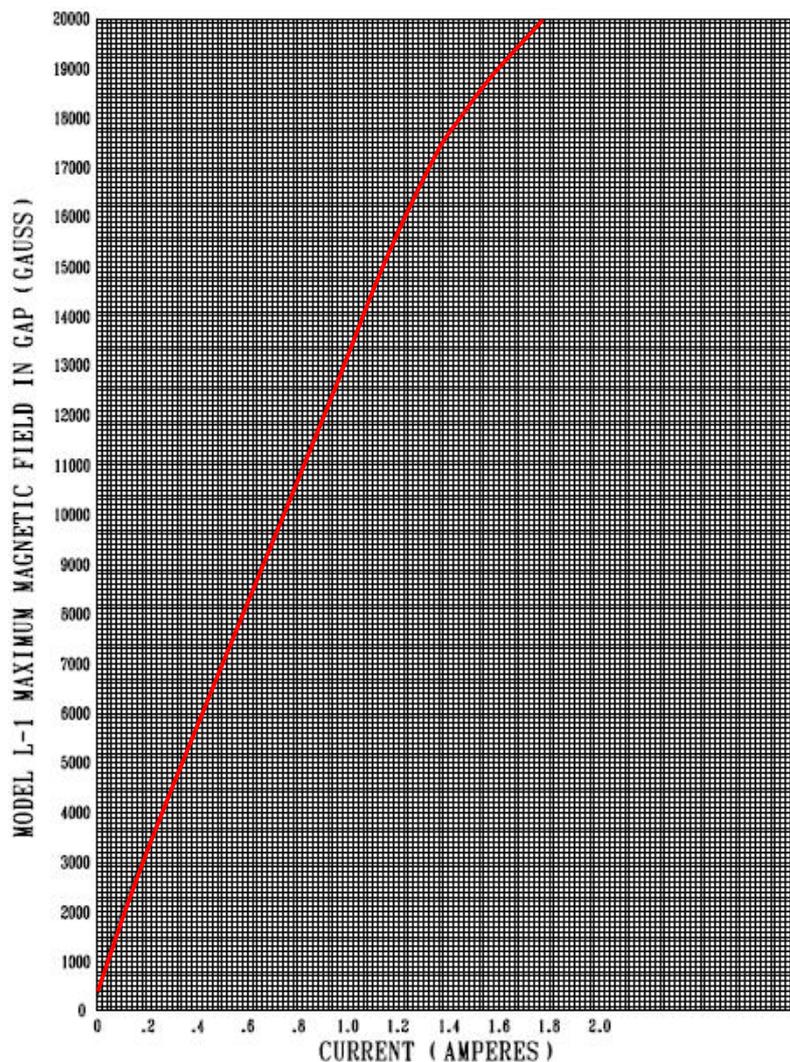


Figura 7 – Gráfico de relação entre intensidade de corrente (A) e de campo magnético (Gauss) para o Frantz Isodinâmico modelo L-1 (informação pessoal)¹.

Segundo Parfenoff (1970) os principais fatores que influenciam na separação magnética dos minerais ao Frantz Isodinâmico são a intensidade de corrente e a inclinação lateral. O mesmo autor apresentou o comportamento previsto para diversos minerais quando submetidos a diferentes intensidades de corrente e os intervalos de ocorrência das principais fases presentes nas amostras estudadas encontram-se na tabela 3.

¹ Dado fornecido pelo presidente da S. G. Frantz Company Inc., Jens Dahl, via correio eletrônico em 2 de fevereiro de 2007.

Tabela 3 – Comportamento no Frantz Isodinâmico das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas compilado de Parfenoff (1970).

Minerais	Intensidade de corrente no Frantz Isodinâmico (A) (Inclinações longitudinal e lateral: 15°)												
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	A máx. ¹	Não-mag.
Magnetita	[Barra grossa entre 0,0 e 0,1]												
Pirrotita	[Barra grossa entre 0,0 e 0,1]												
Ilmenita	[Barra grossa entre 0,2 e 0,4]												
Flogopita	[Barra grossa entre 0,2 e 0,5]												
Diopsídio	[Barra grossa entre 0,8 e 1,0]												
Forsterita	[Barra grossa entre 0,7 e 0,9]												
Tremolita	[Barra grossa entre 0,5 e 0,6]												
Calcita	[Barra grossa entre A máx. e Não-mag.]												
Dolomita	[Barra grossa entre A máx. e Não-mag.]												
Apatita	[Barra grossa entre A máx. e Não-mag.]												
Calcopirita	[Barra grossa entre A máx. e Não-mag.]												
Pirita	[Barra grossa entre A máx. e Não-mag.]												

Nota: As linhas mais grossas representam intervalos de ocorrência mais frequentes.

1- Intensidade máxima de corrente de aproximadamente 1,8 A.

Rosenblum (1958) e Rosenblum & Brownfield (2000) também realizaram um estudo sobre comportamento dos minerais ao Frantz Isodinâmico, elaborando uma tabela de susceptibilidade magnética, reproduzida na tabela 4 para os principais minerais presentes nas amostras estudadas, e demonstrando a influência da variabilidade química dos minerais na separação magnética. Apesar dos autores utilizarem a denominação “susceptibilidade magnética” os mesmos afirmam que os dados apresentados não têm relação com o sistema internacional de unidades (SI ou CGS) ou com força de campo magnético.

Tabela 4 – Comportamento no Frantz Isodinâmico das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas compilado de Rosenblum & Brownfield (2000).

Minerais	Intensidade de corrente no Frantz Isodinâmico (A)																			
	(Inclinação longitudinal: 25°; inclinação lateral: 15°; granulometria de 0,125 a 0,150 mm)																			
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	>1,7	
Magnetita	█																			
Pirrotita	█																			
Ilmenita			█	█	█															
Flogopita			█	█	█	█	█	█	█											
Diopsídio			█	█	█	█	█	█	█											
Forsterita			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█							
Tremolita			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█						
Calcita																				█
Dolomita																				█
Apatita															█	█	█	█	█	█
Calcopirita																				█
Pirita																				█

Nota: As linhas mais grossas representam intervalos de ocorrência mais freqüentes.

A principal diferença observada entre os dados apresentados nos dois trabalhos está no comportamento dos silicatos diopsídio e forsterita, que na tabela de Parfenoff (1970) apresentam-se menos magnéticos, e flogopita, que para o autor ocorre em intervalo mais restrito de ocorrência.

Apesar dos valores de susceptibilidade magnética bastante distintos entre silicatos e apatita (indicados na tabela 2), nos valores apresentados por Parfenoff (1970) há uma sobreposição de ocorrência no Frantz Isodinâmico entre diopsídio e apatita, no intervalo de intensidade de corrente entre 1,0 A e a amperagem máxima (aproximadamente 13.100 a 20.000 Gauss), e tremolita e apatita, da intensidade máxima de corrente ao produto não-magnético, o que não ocorre na tabela de Rosenblum & Brownfield (2000).

Outro equipamento da mesma linha de separadores magnéticos é o Frantz de Barreiras modelo LB-1, no qual o campo magnético gerado possui um gradiente de campo, resultando em uma força de campo magnético cerca de 3,5 vezes maior que no Frantz Isodinâmico (informação pessoal²; figura 8) e possibilitando a separação de minerais fracamente magnéticos (Hayes, 1985).

² Dado fornecido pelo presidente da S. G. Frantz Company Inc., Jens Dahl, via correio eletrônico em 5 de setembro de 2007.

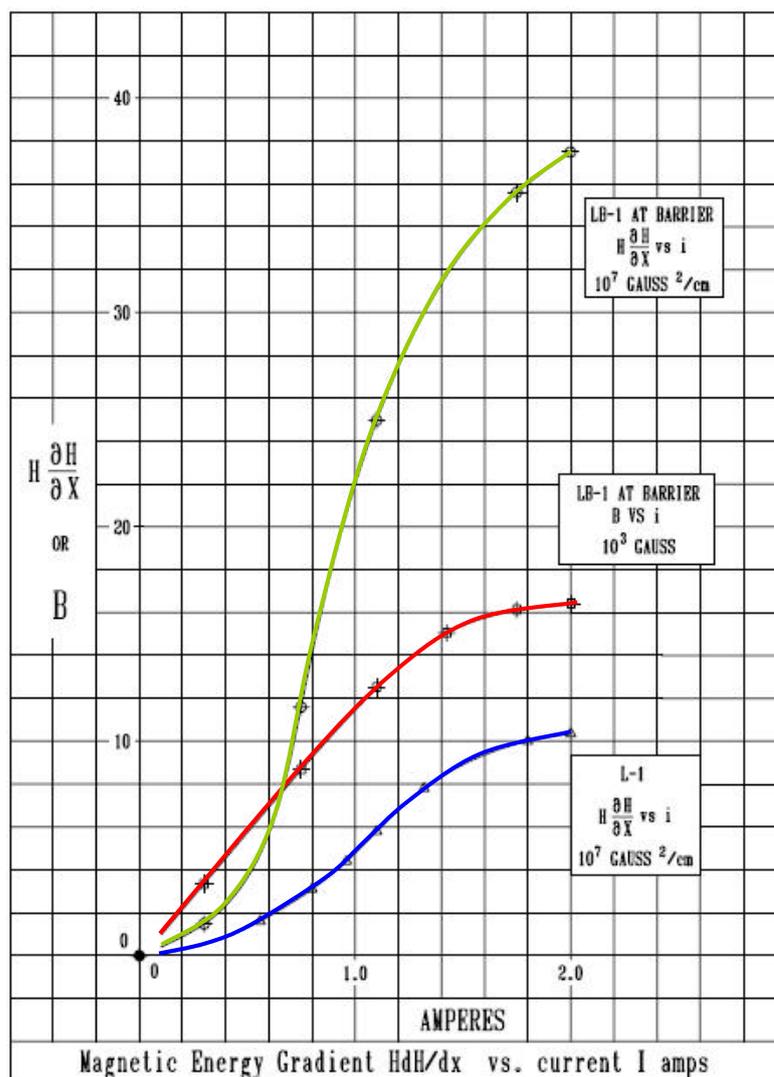


Figura 8 – Gráfico de relação entre intensidade de corrente (A) e gradiente de campo (Gauss^2/cm) para o Frantz Isodinâmico modelo L-1 e Frantz de Barreiras modelo LB-1 (curvas azul e verde, respectivamente) e de campo magnético (Gauss) para o Frantz de Barreiras (curva vermelha) (informação pessoal)³.

Os aparelhos também diferem na granulometria das partículas a serem separadas, segundo Kahn & Tassinari (2005):

- ✓ Frantz Isodinâmico- 0,04 a 0,60 mm;
- ✓ Frantz de Barreiras- 0,02 a 2 mm.

De acordo com o fabricante (www.sgfrantz.com) no Frantz de Barreiras existem ainda adaptações no sistema de alimentação e de transporte das partículas pela calha, que possuem circuitos elétricos distintos do separador magnético, superando problemas de obstrução na alimentação e de movimentação irregular das partículas no modelo Isodinâmico.

³ Dado fornecido pelo presidente da S. G. Frantz Company Inc., Jens Dahl, via correio eletrônico em 2 de fevereiro de 2007.

A utilização do Frantz de Barreiras resulta em melhor seletividade das fases minerais presentes nas amostras estudadas, principalmente para as que apresentam comportamento paramagnético, tais como flogopita, diopsídio e fosfiterita, eventualmente possibilitando a separação entre partículas de mesma espécie em função de variações que possam ocorrer em sua composição química.

3.5.2 Separação magnética no beneficiamento de minérios

A susceptibilidade magnética pode ser utilizada como parâmetro diferencial para beneficiamento de minérios, cuja eficiência de separação dependerá principalmente das propriedades magnéticas dos minerais e da granulometria da amostra, exercendo influência ainda o tempo de residência da amostra no campo magnético, a liberação dos minerais presentes e as forças de gravidade e de fricção (Dahlin and Rule, 1993; Augusto *et al.*, 2002).

Essa propriedade é utilizada para calcular a força de atração magnética exercida sobre uma partícula mineral, que depende da susceptibilidade magnética do mineral, da massa da partícula e das condições (intensidade e gradiente) do campo magnético aplicado. A tabela 5 apresenta uma classificação dos minerais para fins de processamento mineral com base nessa força magnética.

A tabela 6 apresenta os tipos de separadores magnéticos classificados conforme a intensidade de campo magnético e o gradiente de campo, ressaltando-se que a força magnética que atua sobre uma partícula aumenta em função dessas duas variáveis e sem gradiente de campo não há força magnética.

Com base nos dados da literatura sobre susceptibilidade magnética e na classificação dos minerais para fins de beneficiamento apresentada na tabela 5, verifica-se que o principal intervalo para separação dos silicatos varia de 10.000 a 20.000 Gauss, sendo necessária a utilização de um separador magnético com alto gradiente de campo para remoção dos mesmos e concentração dos não-magnéticos apatita e carbonatos.

Tabela 5 – Classificação dos minerais para fins de beneficiamento, indicando as principais fases minerais presentes nas amostras estudadas.

Base mineralógica	Base para processamento mineral	Faixa de campo magnético para separação (Gauss)	Mineral ⁽¹⁾
Ferromagnéticos	Ferromagnéticos	500 - 5.000	Magnetita
	Moderadamente magnéticos	5.000 - 10.000	Ilmenita Pirrotita
Paramagnéticos	Fracamente magnéticos	10.000 - 18.000	Serpentina
			Mica
			Apatita
			Dolomita
			Calcopirita
	Muito fracamente magnéticos	> 18000	Pirita
			Serpentina
			Diopsídio
			Mica
			Dolomita
Diamagnéticos	Não magnéticos e diamagnéticos	-	Calcita
			Apatita

1- Classificação dos minerais varia conforme a origem da amostra.

Fonte: Luz, 2004.

Tabela 6 – Classificação de separadores magnéticos industriais.

Classificação	Intensidade de campo (Gauss)	Gradiente de campo (Gauss/cm)	Granulometria mínima (mm)	
			Separação a seco	Separação a úmido
Baixa intensidade	600 - 1.000	500	0,105	0,045
Alta intensidade	1.000 - 10.000	500	0,075	-
Alto gradiente	10.000 - 50.000	< 1.000	0,045	0,001

Fonte: Luz, 2004.

4 O COMPLEXO MÍNERO-QUÍMICO DE CAJATI

No complexo minero-químico de Cajati está instalada uma estrutura industrial verticalizada do grupo Bunge, antiga Serrana Nutrição Animal, que inclui desde a extração do minério até a expedição do produto final ao consumidor. Atualmente são comercializados: foscálcio, ácido fosfórico, fosfogesso e matéria-prima carbonática para fabricação de cimento e corretivos de solo.

O minério fosfático possui características econômicas intrínsecas peculiares, pois além de conter apatita, mineral portador de fósforo, a jazida apresenta muitas unidades carbonatíticas com teores de MgO baixos, elemento considerado como impureza no processo industrial de fabricação do foscálcio. Acrescenta-se a pureza tanto da apatita como dos carbonatitos no que se refere a contaminantes deletérios à saúde humana e animal, características de destaque da Mina de Cajati que induziram à produção de ácido fosfórico de qualidade para consumo em bebidas e foscálcio para aplicação em rações animais (dados fornecidos pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).

O foscálcio, marca registrada pela Bunge Fertilizantes S.A., é um fosfato bicálcico desfluorizado utilizado como suplemento mineral em rações. Para sua obtenção são necessários uma fonte de fósforo (nesse caso, o ácido fosfórico, produzido a partir da apatita) e uma fonte de cálcio, que na Mina de Cajati é obtida do próprio rejeito carbonático da usina de concentração mineral, devido à pureza do carbonatito calcítico.

As seqüências de produção dos complexos mineral e químico, fornecidas pela empresa, são descritas a seguir e encontram-se ilustradas nos anexos A e B, respectivamente.

O processo inicia-se com a operação de desmonte das frentes de lavra pré-selecionadas a partir de estudos geológicos e tecnológicos. Após o desmonte, os blocos são carregados e transportados para a britagem primária em britador giratório, onde ocorre redução do minério a fragmentos com cerca de 200 mm, e seguem para a britagem secundária em britador hidrocônico, com redução até aproximadamente 40 mm.

Devido às várias unidades geológicas da Mina apresentarem concentrações de minério diversas, o material britado é misturado na pilha de homogeneização a fim de se obter um material com teor máximo de 3,7% MgO e mínimo de 3,0% P₂O₅.

O material homogeneizado alimenta a usina de concentração mineral, onde ocorre a moagem em moinho de barras, com 88 a 90% passante em 0,417 mm (malha 35# na escala Tyler), e a “desmagnetização” (termo local para a operação de retirada da magnetita) através de uma polia magnética. Por meio de hidrociclones o minério sem magnetita é classificado em 0,020 mm para alimentar o circuito de grossos de flotação, em células mecânicas, e o de finos de flotação, em células de coluna.

Na flotação, a apatita é separada dos demais minerais por meio dos reagentes amido (fubá), como depressor, e Berol (reagente a base de nonifenol dioxietileno e sarcosina), como coletor. Esse processo gera um concentrado com teor de cerca de 36% P₂O₅ pela composição do concentrado de grossos com o de finos.

Quando o rejeito carbonático apresenta teor de MgO entre 3,7 e 4,3% é destinado à indústria de cimento, e quando esse teor é acima de 8,0% é utilizado como corretivo de solos.

O concentrado gerado na usina é solubilizado com ácido sulfúrico em reator de via úmida e filtrado, permitindo a separação do ácido fosfórico e do fosfogesso (rejeito). O ácido fosfórico segue para os tanques de armazenamento e para o sistema de evaporação, onde o nível de flúor é adequado ao de fósforo (relação P:F=100:1).

O enxofre utilizado para a produção de ácido sulfúrico é a única matéria-prima que não é extraída no local. Para a produção do ácido, o enxofre fundido a 140°C é filtrado e bombeado para o queimador, onde queima com ar seco a uma temperatura de 1.000 a 1.050°C; em seguida os gases quentes que saem do queimador (SO₂ + ar) são convertidos em SO₃, que posteriormente é absorvido em ácido sulfúrico concentrado, transformando-se em H₂SO₄.

O material carbonático é aspergido com o ácido fosfórico na geração do foscálcio. O produto segue para o silo de cura, depois para o secador, sendo então moído, classificado e ensacado para comercialização.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização de matérias-primas minerais utiliza diversos ensaios laboratoriais visando a concentração de espécies minerais para identificação de seus constituintes, determinação de suas propriedades e avaliação de possíveis associações entre as espécies presentes (Sant'Agostino & Kahn, 1997).

Os ensaios laboratoriais adotados para esse trabalho foram executados segundo a rotina de caracterização tecnológica e mineralógica da mina, que se baseiam no trabalho de Alves (1999) com algumas adaptações realizadas ao longo dos anos pela Empresa.

A autora realizou diversos testes em escala de laboratório, referentes à caracterização tecnológica, até atingir resultados satisfatórios em comparação com dados da usina de concentração mineral, padronizando assim equipamentos e suas condições operacionais, além de definir a faixa granulométrica com maior concentração de apatita e boa liberação do mineral, adequada para fins de estudos mineralógicos de detalhe. Para a caracterização mineralógica foram adotadas técnicas com a finalidade de se obter concentrados de apatita, sendo recomendada primeiramente a utilização de líquido denso para a segregação dos principais constituintes dos carbonatitos (carbonatos e flogopita), seguida de separação magnética da apatita dos demais minerais presentes (olivina, magnetita e sulfetos).

As atividades desenvolvidas neste trabalho objetivaram a caracterização tecnológica e mineralógica das Zonas de Xenólitos que, apesar de apresentarem composição bastante diferenciada do minério usualmente lavrado, são incorporadas às unidades carbonatíticas para alimentação do processo de beneficiamento mineral.

Para os estudos foram realizadas etapas laboratoriais de britagem, individualização de litotipos por catação, moagem, “desmagnetização”, deslamagem e classificação granulométrica nas instalações da Mina de Cajati. Separações minerais, análises químicas e mineralógicas complementares foram efetuadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LCT-

EPUSP). O fluxograma da figura 9 apresenta a sequência de atividades realizadas no trabalho, que são descritas sucintamente a seguir.

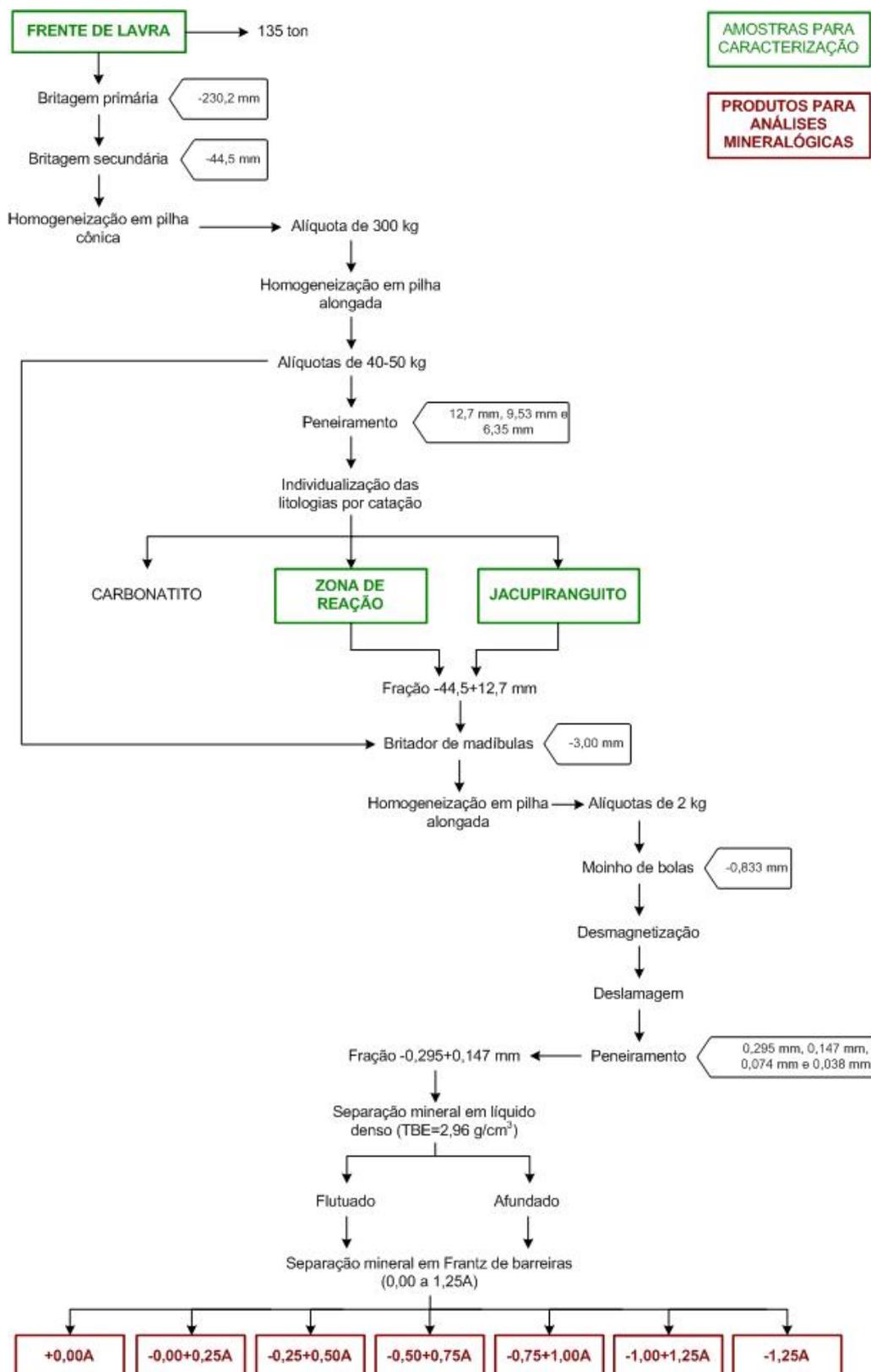


Figura 9 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.

5.1 Amostragem

Os estudos se apoiaram em três amostras volumétricas coletadas em frentes de lavra: duas na XENorte e uma na XELEste, ilustradas na figura 10 e nas fotos 1 a 3. A amostragem foi programada visando uma adequada representatividade da distribuição e tamanho dos xenólitos de jacupiranguito, segundo dados empíricos da mineração.

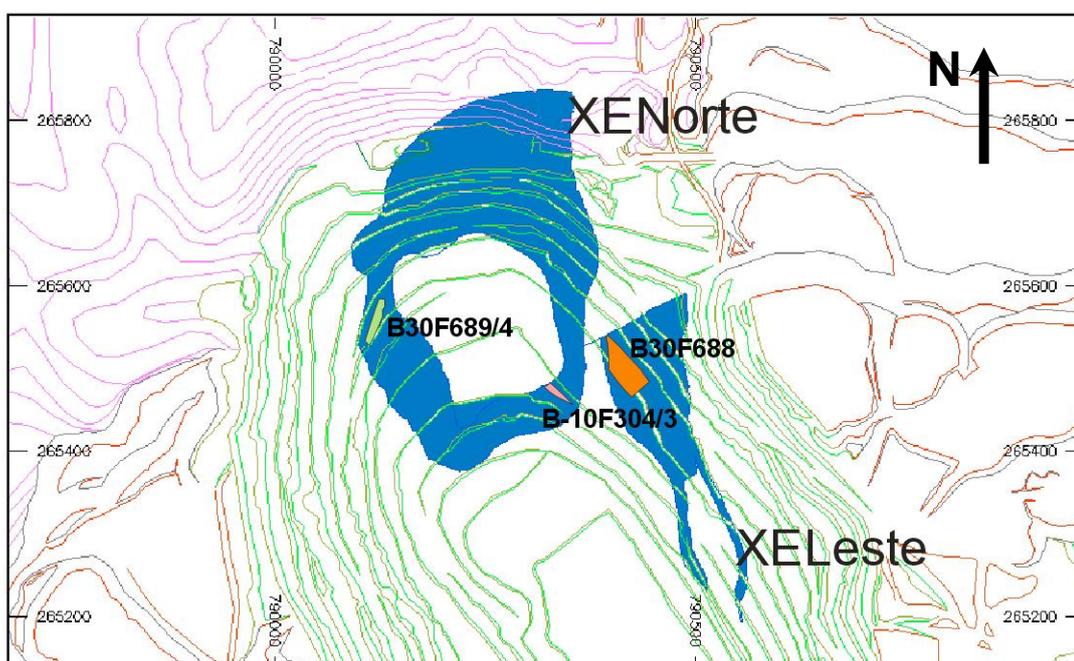


Figura 10 – Mapa de localização das frentes de lavra amostradas nas regiões de afloramento das Zonas de Xenólitos Norte (XENorte) e Leste (XELEste), com topografia da cava atualizada em 2004 (fornecido pela empresa Bunge Fertilizantes S.A.).

Para a amostragem, realizada em 2004, foram consideradas frentes de lavra posicionadas em regiões que abrangessem porções das Zonas de Xenólitos distribuídas ao longo de faixas aflorantes na Mina, as quais foram selecionadas com base nos resultados de análises químicas de pó de perfuratriz, comumente obtidos para o controle de teores da lavra.

Nas frentes de lavra foi retomado material desmontado com retro-escavadeira Liebherr para carregamento dos caminhões Random com caçamba para 30 toneladas (Foto 4).



Foto 1 – B30F689/4. Frente de lavra (à esquerda) e blocos desmontados (à direita) mostrando o contraste de cores dos litotipos carbonatito e jacupiranguito.



Foto 2 – B-10F304/3. Frente de lavra mostrando o contraste de cores dos litotipos carbonatito e jacupiranguito.

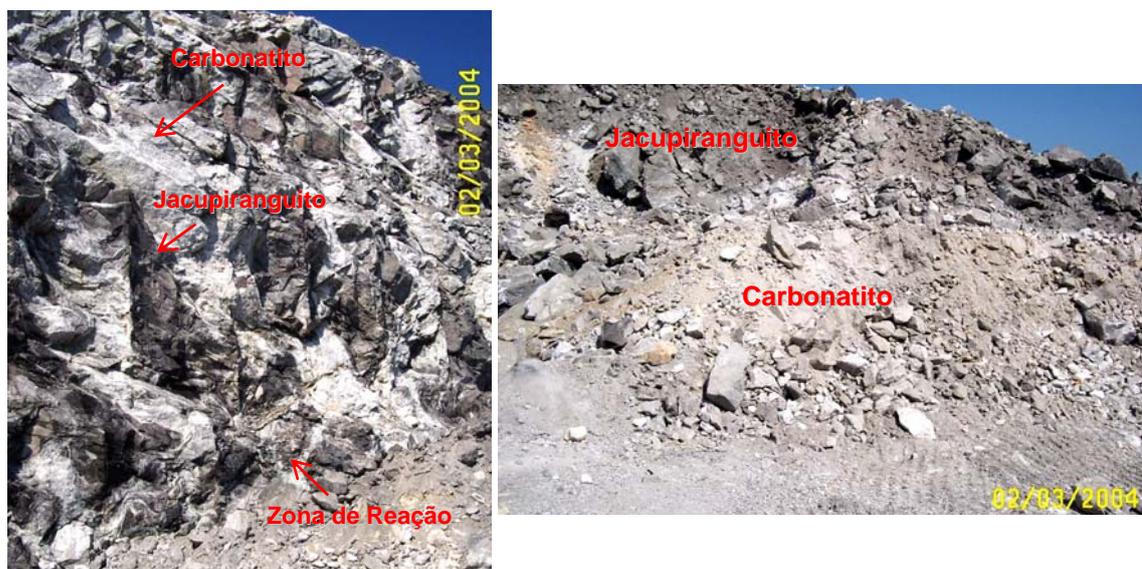


Foto 3 – B30F688. Frente de lavra (à esquerda) e blocos desmontados (à direita) mostrando o contraste de cores dos litotipos carbonatito e jacupiranguito.

As amostras geradas corresponderam a cerca de cinco viagens de caminhão de aproximadamente 27 toneladas cada, totalizando 135 toneladas, que foram submetidas na unidade industrial a britagem primária em 203,2 mm (Foto 5) e, posteriormente, britagem secundária com diâmetro máximo de 44,5 mm (Foto 6). O minério britado foi homogeneizado em pilha alongada de seção triangular, por meio de Stacker no sistema usual da pilha de homogeneização do minério de alimentação da usina, e retomado em parte manualmente por pás, gerando alíquotas de aproximadamente 300 kg utilizadas nos procedimentos seguintes.



Foto 4 – Retro-escavadeira Liebherr carregando caminhão Random com caçamba para 30 toneladas na operação de retomada das frentes de lavra amostradas.



Foto 5 – Britagem primária em 203,2 mm.



Foto 6 – Britagem secundária, com diâmetro máximo de 44,5 mm.

5.2 Individualização dos litotipos por catação

Após a britagem secundária observou-se a tendência natural das amostras de liberação entre os três litotipos presentes nas Zonas de Xenólitos: carbonatito, zona de reação e jacupiranguito, gerando fragmentos que apresentaram marcante diferença de coloração, como pode ser observado na foto 7, com o carbonatito de cor branca, o jacupiranguito de cor preta e a zona de reação com cores branca e vermelho vinho, geralmente apresentando bandamento.

O material britado foi homogeneizado em pilha alongada de seção triangular, confeccionada manualmente em escala de laboratório, de onde foi retomado em alíquotas de cerca de 40 a 50 kg. Uma alíquota foi submetida à classificação granulométrica em 12,7, 9,53 e 6,35 mm por peneiramento a úmido, e as frações retidas em 6,35 mm tiveram fragmentos dos diferentes litotipos individualizados por catação.

Juntamente com as três amostras de frentes de lavra (denominadas *amostras totais*), os litotipos zona de reação e jacupiranguito, separados por catação das amostras da Zona de Xenólitos Norte, foram selecionados para a realização dos ensaios de caracterização e receberam a denominação de *amostras de catação*, sendo representadas pelas letras ZR (zona de reação) e J (jacupiranguito) ao final de seu nome. A escolha dessas frentes de lavra deveu-se à maior expressão volumétrica da porção Norte no Complexo propiciando representatividade para a observação em maior detalhe das diferenças entre as fases minerais silicáticas comuns aos dois litotipos. A fração granulométrica retida em 12,7 mm foi selecionada devido à maior incidência de fragmentos de zona de reação frente às demais frações, possibilitando melhor verificação do comportamento desse litotipo.

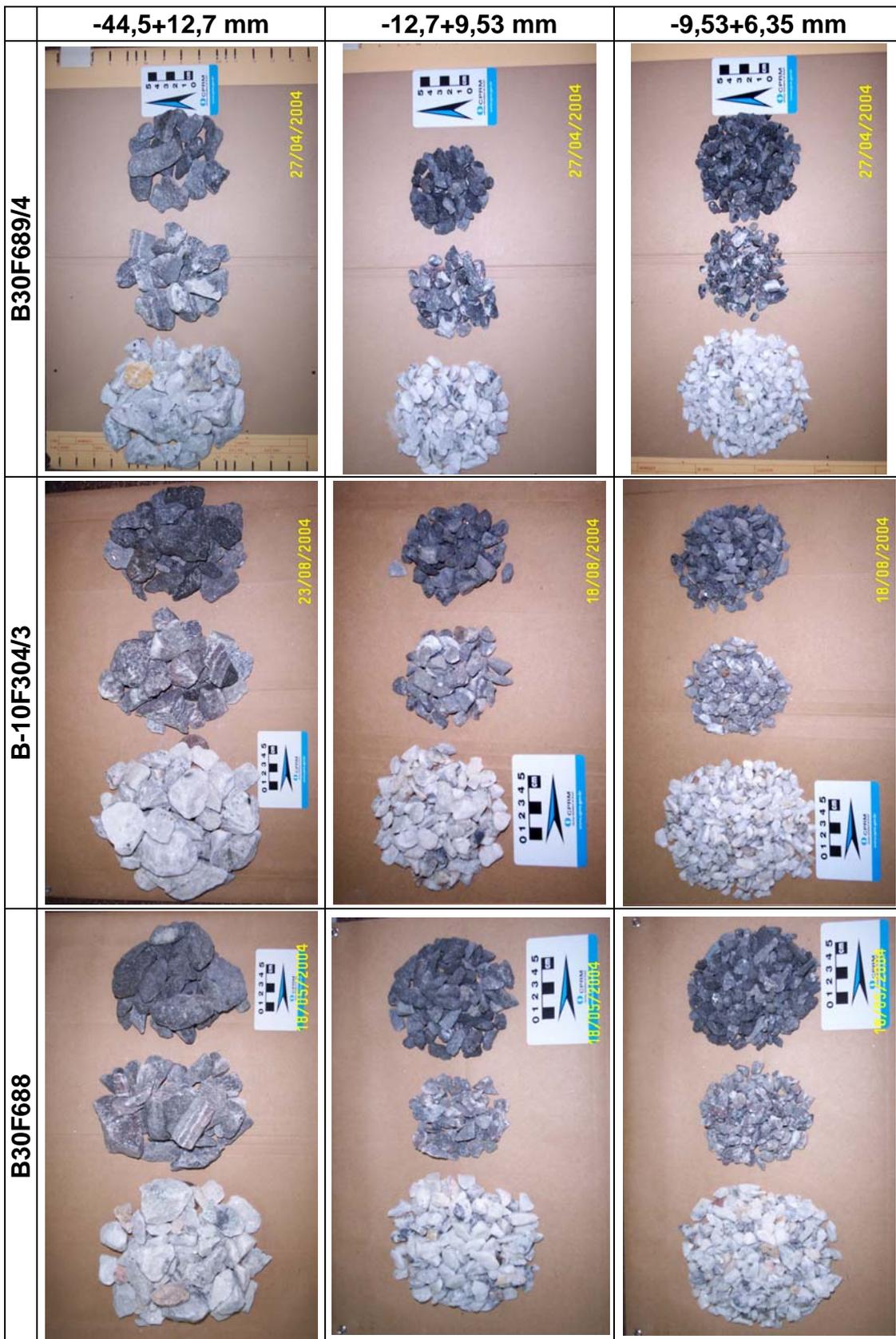


Foto 7 – Litotipos individualizados por catação. Da esquerda para a direita (em cada amostra): carbonatito, zona de reação e jacupiranguito.

5.3 Preparação das amostras

As amostras totais e de catação selecionadas tiveram novamente sua granulometria reduzida abaixo de 3,00 mm, em britador de mandíbulas em escala de laboratório, com posterior homogeneização em pilha alongada e retirada de alíquotas de 2 kg para as etapas de preparação, efetuadas conforme os procedimentos rotineiros da empresa e expostas a seguir.

✓ *Moagem em laboratório*- as amostras foram moídas via úmida em moinho de bolas com diâmetro de 20 cm, sendo reduzidas a dimensão inferior a 0,833 mm (malha 20# na escala Tyler). No caso de restar material retido, este foi reduzido em moinho de disco até atingir o tamanho necessário (Foto 8);

✓ *“Desmagnetização”*- procedimento utilizado para a retirada de minerais ferromagnéticos (magnetita); o termo, apesar de não ser conceitualmente correto, é de uso corrente na mina e será mantido neste trabalho. As amostras foram misturadas em água, formando uma polpa de peso total igual a 5 kg (40% sólidos), que passou por um campo magnético de baixa intensidade (0,25 A), em um tambor magnético (Foto 9);

✓ *Deslamagem*- este procedimento visou a retirada do material fino, inferior a 0,037 mm (malha 400# na escala Tyler), por peneiramento a úmido da amostra moída e desmagnetizada;

✓ *Classificação granulométrica após moagem*- no produto retido em 0,037 mm foi realizada a classificação granulométrica por via úmida, onde o material foi peneirado em 0,295 mm, 0,147 mm e 0,074 mm (respectivamente, malhas 48#, 100# e 200# na escala Tyler) (Foto 10).



Foto 8 – Moinho de bolas utilizado para moagem das amostras estudadas.



Foto 9 – Tambor magnético com campo de baixa intensidade para retirada de magnetita.



Foto 10 – Classificação granulométrica via úmida em 0,295 mm, 0,147 mm e 0,074 mm.

5.4 Separações minerais

As separações objetivam a concentração de fases minerais com base em uma ou mais propriedades físicas que os distingam, tendo sido aqui utilizadas a densidade e a susceptibilidade magnética. Os ensaios foram realizados unicamente no intervalo granulométrico -0,295 +0,147 mm, devido:

- ✓ à maior representatividade em massa- de 25,1 a 27,6% para as Zonas de Xenólitos (Brumatti, 2004);

- ✓ ao seu uso nos ensaios rotineiros de caracterização tecnológica da mina (Alves, 1999);
- ✓ ao elevado grau de liberação da apatita- aproximadamente 98% para um carbonatito típico (Raposo, 2002), 96% para um carbonatito de Zona de Xenólitos e 89% para zona de reação de Zona de Xenólitos (Brumatti, 2004).

5.4.1 Líquido denso

Esta etapa consiste na separação das fases minerais presentes através da diferença de densidade entre elas, sendo realizada com um líquido de densidade compatível com a dos minerais componentes do minério. Nesse caso, foi utilizado o tetrabrometano (TBE), de densidade $2,96 \text{ g/cm}^3$, e o ensaio foi realizado em centrífuga (Foto 11). Eventualmente no produto *flutuado* (FL) podem permanecer minerais pesados (de densidade superior à do líquido denso utilizado) sob a forma de grãos mistos ou agregados minerais e inclusões, assim como é de se esperar minerais leves (de densidade inferior à do líquido) no produto *afundado* (AF). A tabela 7 mostra a densidade relativa das principais fases minerais presentes nas Zonas de Xenólitos, como identificado por Brumatti (2004).



Foto 11 – Centrífuga utilizada para separação em líquido denso.

Tabela 7 – Densidade relativa das principais fases minerais presentes nas amostras estudadas.

Mineral	Composição química teórica	Densidade (g/cm³)
Serpentina	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2,50 – 2,60
Calcita	CaCO ₃	2,72
Dolomita	MgCa(CO ₃) ₂	2,85
Flogopita	KMg ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (F, OH) ₂	2,86
TBE	Br₂CHCHBr₂	2,96
Tremolita	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	3,00 – 3,30
Apatita	Ca ₅ (F, Cl, OH)(PO ₄) ₃	3,15 – 3,20
Diopsídio	CaMg(Si ₂ O ₆)	3,20 – 3,30
Forsterita	Mg ₂ SiO ₄	3,27 – 4,37
Calcopirita	CuFeS ₂	4,10 – 4,30
Pirrotita	Fe _{1-x} S	4,58 – 4,65
Ilmenita	FeTiO ₃	4,70
Pirita	FeS ₂	5,02
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5,18

Fonte: Klein, 2002.

5.4.2 Separador magnético Frantz de Barreiras

O aparelho Frantz de Barreiras modelo LB-1 atinge elevados gradientes de campo magnético que possibilitam a separação de minerais fracamente magnéticos (Fotos 12 e 13). Por esse motivo o equipamento foi selecionado para realizar as separações magnéticas das fases minerais presentes nas amostras estudadas, cujos minerais paramagnéticos apresentam valores de susceptibilidade magnética próximos, como apresentado no item 3.5.

A separação foi realizada nos produtos de separação em líquido denso e possibilitou o levantamento de curvas de separabilidade no presente estudo, que auxiliaram na avaliação da eficiência da separação magnética para individualizar os silicatos componentes do minério. Tanto para o produto flutuado quanto para o produto afundado estabeleceu-se variação de corrente de 0,00 a 1,25 A (campo magnético de intensidade equivalente a aproximadamente 13.800 Gauss, como indicado na figura 8 do item 3.5.1) com intervalos de 0,25 A, utilizando inclinação lateral de 20° e frontal de 10° que se mostraram mais adequadas para a granulometria do material em estudo.

Vale ressaltar que, assim como na separação mineral por líquido denso, no produto magnético podem ocorrer minerais diamagnéticos em determinada intensidade de corrente, sob a forma de grãos mistos ou agregados minerais e inclusões, assim como minerais paramagnéticos podem ocorrer no produto não-magnético.

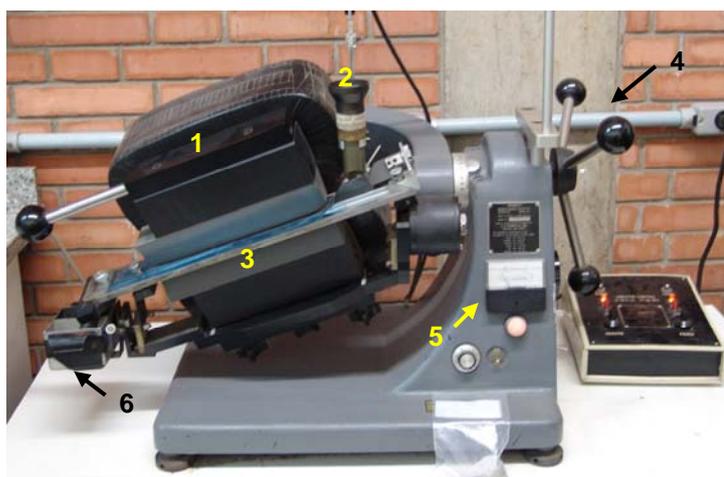


Foto 12 – Frantz de Barreiras modelo LB-1 e seus principais componentes, utilizado para separação magnética das fases minerais presentes nas amostras estudadas.
1- bobina; 2- alimentação; 3- calha vibratória; 4- ajuste de inclinação lateral; 5- ajuste de intensidade de corrente; 6- recipientes de coleta dos produtos magnético e não-magnético.

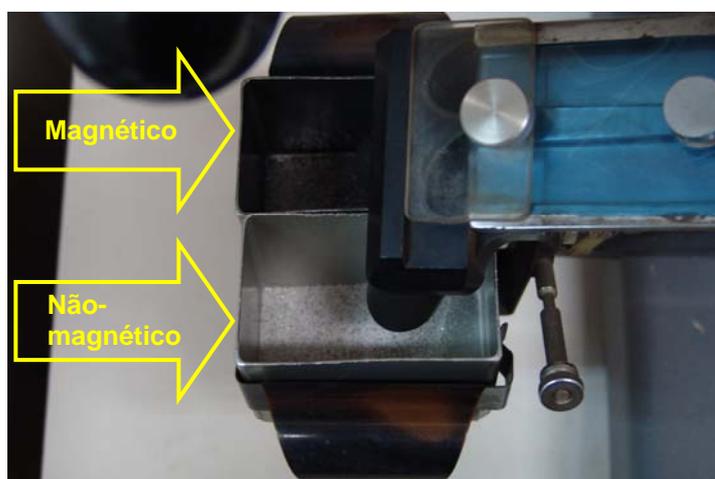


Foto 13 – Detalhe dos recipientes de coleta dos produtos magnético e não-magnético.

5.5 Procedimentos analíticos

Os litotipos individualizados por catação, as frações granulométricas (após britagem secundária e moagem) e os produtos das separações minerais foram submetidos a diversos procedimentos analíticos para determinação de sua composição química e mineralógica.

Para os produtos de separação magnética em Frantz de Barreiras essas análises foram realizadas em uma amostra total e de seus litotipos correspondentes (B-10F304/3, B-10F304/3-ZR e B-10F304/3-J), selecionada de forma a representar química e mineralogicamente as Zonas de Xenólitos. Tais produtos foram, por vezes, compostos em função da pequena representatividade em massa e similaridade mineralógica entre os mesmos.

5.5.1 Análises químicas

As análises químicas foram efetuadas por fluorescência de raios X (FRX), em espectrômetro modelo Axios Advanced com dectetor de comprimento de onda seqüencial utilizando o software SuperQ, ambos da marca Panalytical (Foto 14). Foram confeccionadas pastilhas fundidas e analisados os elementos P_2O_5 , CaO, MgO, SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e K_2O , com perda ao fogo (PF) determinada em mufla a $1.050^\circ C$.

5.5.2 Análises mineralógicas

A observação das características, abundância e associações dos minerais presentes em todos os produtos obtidos na separação magnética foi realizada em estereomicroscópio Marca ZEISS, modelo STEMI SV8 (Foto 15), com aumento máximo de 60 vezes. A análise estereomicroscópica permitiu estabelecer as

condições mais adequadas para separação magnética dos minerais presentes, definindo intervalos de intensidade de corrente preferenciais de ocorrência dos mesmos.

Foram efetuadas identificações das fases minerais por difração de raios X (DRX), através do método do pó, no difratômetro de raios X modelo MPD 1880, da marca Philips (Foto 16) com o software X'Pert HighScore Plus (marca Panalytical), utilizando o banco de padrões difratométricos do International Centre for Diffraction Data (ICDD) versão PDF2 (2006). As condições de coleta dos difratogramas foram:

- ✓ intervalo de varredura- 2,5 a 50° 2 θ ;
- ✓ passo da varredura- 0,02° 2 θ ;
- ✓ tempo por passo- 1 s;
- ✓ tipo de varredura- contínua;
- ✓ tensão- 40 kV;
- ✓ corrente- 40 mA;
- ✓ tubo de radiação- Cu ($K_{\alpha 1} = 1,542 \text{ \AA}$);
- ✓ monocromador de grafite;
- ✓ fenda divergente fixa no feixe incidente- 1°;
- ✓ fenda receptora no feixe difratado- 0,2 mm;
- ✓ *soller slit*- 0,04 rad.

Para a caracterização da composição química das fases minerais recorreu-se à microscopia eletrônica de varredura (MEV), em equipamento modelo ESTEREOSCAN 440 da marca Leica, acoplada a espectrômetro de dispersão de energia da marca Oxford (EDS) e software de microanálise química INCA, também da marca Oxford (Foto 17). Foi possível a análise de elementos mais pesados que o B, com limite de detecção de 0,1%.

A técnica visou à determinação da composição química de fases minerais com uma configuração de elétrons retroespalhados, que permitiu a individualização das fases através de contraste de tons de cinza em função do número atômico médio dos elementos presentes, com as fases mais claras apresentando elementos de número atômico mais elevado.

Foram utilizadas montagens de grãos em fitas de carbono dupla face para investigações mineralógicas preliminares e seções polidas de grãos embutidos em resina para determinações de composição química dos minerais; tanto as

montagens como as seções polidas foram recobertas com carbono. As microanálises foram realizadas por área no centro dos grãos, limitada pelo tamanho dos mesmos, com coleta de 60 análises para as fases mais abundantes e 30 para as fases menos freqüentes.



Foto 14 – Espectômetro de raios X da marca Panalytical, modelo Axios Advanced, para realização de análises químicas por FRX.



Foto 15 – Estereomicroscópio Marca ZEISS, modelo STEMI SV8, utilizado na observação das características físicas das fases minerais.

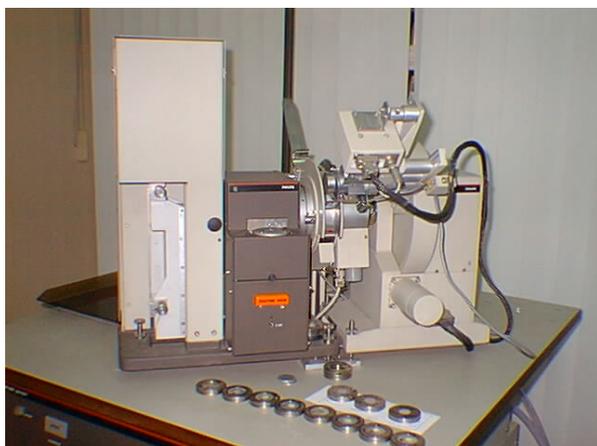


Foto 16 – Difrator de raios X da marca Philips, modelo MPD 1880, utilizado para identificação das fases minerais.



Foto 17 – Microscópio eletrônico de varredura acoplado a espectrômetro de dispersão de energia da marca Oxford, modelo LEO 440, utilizado para determinação da composição química dos principais silicatos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização mineralógica

6.1.1 Identificação dos minerais: *Estereomicroscopia*

A análise estereomicroscópica permitiu reconhecer as características dos minerais presentes nas Zonas de Xenólitos, além de verificar os intervalos de separação magnética nos quais foram mais abundantes. As principais propriedades físicas dos minerais utilizadas para sua identificação foram: cor, transparência, brilho e hábito e encontram-se descritas na tabela 8.

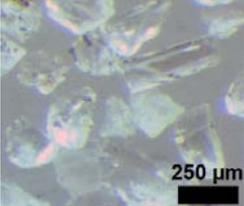
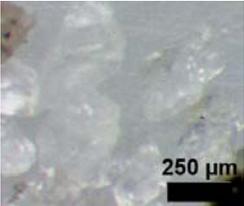
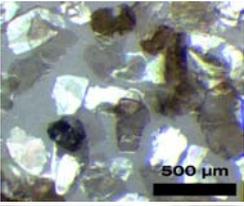
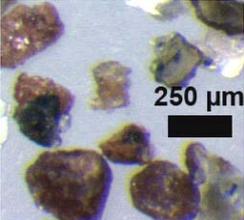
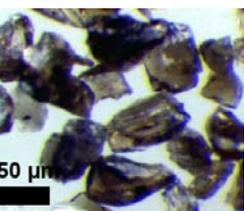
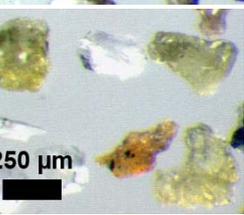
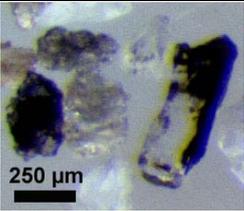
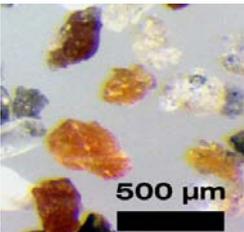
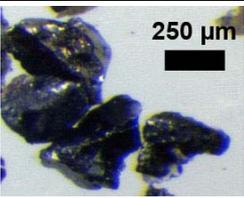
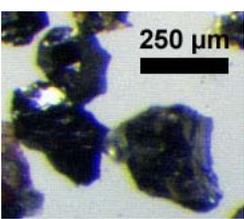
A apatita mostrou-se incolor, transparente, de brilho vítreo, algumas partículas apresentando hábito prismático; não foram observadas impregnações superficiais sendo que poucos grãos ocorreram mistos com carbonatos e magnetita e com inclusões de olivina e sulfetos. Nas separações minerais concentrou-se principalmente no produto afundado não-magnético (-1,25 A) com raras inclusões; nos afundados -0,75+1,00 A e -1,00+1,25 A ela também esteve presente, porém em quantidades muito pequenas, e nos flutuados -1,00+1,25 A e -1,25 A o mineral ocorreu freqüentemente associado a carbonatos.

Os carbonatos mostraram-se com cor branca, translúcidos, com algumas partículas apresentando hábito romboédrico; não foram observadas impregnações superficiais e raros grãos mistos ocorreram com olivina, apatita e magnetita. Concentrados nos produtos flutuados da separação mineral em líquido denso, eles começaram a predominar no intervalo -0,75+1,00 A da separação magnética, porém incidindo principalmente no não-magnético. Nas amostras de zona de reação foi mais comum a ocorrência de carbonatos com inclusões de olivina e na forma de grãos mistos com esta, presentes em -0,25+0,50 A.

Nos produtos afundados das amostras totais os carbonatos foram comuns no não-magnético na forma de grãos mistos com apatita e nas amostras de zona de reação foram mais comuns entre 0,75 e 1,25 A com olivina, porém nas amostras de

jacupiranguito os carbonatos foram abundantes a partir de 0,75 A e freqüentemente associados à olivina.

Tabela 8 – Características dos minerais obtidas por observações em estereomicroscopia.

	<p>✓ Apatita: incolor, transparente, brilho vítreo, com algumas partículas apresentando hábito prismático.</p>		<p>✓ Carbonatos: cor branca, translúcidos, com algumas partículas apresentando hábito romboédrico.</p>
 	<p>✓ Mica: cores castanha e verde, translúcidas, hábito placóide. Ocorrem ainda aglomerados de mica microcristalina, apresentando coloração alaranjada.</p>	 	<p>✓ Piroxênio: cor marrom-escuro a marrom-esverdeado, por vezes verde-claro, transparente, brilho vítreo, raramente apresentando hábito prismático.</p>
 	<p>✓ Olivina: cores incolor, preta e laranja, transparente, brilho vítreo, sem hábito definido.</p>		<p>✓ Anfibólio: cor verde clara a escura, translúcido, hábito fibroso.</p>
	<p>✓ Serpentina: cor branca, raramente cinza e verde clara, translúcida, brilho sedoso, hábito fibroso.</p>		<p>✓ Magnetita: cor preta, opaca, brilho metálico, sem hábito definido.</p>
	<p>✓ Ilmenita: cor preta, opaca, brilho sub-metálico, sem hábito definido.</p>		<p>✓ Sulfetos: cor amarela, opacos, brilho metálico, sem hábito definido.</p>

A mica mostrou-se em três variedades:

- ✓ cores castanha e verde- translúcidas e de hábito placóide, foram as duas variedades mais abundantes. Raros grãos ocorreram mistos com carbonatos e com inclusões de magnetita e olivina;
- ✓ microcristalina de cor laranja- ocorrendo na forma de aglomerados com cristais de 5 a 20 μm (10 μm em média), foi mais comum nas amostras de zona de reação. Foram abundantes os grãos mistos com olivina e as inclusões de magnetita.

Nas separações minerais as micas ocorreram em um amplo intervalo magnético nos produtos flutuados. As variedades castanha e verde concentraram-se geralmente liberadas entre 0,00 e 0,75 A, freqüentemente apresentando inclusões de magnetita e raras inclusões de olivina, e na forma de grãos mistos com carbonatos nos produtos menos magnéticos, acima de 1,00 A. A mica microcristalina laranja concentrou-se principalmente entre 0,00 e 0,50 A e também ocorreu nos menos magnéticos até 1,00 A.

Apesar da baixa densidade em relação ao TBE, as variedades de mica castanha e verde estiveram presentes em quantidades elevadas nos produtos afundados magnéticos até 0,75 A e freqüentemente na forma de grãos liberados, por vezes com inclusões de olivina. A presença do mineral em produtos diversos das separações em líquido denso e magnética provavelmente se deve ao seu hábito placóide, que faz com que o mesmo tenha fácil aderência a outros grãos e superfícies, sendo arrastado.

O piroxênio, mais abundante nas amostras de jacupiranguito, mostrou-se em duas variedades: cor marrom-escuro a esverdeado, variedade mais comum, e cor verde-claro, ausente na zona de reação, ambos transparentes, de brilho vítreo, raramente apresentando hábito prismático, sem impregnações superficiais e grãos mistos. Nas separações minerais em líquido denso concentraram-se no produto afundado, porém na separação magnética as duas variedades apresentaram comportamento diferenciado e bem definido, com o piroxênio marrom ocorrendo entre 0,00 e 0,50 A e o piroxênio verde-claro principalmente em -0,50+0,75 A.

A olivina, mais abundante na zona de reação, mostrou-se em três variedades:

- ✓ cor preta e incolor- transparentes, de brilho vítreo e sem hábito definido. Grãos mistos foram comuns com magnetita, carbonatos e piroxênio (amostras de jacupiranguito) assim como inclusões de magnetita;
- ✓ cor laranja- também transparente, de brilho vítreo, sem hábito definido e na forma de grãos liberados, sendo mais abundante nas amostras de zona de reação.

Nas separações minerais as olivinas ocorreram em um amplo intervalo magnético dos produtos afundados. As variedades preta e incolor concentraram-se principalmente entre 0,00 e 0,75 A com inclusões de magnetita para os produtos mais magnéticos e associações com carbonatos para os menos magnéticos; a olivina laranja concentrou-se principalmente no produto -0,50+0,75 A. Nos afundados não-magnéticos a olivina preta também foi comum, estando geralmente liberada formando poucos grãos mistos com apatita, enquanto as outras duas variedades foram comuns apenas entre -0,75+1,00 A.

O anfibólio mostrou-se de cor verde clara a escura, translúcido e hábito fibroso; não foram observadas impregnações superficiais e raros grãos ocorreram mistos com olivina e magnetita e com inclusões de olivina. Nas separações minerais o mineral ocorreu em um amplo intervalo magnético dos produtos afundados, de 0,00 a 1,00 A, principalmente nas amostras de zona de reação.

A serpentina ocorreu na cor branca (raramente cinza e verde clara), translúcida, brilho sedoso e hábito fibroso; não foram observadas impregnações superficiais e raros grãos ocorreram mistos e com inclusões de olivina. Nas separações o mineral apresentou distribuição similar à do anfibólio, porém também foi comum nos produtos flutuados de 0,00 a 0,75 A das amostras totais.

A magnetita mostrou-se de cor preta, opaca, brilho metálico e sem hábito definido; foi comum a sua ocorrência na forma de inclusões e de grãos mistos com outros minerais. Nas separações concentrou-se nos produtos magnéticos +0,00 A, tanto afundado como flutuado, e em -0,00+0,25 A ocorreu principalmente na forma de inclusões. A ilmenita mostrou-se de cor preta, opaca, brilho sub-metálico, sem hábito definido e na forma de grãos liberados; ocorreu no produto afundado magnético das separações minerais.

Os sulfetos, pouco frequentes nas amostras estudadas, mostraram-se de cor amarela, opacos, brilho metálico, sem hábito definido e na forma de grãos liberados;

nas separações minerais foram mais freqüentes nos produtos afundados não-magnéticos e raros nos magnéticos.

No anexo C são apresentadas as descrições detalhadas das observações estereomicroscópicas por produto da separação magnética, separadas por tipo de amostra (total, zona de reação e jacupiranguito), e no anexo D encontram-se as fotos referentes a essas descrições.

6.1.2 Identificação dos minerais: Difratomia de raios X

A difratometria de raios X (DRX) permitiu a identificação das espécies minerais de cada grupo mineralógico reconhecido por estereomicroscopia, as quais estão listadas na tabela 9.

Tabela 9 – Fases minerais identificadas por DRX e suas respectivas composições químicas teóricas.

Grupo mineral	Espécie mineral	Fórmula química
Apatita	Fluorapatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$
Carbonatos	Calcita magnesiana	$(\text{Mg}_{0,064}\text{Ca}_{0,936})(\text{CO}_3)$
	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Mica	Flogopita	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Piroxênio	Diopsídio ferroso	$\text{Ca}_{0,92}\text{Fe}_{0,08}\text{Al}_{0,14}\text{Fe}_{0,33}\text{Mg}_{0,53}\text{Si}_2\text{O}_6$
Olivina	Forsterita	Mg_2SiO_4
Anfibólio	Tremolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Serpentina	Clinocrisotila	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
-	Magnetita	Fe_3O_4
-	Ilmenita	FeTiO_3

Fonte: ICDD versão PDF2, 2006.

A apatita, único mineral portador de P_2O_5 , foi identificada como *fluorapatita*, que também é citada na literatura como variedade mais comum no Complexo (Gaspar, 1989; Morbidelli *et al.*, 1986). Ocorreram duas variedades de carbonatos, *calcita* e *dolomita*, sendo que a calcita identificada foi magnesiana e, assim como a apatita, é citada como a mais comum presente nos carbonatitos da mina.

Entre os silicatos, a mica foi identificada apenas como *flogopita*, o piroxênio como *diopsídio*, sendo este de variedade ferrosa, a olivina como *forsterita*, o anfibólio como *tremolita* e a serpentina como *clinocrisotila*. Ressalta-se que todos os silicatos identificados contêm MgO em sua composição.

Os óxidos *magnetita* e *ilmenita*, principais portadores de Fe_2O_3 e previamente identificados por estereomicroscopia, tiveram sua presença confirmada por DRX.

A tabela 10 apresenta as composições mineralógicas identificadas nos produtos de separação mineral de cada amostra, como indicado no item 5.5, e os respectivos difratogramas encontram-se no anexo E.

Tabela 10 – Identificação por DRX dos produtos compostos obtidos na separação magnética.

AMOSTRA	PRODUTO	MINERALOGIA
Total	+0,25 A	Calcita, dolomita, flogopita, magnetita, clinocrisotila, tremolita e forsterita (possível presença de fluorapatita).
	-0,25+0,50 A	Flogopita, calcita, dolomita forsterita tremolita e clinocrisotila.
	-0,50+0,75 A	Flogopita, calcita, dolomita, forsterita e clinocrisotila (possíveis presenças de tremolita e fluorapatita).
	-0,75+1,25 A	Dolomita, calcita, flogopita e forsterita, (possíveis presenças de tremolita e fluorapatita).
	-1,25 A	Calcita, dolomita e flogopita.
Zona de reação	+0,25 A	Flogopita, calcita, dolomita, clinocrisotila, magnetita e forsterita (possível presença de fluorapatita).
	-0,25+0,50 A	Flogopita, dolomita, calcita, tremolita, clinocrisotila e forsterita.
	-0,50+0,75 A	Flogopita, dolomita, calcita, clinocrisotila e tremolita (possível presença de forsterita).
	-0,75+1,25 A	Dolomita, calcita, flogopita, clinocrisotila, fluorapatita e tremolita (possível presença de forsterita).
	-1,25A	Calcita, dolomita e flogopita (possível presença de fluorapatita).
Jacupiranguito	-	Calcita, flogopita, dolomita, clinocrisotila, forsterita e tremolita.
Total	+0,25 A	Diopsídio, forsterita, magnetita, ilmenita, flogopita, tremolita, clinocrisotila e fluorapatita (possível presença de calcita).
	-0,25+0,50 A	Diopsídio, forsterita, flogopita, tremolita e clinocrisotila.
	-0,50+1,25 A	Forsterita, diopsídio, fluorapatita, flogopita, dolomita, calcita e clinocrisotila.
	-1,25 A	Fluorapatita, calcita e dolomita.
Zona de reação	+0,25 A	Forsterita, ilmenita, flogopita, diopsídio, magnetita, fluorapatita, tremolita e clinocrisotila.
	-0,25+0,50 A	Forsterita, diopsídio, flogopita, tremolita e clinocrisotila.
	-0,50+1,25 A	Forsterita, dolomita, fluorapatita, flogopita, calcita, tremolita e clinocrisotila (possível presença de diopsídio).
	-1,25 A	Fluorapatita, calcita, dolomita e flogopita.
Jacupiranguito	+0,25 A	Diopsídio, forsterita, magnetita, ilmenita, flogopita, clinocrisotila e tremolita.
	-0,25+0,50 A	Diopsídio, forsterita, flogopita, tremolita e clinocrisotila.
	-0,50+0,75 A	Forsterita, dolomita, calcita, diopsídio, flogopita, clinocrisotila, fluorapatita e tremolita.
	-0,75 A	Fluorapatita, calcita, dolomita, flogopita e clinocrisotila (possível presença de forsterita).

6.1.3 Composição química dos silicatos: Microscopia eletrônica de varredura

As análises por microscopia eletrônica de varredura acoplada a espectrômetro de dispersão de energia (MEV-EDS) permitiram verificar a composição química das principais fases minerais silicáticas, complementando a identificação por DRX. Devido a similaridades de estrutura cristalina existentes entre espécies constituintes dos grupos mica, piroxênio, olivina e tremolita, os minerais podem ser melhor caracterizados por análise química pontual. Além disso, flogopita, diopsídio e forsterita apresentaram variações de cores que podem refletir diferenças em suas composições químicas. Clinocristotila não foi analisada devido à sua pequena representatividade nas amostras.

Para realização destas análises foram selecionados os intervalos de separação magnética $-0,25+0,50$ A e $-0,50+0,75$ A de produtos flutuado (FL) e afundado (AF) em líquido denso das amostras de zona de reação e de jacupiranguito, nos quais os silicatos ocorreram em maior abundância.

6.1.3.1 Flogopita

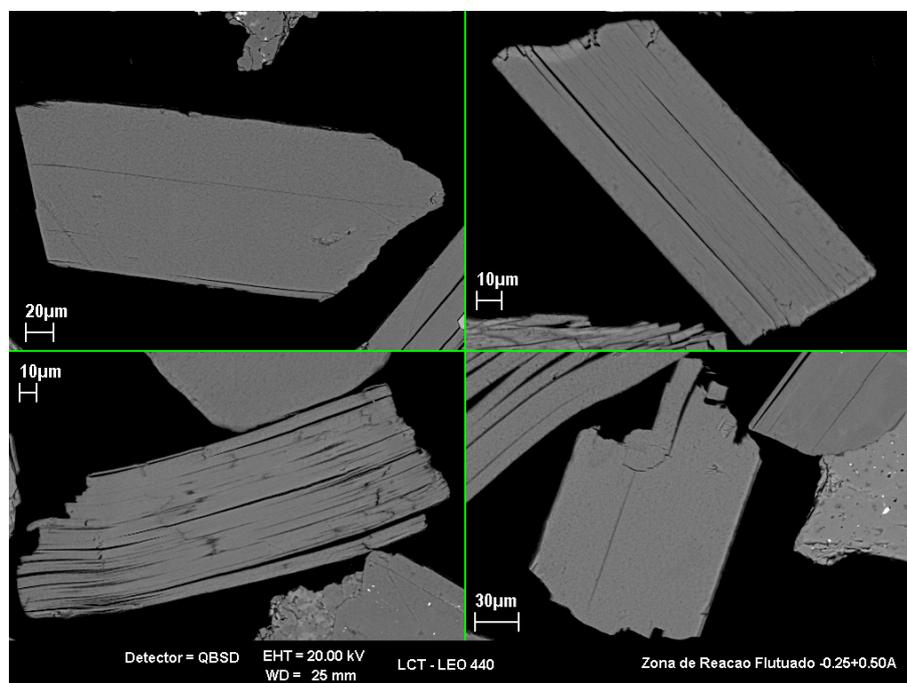
Os grãos de flogopita mostraram-se compostos principalmente por MgO, SiO₂, Al₂O₃ e K₂O, com teores variáveis de Fe₂O₃ e podendo ou não conter TiO₂, Na₂O e BaO, este último presente em menor frequência; Fe₂O₃, TiO₂, Na₂O e BaO são impurezas comuns admitidas na composição teórica do mineral [KMg₃AlSi₃O₁₀(F, OH)₂] (Betejtin, 1970; www.mindat.org). Os resultados completos são apresentados no anexo F e sumariados na tabela 11. A fotomicrografia 1 mostra grãos típicos de flogopita ao MEV, onde pode ser observado o hábito placóide característico.

Os resultados de microanálise revelaram diferenças na composição química entre variedades de flogopita, porém ficou prejudicada a associação da composição química com os tipos diferenciados por textura e cor em estereomicroscopia, uma vez que eles ocorreram mesclados nos vários produtos das separações minerais.

Tabela 11 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de flogopita.

	Teores (% em peso, normalizados)							
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	BaO
Zona de reação FL -0,25+0,50 A								
Média	26,7	41,8	6,62	12,9	10,6			
Mínimo	22,3	38,0	2,64	1,81	8,77	nd	nd	nd
Máximo	28,5	44,0	19,5	19,5	11,4	2,78	1,68	1,94
Desvio padrão	1,77	1,82	4,36	4,45	0,61			
Zona de reação FL -0,50+0,75 A								
Média	27,4	42,0	3,90	14,5	10,8			
Mínimo	23,2	34,7	2,56	10,7	8,64	nd	nd	nd
Máximo	28,6	44,0	8,38	23,2	11,5	1,89	1,04	4,53
Desvio padrão	1,51	2,34	1,27	2,95	0,67			

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.



Fotomicrografia 1 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de flogopita no produto flutuado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação.

O produto -0,25+0,50 A apresentou teores de Fe₂O₃ mais elevados que o -0,50+0,75 A, no qual os valores de Al₂O₃ foram maiores e menos variáveis, evidenciando que o primeiro óxido está presente em maior quantidade na flogopita microcristalina laranja que nas outras variedades, com o oposto ocorrendo para o segundo.

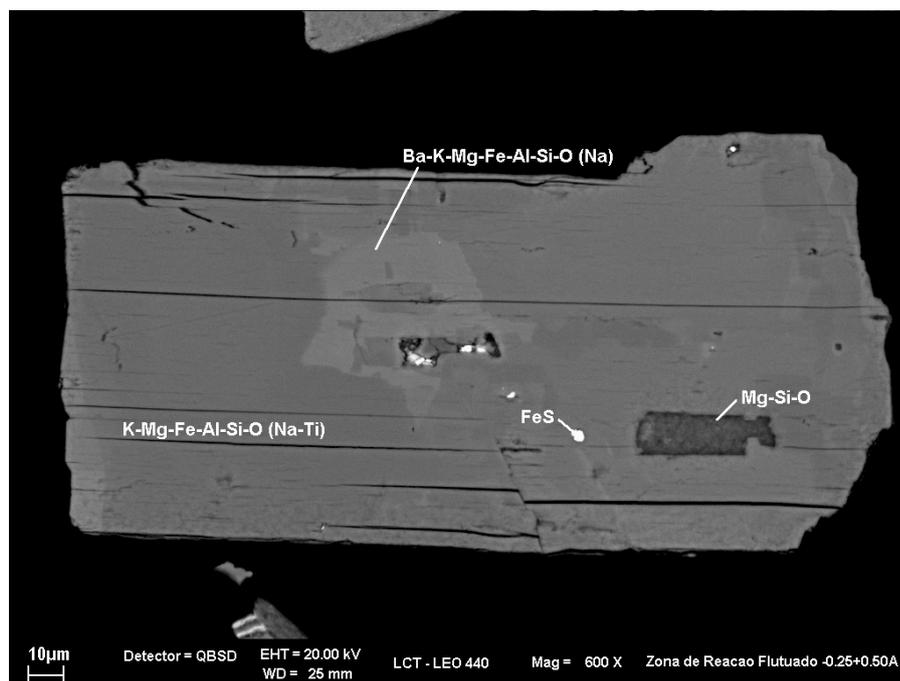
Raramente foram observados grãos apresentando zoneamento de composição química, aspecto não notável por estereomicroscopia, como ilustrado nas fotomicrografias 2 a 5 e indicado na tabela 12.

Tabela 12 – Microanálises por MEV-EDS em grãos de flogopita apresentando zoneamento.

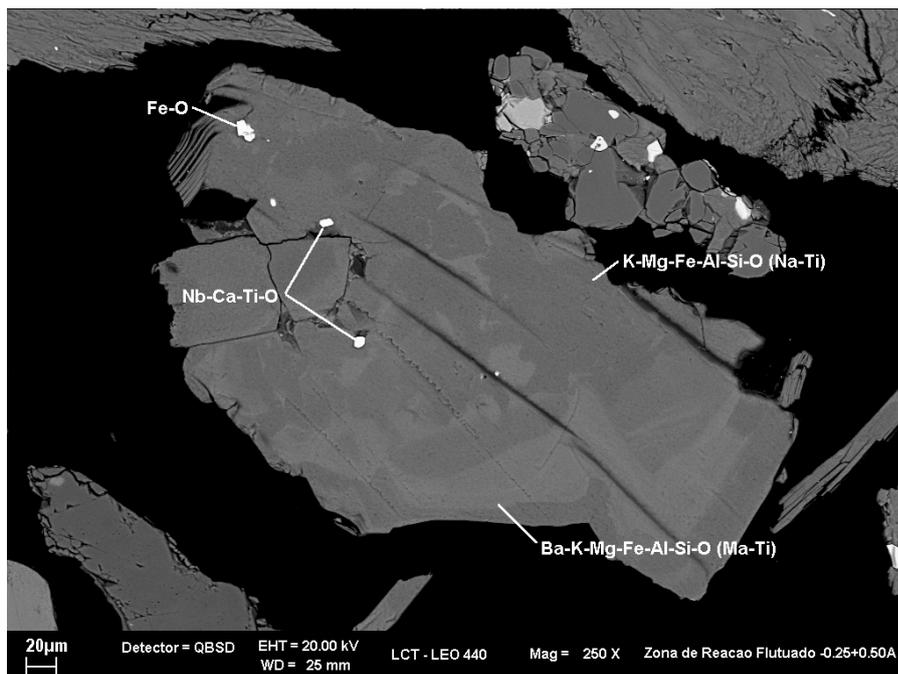
Grão	Área	Teores (% em peso, normalizados)							
		MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	BaO
Zona de reação FL -0,25+0,50 A									
Mica 5	A	27,8	44,1	4,43	11,7	11,1	0,32	0,53	nd
	B	25,7	38,0	3,11	19,5	9,45	nd	0,60	3,75
Mica 8	A	28,0	42,5	3,17	14,1	10,7	0,62	0,88	nd
	B	26,3	40,0	4,33	16,2	9,90	0,54	0,64	2,07
Mica 18	A	22,2	38,1	8,87	17,7	9,68	2,73	0,80	nd
	B	28,2	43,2	3,60	13,3	10,5	0,39	0,77	nd
Zona de reação FL -0,50+0,75 A									
Mica 52	A	26,8	39,7	2,63	17,6	10,1	0,42	0,70	2,05
	B	28,5	43,6	5,82	10,8	10,5	nd	0,70	nd

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.

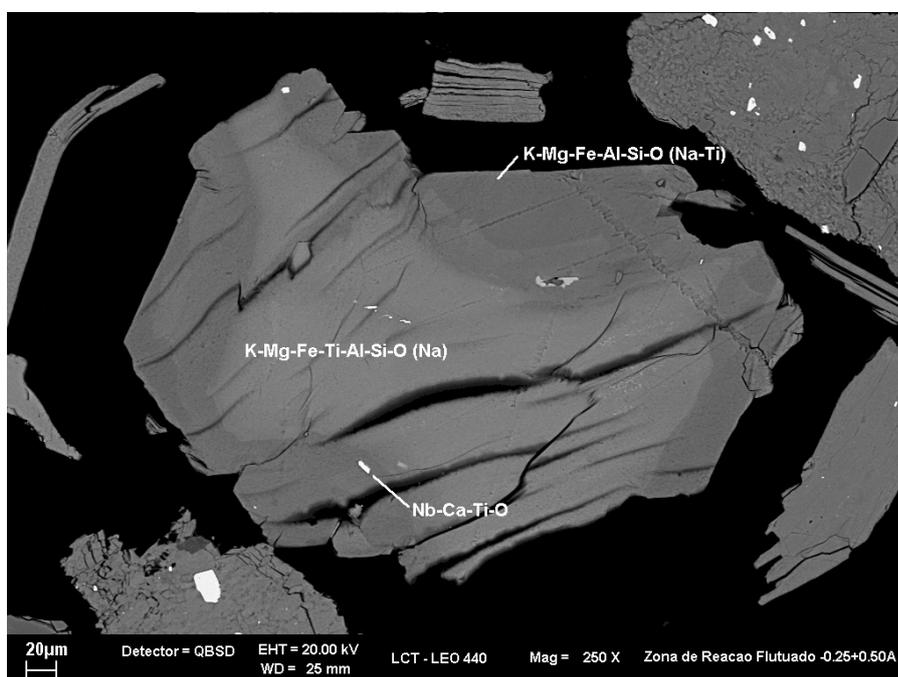
Dos quatro grãos analisados, três apresentaram porções contendo BaO, menores quantidades de MgO e SiO₂ e maiores de Al₂O₃, enquanto em um grão (Mica 18) notou-se porções com maiores diferenças nos teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ e menores de MgO e SiO₂.



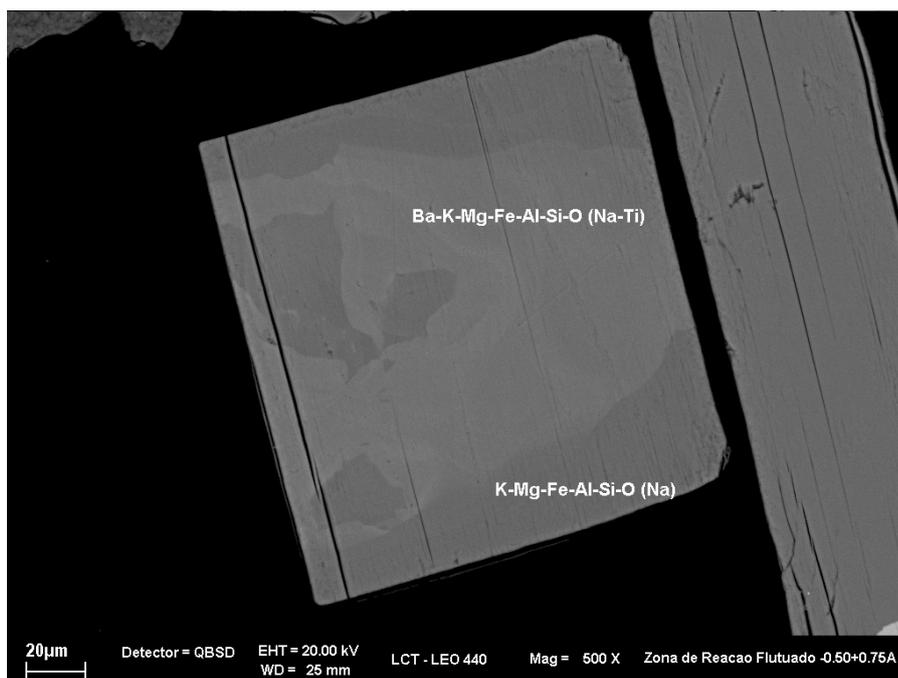
Fotomicrografia 2 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 5”. Flogopita apresentando zoneamento, com inclusões de forsterita (Mg-Si-O) e sulfeto de ferro (FeS). A porção escura [K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise A e a porção clara [Ba-K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na)] corresponde à análise B da tabela 12.



Fotomicrografia 3 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 8”. Flogopita apresentando zoneamento, com inclusões de magnetita (Fe-O) e pirocloro (Nb-Ca-Ti-O). A porção escura [K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise A e a porção clara [Ba-K-Mg-Fe-Al-Si-O (Ma-Ti)] corresponde à análise B da tabela 12.



Fotomicrografia 4 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 18”. Flogopita apresentando zoneamento, com inclusão de pirocloro (Nb-Ca-Ti-O). A porção clara [K-Mg-Fe-Ti-Al-Si-O (Na)] corresponde à análise A e a porção escura [K-Mg-Fe-Ti-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise B da tabela 12.



Fotomicrografia 5 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grão “Mica 52”. Flogopita apresentando zoneamento. A porção clara [Ba-K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na-Ti)] corresponde à análise A e a porção escura [K-Mg-Fe-Al-Si-O (Na)] corresponde à análise B da tabela 12.

6.1.3.2 Diopsídio

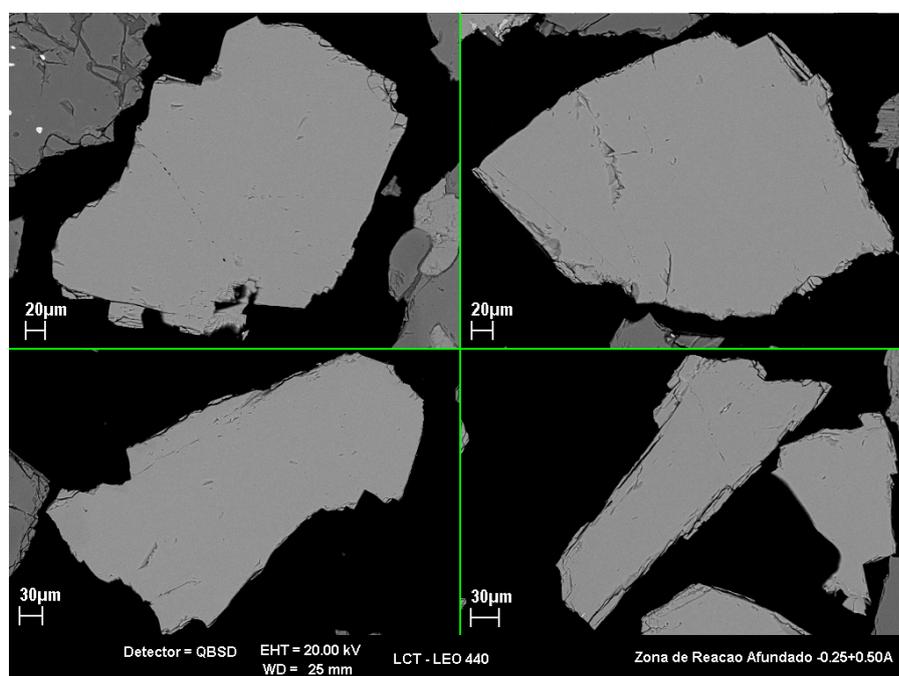
Os grãos de diopsídio mostraram-se compostos principalmente por CaO, MgO e SiO₂, com teores variáveis de Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ e podendo ou não conter pequenas porcentagens de Na₂O; Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂ e Na₂O são impurezas comuns admitidas na composição teórica do mineral [CaMg(Si₂O₆)] (Betejtin, 1970; www.mindat.org). Os resultados completos são apresentados no anexo F e sumariados na tabela 13. As fotomicrografias 6 e 7 mostram grãos típicos de diopsídio ao MEV, onde pode ser observado raro hábito prismático.

Relacionando os resultados de microanálise dos dois produtos magnéticos da amostra de jacupiranguito com as observações realizadas por estereomicroscopia notou-se que as duas variedades de diopsídio, com cores e comportamento magnético distintos, também apresentaram composições químicas diferentes. O diopsídio marrom, presente no produto -0,25+0,50 A, apresentou teores menores de CaO, MgO e SiO₂ e maiores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ com menor variação dos mesmos em comparação ao diopsídio verde-claro, presente em -0,50+0,75 A.

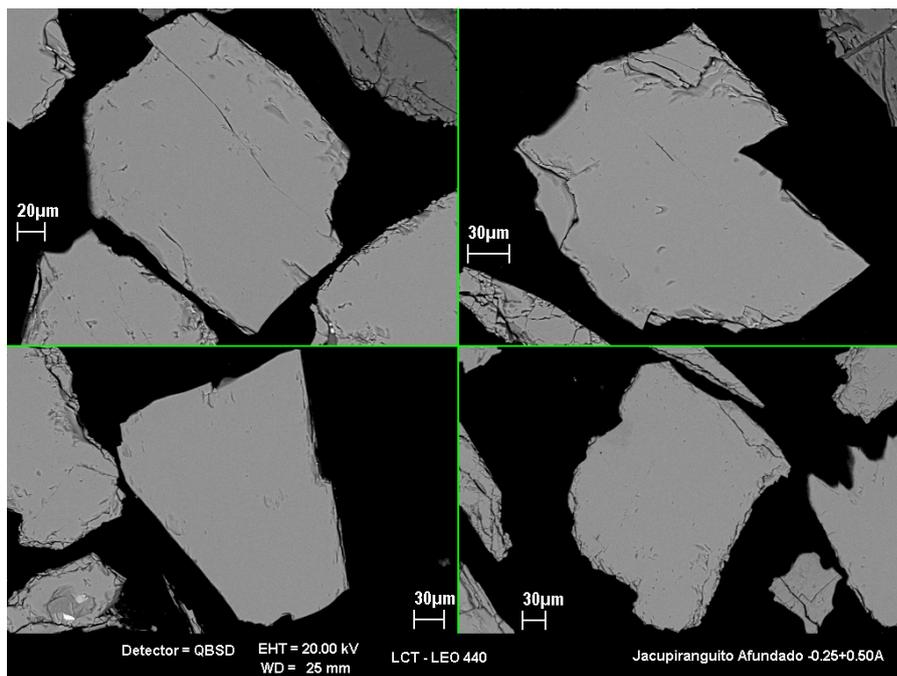
Tabela 13 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de diopsídio.

	Teores (% em peso, normalizados)						
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O
Zona de reação AF -0,25+0,50 A							
Média	24,7	13,8	47,2	5,98	5,55	2,41	
Mínimo	24,3	13,4	46,5	5,21	4,42	2,06	nd
Máximo	25,2	14,3	48,4	6,68	6,22	2,67	0,45
Desvio padrão	0,23	0,28	0,58	0,40	0,49	0,19	
Zona de reação AF -0,50+0,75 A							
Média	25,0	14,1	48,3	5,42	4,88	2,06	
Mínimo	24,5	13,3	46,7	3,20	1,41	0,65	nd
Máximo	26,1	16,1	52,6	6,29	6,10	2,59	0,44
Desvio padrão	0,42	0,77	1,71	0,85	1,31	0,61	
Jacupiranguito AF -0,25+0,50 A							
Média	24,7	13,3	46,5	6,19	6,45	2,53	
Mínimo	24,5	12,3	44,4	5,24	4,96	2,19	nd
Máximo	24,9	14,2	47,9	7,54	9,05	3,27	0,47
Desvio padrão	0,16	0,59	1,28	0,69	1,24	0,30	
Jacupiranguito AF -0,50+0,75 A							
Média	25,7	16,1	52,3	3,36	1,68	0,75	
Mínimo	24,9	13,6	47,3	2,51	0,68	0,39	nd
Máximo	26,1	16,8	53,5	5,89	5,49	2,37	0,47
Desvio padrão	0,31	0,76	1,54	0,79	1,19	0,47	

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.



Fotomicrografia 6 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de diopsídio no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação.



Fotomicrografia 7 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de diopsídio no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de jacupiranguito.

Na amostra de zona de reação, como citado anteriormente, o diopsídio verde-claro foi ausente e os dois produtos magnéticos analisados não apresentaram diferenças significativas.

Comparando a variedade marrom do mineral entre os dois tipos de amostras (produto -0,25+0,50 A), observou-se que na amostra de jacupiranguito o diopsídio apresentou maiores quantidades de Fe_2O_3 e Al_2O_3 .

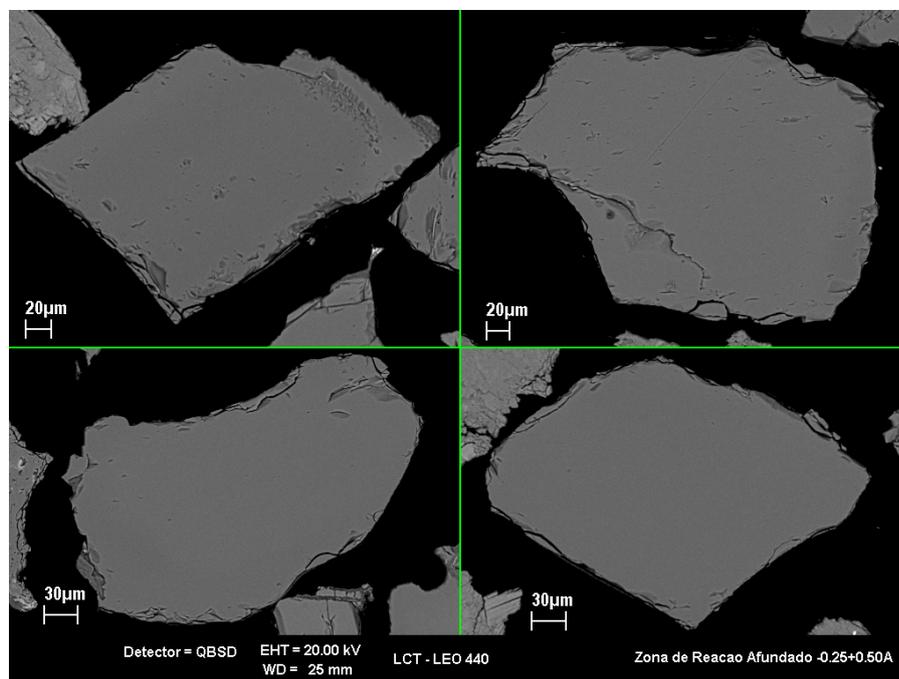
6.1.3.3 Forsterita

Os grãos de forsterita apresentaram composição química bastante simples, contendo principalmente MgO e SiO_2 , com teores inferiores a 10% de Fe_2O_3 e podendo ou não conter de MnO ; FeO e MnO são impurezas comuns admitidas na composição teórica do mineral [Mg_2SiO_4] (Klein, 2002; www.mindat.org). Os resultados completos são apresentados no anexo F e sumariados na tabela 14. As fotomicrografias 8 e 9 mostram grãos típicos de forsterita ao MEV, onde pode ser observada ausência de hábito e rugosidade superficial.

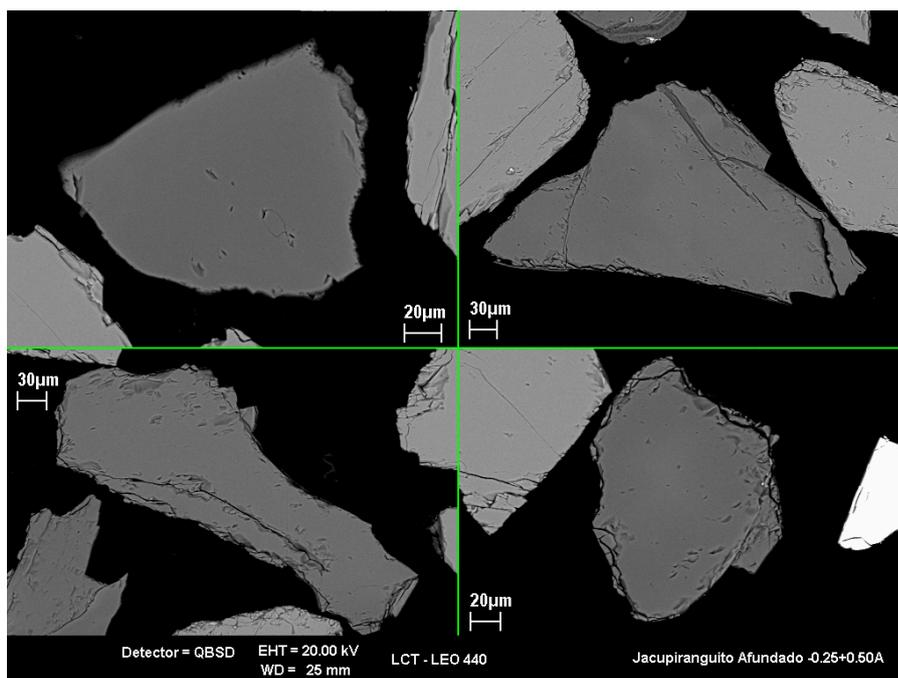
Tabela 14 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de forsterita.

	Teores (% em peso, normalizados)			
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO
Zona de reação AF -0,25+0,50 A				
Média	52,8	41,6	5,30	
Mínimo	50,6	40,9	3,18	nd
Máximo	54,6	42,1	8,00	0,49
Desvio padrão	1,19	0,35	1,41	
Zona de reação AF -0,50+0,75 A				
Média	53,8	42,0	3,90	
Mínimo	52,0	41,4	3,06	nd
Máximo	54,6	42,5	6,07	0,49
Desvio padrão	0,80	0,29	0,93	
Jacupiranguito AF -0,25+0,50 A				
Média	51,7	41,3	6,48	0,46
Mínimo	49,2	40,4	3,34	0,22
Máximo	54,3	42,1	9,41	0,78
Desvio padrão	1,85	0,59	2,26	0,18
Jacupiranguito AF -0,50+0,75 A				
Média	54,1	42,0	3,60	
Mínimo	52,8	41,8	2,84	nd
Máximo	54,8	42,5	4,96	0,36
Desvio padrão	0,61	0,22	0,67	

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.



Fotomicrografia 8 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de forsterita no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação.



Fotomicrografia 9 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de forsterita no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de jacupiranguito.

Para a forsterita também ficou algo prejudicada a correlação da composição química com as variedades identificadas por estereomicroscopia, pois no produto mais magnético -0,25+0,50 A ocorreram a forsterita incolor e preta, enquanto no menos magnético -0,50 +0,75 A estavam presentes as três variedades.

No produto -0,25+0,50 A os teores de Fe_2O_3 foram mais elevados e os de MgO pouco menores que no -0,50+0,75 A, revelando que a forsterita laranja é mais pobre no primeiro óxido e mais rica no segundo em comparação com as outras variedades.

Em relação aos dois tipos de amostras, o produto mais magnético do jacupiranguito apresentou maiores teores de Fe_2O_3 , enquanto na zona reação ele foi mais elevado no menos magnético, revelando a maior presença de forsterita incolor e preta na primeira amostra e de forsterita laranja na segunda.

6.1.3.4 Tremolita

Os grãos de tremolita, encontrados na amostra de zona de reação, mostraram-se compostos principalmente por MgO e SiO_2 , com teores inferiores a 10% de CaO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 e Na_2O e porcentagens menores de K_2O e TiO_2 ; FeO, Al_2O_3 , Na_2O ,

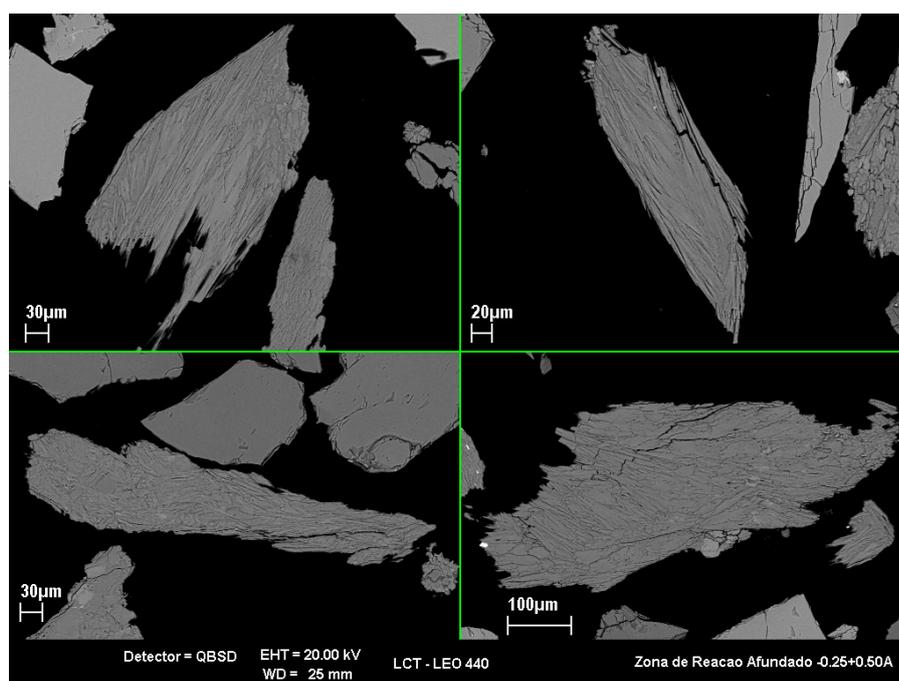
K_2O e TiO_2 são impurezas comuns admitidas na composição teórica do mineral $[Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2]$ (Betejtin, 1970; www.mindat.org). Os resultados completos são apresentados no anexo F e sumariados na tabela 15. A fotomicrografia 10 mostra grãos típicos de tremolita ao MEV, onde pode ser observado o hábito fibroso característico.

O produto -0,25+0,50 A, no qual a tremolita foi mais abundante, apresentou teores maiores de Fe_2O_3 e menores de SiO_2 , com menor variação de Al_2O_3 em comparação com o menos magnético -0,50+0,75 A.

Tabela 15 – Sumário de microanálises por MEV-EDS em grãos de tremolita.

	Teores (% em peso, normalizados)							
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
Zona de reação AF -0,25+0,50 A								
Média	5,47	22,4	50,8	5,76	5,93	3,08	1,43	5,16
Mínimo	2,97	19,5	47,9	4,42	4,19	0,89	0,80	2,92
Máximo	8,66	25,6	52,2	8,03	7,56	6,45	2,06	6,64
Desvio padrão	1,36	1,55	1,39	0,90	1,06	1,51	0,42	0,96
Zona de reação AF -0,50+0,75 A								
Média	5,88	23,1	54,5	4,23		2,22		5,78
Mínimo	3,08	21,7	48,9	2,96	nd	0,61	nd	3,26
Máximo	7,77	24,7	59,1	5,98	7,96	5,64	1,75	6,99
Desvio padrão	1,34	0,89	3,68	0,96		1,86		1,33

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.



Fotomicrografia 10 – Imagem ao MEV em elétrons retroespalhados. Grãos típicos de tremolita no produto afundado -0,25+0,50 A da amostra de zona de reação.

6.1.4 Consolidação da caracterização mineralógica

A composição mineralógica das Zonas de Xenólitos engloba minerais presentes nos três litotipos que constituem essa unidade litológica (carbonatito, zona de reação e jacupiranguito) e portanto suas proporções variam de acordo com as proporções desses litotipos, com quatro fases minerais sendo predominantes:

- ✓ carbonatos- ocorrendo principalmente na forma de calcita, esta com MgO em sua composição, e subordinadamente na forma de dolomita, são oriundos do carbonatito e da zona de reação, sendo mais abundantes no primeiro litotipo;
- ✓ flogopita- ocorrendo principalmente nas cores castanha e verde, além da variedade microcristalina laranja, está presente nos três litotipos, porém na zona de reação é mais abundante;
- ✓ diopsídio- ocorrendo nas cores marrom e verde-clara, é o principal constituinte do jacupiranguito e também aparece na zona de reação (apenas a variedade marrom);
- ✓ forsterita- ocorrendo nas cores incolor, preta e laranja, é abundante na zona de reação e no jacupiranguito (com exceção da variedade laranja).

Outras fases minerais importantes são: magnetita, presente nos três litotipos, tremolita, mais abundante na zona de reação, e fluorapatita, mineral de minério em quantidades significativas no carbonatito e na zona de reação. Clinocrisotila, ilmenita e sulfetos são fases minerais menores presentes nos três litotipos.

Segundo Brumatti (2004) a comparação da unidade litológica estudada com as unidades carbonatíticas compartimentadas na mina mostra similaridades na abundância dos principais minerais constituintes (calcita e flogopita) e diferenças na elevada quantidade de silicatos magnesianos (principalmente diopsídio e forsterita), ausentes ou pouco expressivos nos carbonatitos.

Dentre os silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos destacam-se a flogopita, o diopsídio, a forsterita e a tremolita, provenientes essencialmente da zona de reação e do jacupiranguito. Devido à sua importância na unidade litológica estudada, esses minerais foram analisados por MEV-EDS e suas composições químicas

encontram-se na tabela 16, com valores comparativos teórico e de publicações referentes ao Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga na tabela 17.

Tabela 16 – Composição química dos principais silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos efetuadas por MEV-EDS.

Mineral	Teores (% em peso, normalizados) ¹						
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Flogopita castanha e verde (zona de reação)	-	23,2 - 28,6	34,7 - 44,0	2,56 - 8,38	10,7 - 23,2	8,64 - 11,5	nd - 1,89
Flogopita castanha, verde e laranja (zona de reação)	-	22,3 - 28,5	38,0 - 44,0	2,64 - 19,5	1,81 - 19,5	8,77 - 11,4	nd - 2,78
Diopsídio marrom (zona de reação)	24,3 - 26,1	13,3 - 16,1	46,5 - 52,6	3,20 - 6,68	1,41 - 6,22	-	0,65 - 2,67
Diopsídio marrom (jacupiranguito)	24,5 - 24,9	12,3 - 14,2	44,4 - 47,9	5,24 - 7,54	4,96 - 9,05	-	2,19 - 3,27
Diopsídio verde-claro	24,9 - 26,1	13,6 - 16,8	47,3 - 53,5	2,51 - 5,89	0,68 - 5,49	-	0,39 - 2,37
Forsterita incolor e preta (zona de reação)	-	50,6 - 54,6	40,9 - 42,1	3,18 - 8,00	-	-	-
Forsterita preta e incolor (jacupiranguito)	-	49,2 - 54,3	40,4 - 42,1	3,34 - 9,41	-	-	-
Forsterita incolor, preta, e laranja (zona de reação)	-	52,0 - 54,6	41,4 - 42,5	3,06 - 6,07	-	-	-
Forsterita incolor, preta e laranja (jacupiranguito)	-	52,8 - 54,8	41,8 - 42,5	2,84 - 4,96	-	-	-
Tremolita (zona de reação)	2,97 - 8,66	19,5 - 25,6	47,9 - 59,1	2,96 - 8,03	nd - 7,96	0,61 - 6,45	nd - 2,06

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.

1- Os teores de Na₂O presentes nos minerais foram muito pequenos e de pouca importância para as Zonas de Xenólitos.

Tabela 17 – Composições químicas teórica e de publicações referentes ao Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga dos principais silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos.

Mineral	Teores (em % peso)			
	Betejtin (1970) ¹	Gaspar (1989) ²	Morbidelli <i>et al.</i> (1986) ³	
Flogopita	MgO	21,4 - 29,4	22 - 27	23,77 - 27,74
	SiO ₂	38,7 - 45	34 - 43	37,50 - 44,38
	FeO	< 9	1 - 3	2,24 - 10,21
	Al ₂ O ₃	10,8 - 17	11 - 20	7,10 - 16,63
	K ₂ O	7 - 10,3	4 - 10	7,74 - 9,68
	TiO ₂	-	-	< 1,67
Diopsídio	CaO	25,9	20 - 24	24,03 - 24,27
	MgO	18,5	10 - 16	12,55 - 13,17
	SiO ₂	55,6	48 - 54	44,83 - 46,10
	Fe ₂ O ₃	impureza	< 7	4,74 - 5,64
	Al ₂ O ₃	impureza	0,5 - 5	6,40 - 6,98
	TiO ₂	impureza	< 2	2,80 - 3,26
Forsterita	MgO	45 - 50	53	50,82 - 54,58
	SiO ₂	42	42	41,38 - 42,57
	FeO	8 - 12	4	2,89 - 6,38
Tremolita	CaO	13,8	9 - 12	3,44 - 12,69
	MgO	24,6	10 - 15	16,25 - 24,30
	SiO ₂	58,8	40 - 54	38,48 - 57,48
	FeO	< 3	-	< 5,47
	Fe ₂ O ₃	-	3 - 13	0,30 - 10,26
	Al ₂ O ₃	impureza	1 - 12	< 14,00
	K ₂ O	impureza	< 2	0,18 - 3,23
	TiO ₂	-	< 5	< 2,86

1- Composição química teórica.

2- Análises por microsonda eletrônica realizadas em: flogopita proveniente de zona de reação, diopsídio e tremolita provenientes de jacupiranguito e forsterita proveniente de dunito.

3- Análises por microsonda eletrônica realizadas em: flogopita, anfibólio e olivina provenientes da zona de reação e clinopiroxênio proveniente de jacupiranguito.

A flogopita, proveniente da zona de reação, apresenta Fe₂O₃ e Al₂O₃ em sua composição, com TiO₂, Na₂O e BaO podendo ou não estar presentes. O concentrado contendo as três variedades de flogopita apresenta valores mais elevados de Fe₂O₃ e menores de Al₂O₃, em comparação com o concentrado no qual ocorrem apenas flogopita castanha e verde; essas diferenças composicionais evidenciam a flogopita microcristalina laranja como a variedade mais ferrosa deste

mineral. Raramente observou-se zoneamento nos grãos, sendo este principalmente devido a variações de MgO e SiO₂ e presença/ausência de BaO.

Comparando as análises efetuadas neste trabalho com dados da literatura observaram-se discrepâncias nos teores de Al₂O₃, que nas amostras estudadas ocorreram em um intervalo mais amplo, e de TiO₂, não encontrado na composição teórica do mineral (outras referências citam o óxido como possível impureza, como indicado no item 6.3.1) porém ocorrendo em valores variados segundo Morbidelli *et al.* (1986).

O diopsídio apresentou Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ em sua composição, podendo ou não conter Na₂O. No diopsídio marrom, presente na zona de reação e no jacupiranguito, esses teores foram mais elevados que na variedade verde-clara, presente apenas no jacupiranguito e com valores maiores de CaO, MgO e SiO₂. As análises por MEV-EDS mostraram-se coerentes com dados da literatura referente ao Complexo, porém com variações principalmente de MgO e SiO₂ em relação à composição teórica.

A forsterita apresentou Fe₂O₃ em sua composição, com MnO podendo ou não estar presente em quantidades inferiores a 1%. Na composição química dos grãos de forsterita analisados em concentrado no qual ocorrem as três variedades de cor (incolor, preta e laranja) foram observados teores mais elevados de MgO e menores de Fe₂O₃ que os grãos em concentrado contendo apenas forsterita incolor e preta, evidenciando que há diferenças composicionais entre a forsterita laranja e as outras variedades. As análises realizadas mostraram valores coerentes com a literatura.

A tremolita, dentre os quatro silicatos detalhados, é o menos abundante nas Zonas de Xenólitos. A análise, realizada em concentrados provenientes da zona de reação, revelou Fe₂O₃, K₂O e Na₂O em sua composição, raramente estando ausentes Al₂O₃ e TiO₂. Em comparação com dados da literatura foi o mineral que mais apresentou diferenças nos valores dos óxidos, sendo as principais: menor variação de SiO₂, maiores valores de Al₂O₃ e menores de K₂O que a literatura referente ao Complexo, além de freqüentemente conter TiO₂, ausente na composição teórica (outras referências citam o óxido como possível impureza, como indicado no item 6.3.4).

Porém para Morbidelli *et al.* (1986) o anfibólio mais abundante na zona de reação foi richterita, classificado com base em microanálise, ao contrário da tremolita

identificada neste estudo por dados de microanálise, difratometria de raios X e propriedades físicas.

6.2 Individualização dos litotipos por catação

Dentre os objetivos da etapa de individualização dos litotipos por catação incluía-se analisar os seus comportamento e distribuição segundo a granulometria do produto da britagem industrial praticada na Mina de Cajati.

Os resultados da análise granulométrica são apresentados no gráfico da figura 11. Houve maior concentração em massa retida na fração 12,7 mm para todas as amostras, porém na amostra B-10F304/3 destaca-se também o material passante em 6,35 mm (cerca de 40% em massa).

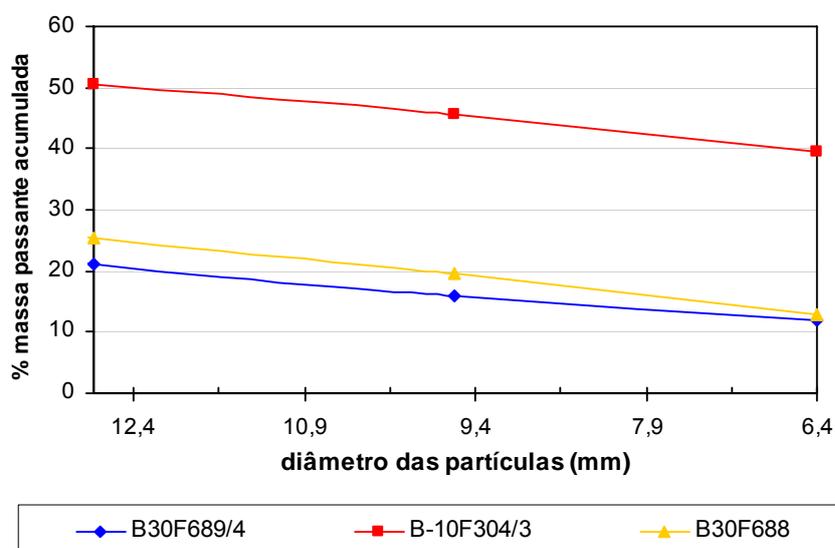


Figura 11 – Gráfico de distribuição em massa dos produtos da britagem secundária.

O balanço metalúrgico para os produtos dessa etapa de classificação granulométrica encontra-se na tabela 18.

O SiO_2 mostrou-se mais elevado na porção Leste das Zonas de Xenólitos que na Norte enquanto o comportamento oposto foi observado para P_2O_5 e CaO , evidenciando a maior abundância de jacupiranguito na XELeste; valores de MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 e K_2O foram similares entre as três amostras.

Tabela 18 – Balanço metalúrgico para a etapa de classificação granulométrica dos produtos da britagem secundária.

Fração (mm)	% em massa		Teores (%)										Distribuição na amostra (%)				
	ensaio	acumulada	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	PF	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
B30F689/4																	
-44,5+12,7	79,0	79,0	2,58	31,4	12,0	14,1	10,4	2,04	0,86	1,16	23,8	73,6	77,3	82,1	81,9	79,4	
-12,7+9,53	5,0	84,0	2,34	32,8	11,1	11,3	11,3	1,77	0,80	1,05	26,2	4,2	5,1	4,8	4,1	5,4	
-9,53+6,35	4,1	88,0	1,90	33,2	10,8	12,4	10,25	1,92	0,73	1,18	26,1	2,8	4,2	3,8	3,7	4,1	
-6,35	12,0	100,0	4,49	35,9	9,02	11,7	9,66	1,94	0,60	1,01	26,0	19,4	13,4	9,3	10,2	11,2	
Total calc.	100,0		2,77	32,1	11,6	13,6	10,3	2,01	0,82	1,14	24,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B-10F304/3																	
-44,5+12,7	49,4	49,4	2,80	32,8	10,2	12,2	10,5	1,76	0,76	1,17	25,5	40,2	49,4	49,9	43,6	50,2	
-12,7+9,53	4,9	54,3	2,68	33,5	10,1	12,4	9,03	1,68	0,54	1,17	24,8	3,8	5,0	4,9	4,4	4,2	
-9,53+6,35	6,1	60,4	2,59	33,8	10,5	12,2	8,53	1,68	0,61	1,02	25,7	4,6	6,3	6,3	5,4	5,0	
-6,35	39,6	100,0	4,48	32,7	9,94	16,3	10,6	2,30	0,48	1,38	18,5	51,4	39,3	38,9	46,6	40,5	
Total calc.	100,0		3,45	32,8	10,1	13,8	10,4	1,96	0,63	1,25	22,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B30F688																	
-44,5+12,7	74,6	74,6	1,75	28,2	11,7	19,1	13,3	2,62	0,90	1,91	19,0	67,4	72,9	75,5	77,5	77,6	
-12,7+9,53	5,9	80,5	2,00	31,6	10,6	15,1	11,5	2,17	0,71	1,58	23,3	6,1	6,5	5,4	4,9	5,3	
-9,53+6,35	6,5	87,0	2,06	30,7	11,5	15,0	11,3	2,03	0,87	1,44	23,4	6,9	6,9	6,5	5,3	5,7	
-6,35	13,0	100,0	2,91	30,5	11,1	17,5	11,2	2,40	0,85	1,61	30,6	19,6	13,7	12,6	12,3	11,4	
Total calc.	100,0		1,93	28,9	11,5	18,4	12,8	2,52	0,88	1,82	21,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Ao longo do intervalo granulométrico os óxidos não apresentaram comportamento definido e a variação dos teores foi pequena, com exceção do P₂O₅, com valores mais elevados no material passante em 6,35 mm e concentrando nesse material até 20% do P₂O₅ total, sendo 51% para a amostra B-10F304/3 devido à massa desta fração. Por outro lado a fração carregou menos de 12% do SiO₂ total do minério, exceção novamente à amostra B-10F304/3, na qual atinge 45%.

Os resultados das análises químicas estão expostos na figura 12, onde se encontram os gráficos de distribuição acumulada dos principais teores analisados para as frações granulométricas. As curvas de valores acumulados se mostraram semelhantes entre os óxidos, com conteúdos superiores a 70% acima de 12,7 mm para as amostras B30F689/4 e B30F688 enquanto na B-10F304/3 foram inferiores a 50%.

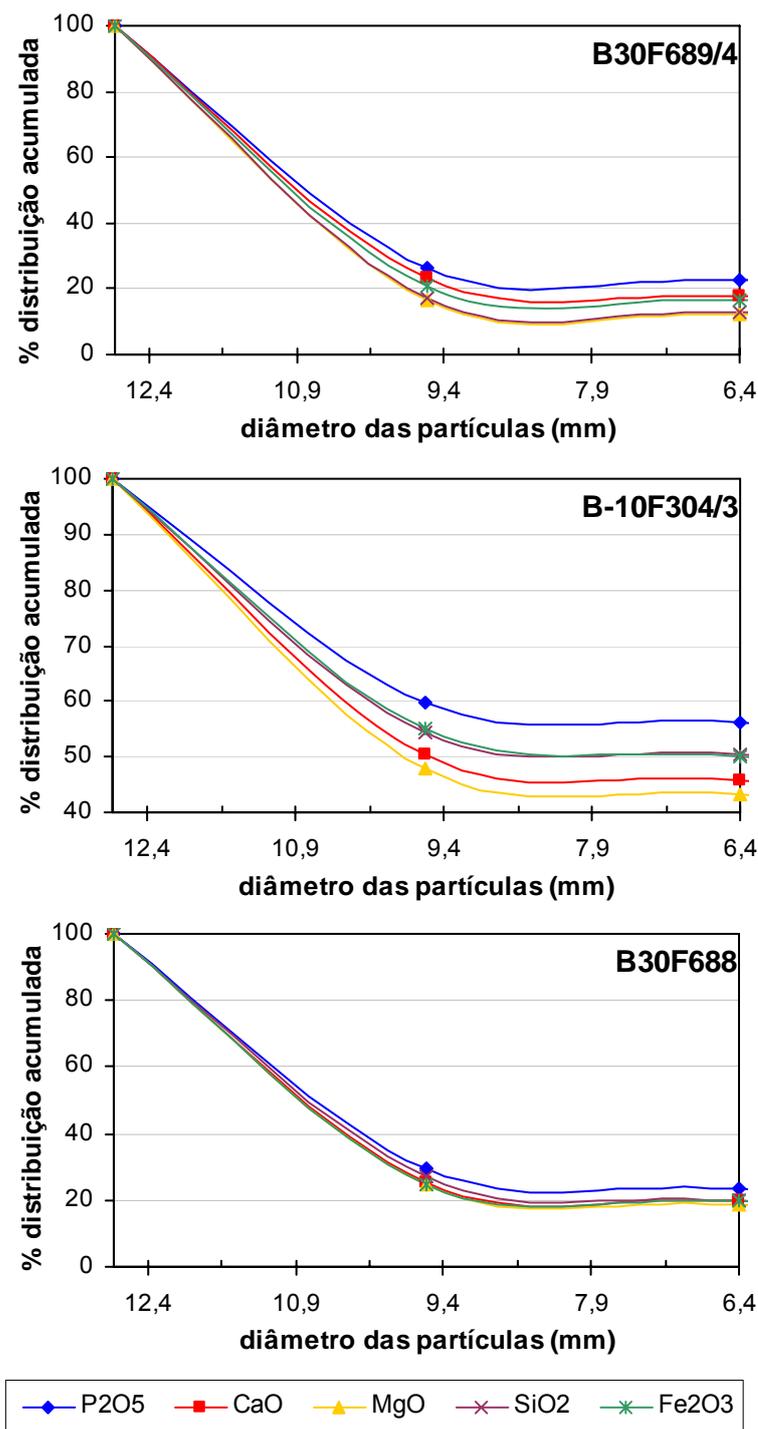


Figura 12 – Distribuição acumulada dos principais teores analisados nos produtos da britagem secundária.

As proporções em massa dos litotipos individualizados por catação para as frações acima de 6,35 mm são representadas nos gráficos da figura 13. Verificaram-se diferenças nessas proporções para as amostras estudadas, porém sempre com o predomínio de carbonatito sobre os outros litotipos. Para as três frações granulométricas observou-se que em geral a zona de reação apresentou maior

porcentagem em massa na fração mais grossa (-44,5+12,7 mm), com o oposto ocorrendo para o carbonatito e em menor escala para o jacupiranguito.

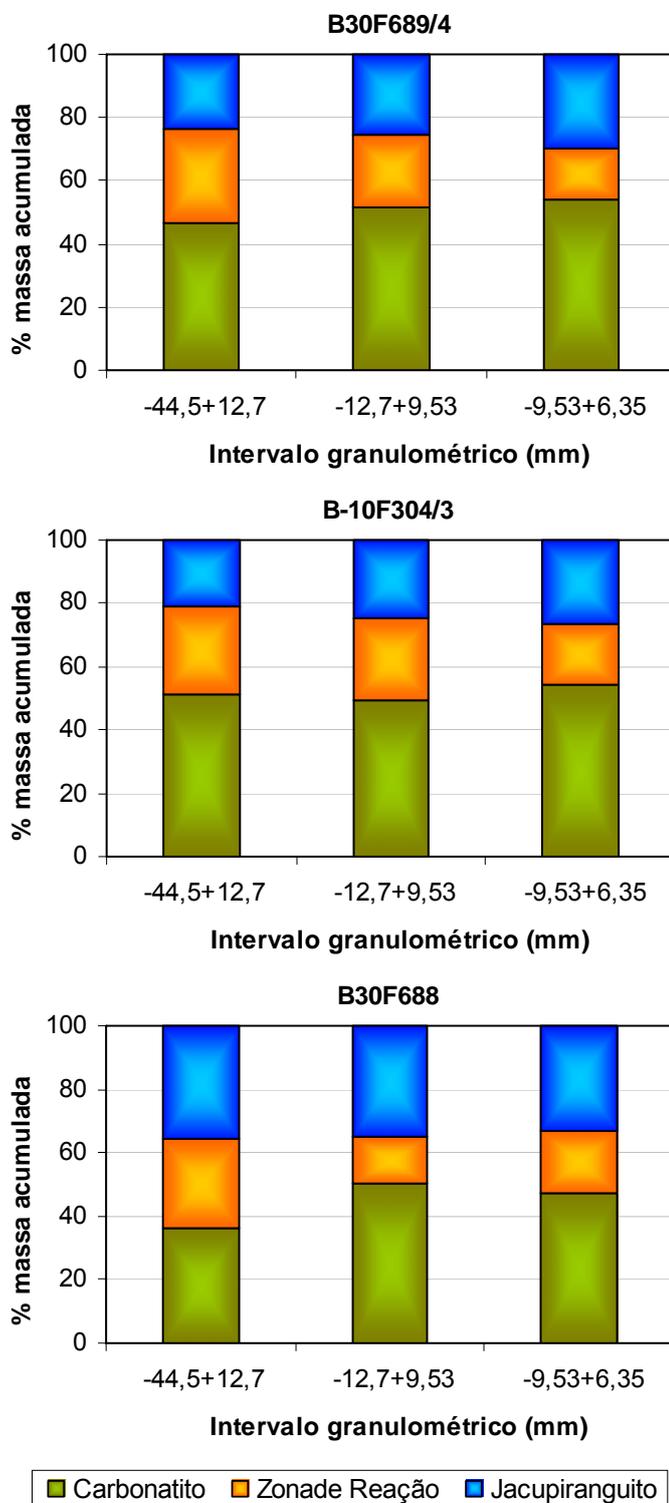


Figura 13 – Proporção em massa dos litotipos individualizados por catação para as frações acima de 6,35 mm.

A amostra B30F688, correspondente à porção Leste da unidade, apresentou maior porcentagem de jacupiranguito (cerca de 35%) e maior variabilidade na distribuição dos litotipos entre as frações granulométricas.

O balanço metalúrgico para os produtos gerados nessa etapa encontra-se na tabela 19. Os teores de P_2O_5 no carbonatito e na zona de reação foram em geral próximos ao teor de corte da Mina e evidenciaram mineralização de fluorapatita nesses litotipos, muitas vezes com a zona de reação apresentando valores mais elevados que o carbonatito. Valores de P_2O_5 no jacupiranguito foram em geral inferiores a 1%, evidenciando pequena quantidade de fluorapatita no litotipo.

Tabela 19 – Balanço metalúrgico para a etapa de individualização dos litotipos por catação para as frações acima de 6,35 mm.

Fração (mm)	Litologia	% em massa		Teores (%)										Distribuição no ensaio (%)				
		ensaio	amostra	P_2O_5	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	PF	P_2O_5	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
B30F689/4																		
-44,5+12,7	Carbonatito	46,6	36,8	2,86	47,9	4,31	0,26	2,94	0,07	-	0,11	39,7	51,7	71,0	16,7	0,9	13,2	
	Zona de Reação	29,5	23,3	3,07	18,1	18,5	21,1	16,5	3,31	2,10	1,75	14,2	35,2	17,0	45,5	44,1	46,9	
	Jacupiranguito	23,9	18,9	1,42	15,7	19,0	32,5	17,4	4,31	1,00	2,48	4,68	13,2	12,0	37,8	55,0	40,0	
	Total calc.	100,0	79,0	2,58	31,4	12,0	14,1	10,4	2,04	0,86	1,16	23,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-12,7+9,53	Carbonatito	51,6	2,56	2,48	48,2	4,22	0,34	2,73	0,11	0,03	0,05	40,3	54,7	75,9	19,6	1,5	12,4	
	Zona de Reação	22,9	1,14	3,71	22,0	17,9	18,3	13,3	2,63	2,13	0,95	18,2	36,3	15,4	36,9	36,9	26,9	
	Jacupiranguito	25,4	1,26	0,83	11,2	19,0	27,4	27,0	4,35	1,17	3,18	5,07	9,0	8,67	43,5	61,5	60,6	
	Total calc.	100,0	4,95	2,34	32,8	11,1	11,3	11,3	1,77	0,80	1,05	26,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-9,53+6,35	Carbonatito	53,8	2,20	2,16	48,1	4,39	0,38	2,37	0,09	-	0,10	40,9	61,1	77,9	21,9	1,6	12,4	
	Zona de Reação	16,6	0,68	2,78	18,7	17,1	19,3	18,1	3,22	2,19	1,87	15,2	24,3	9,4	26,3	25,8	29,3	
	Jacupiranguito	29,6	1,21	0,94	14,3	18,8	30,5	20,2	4,50	1,25	2,74	5,47	14,7	12,8	51,7	72,6	58,3	
	Total calc.	100,0	4,09	1,90	33,2	10,8	12,4	10,25	1,92	0,73	1,18	26,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B-10F304/3																		
-44,5+12,7	Carbonatito	51,2	25,3	3,52	45,4	4,25	0,82	7,11	0,11	-	0,19	38,3	64,3	70,8	21,3	3,4	34,5	
	Zona de Reação	28,1	13,9	2,92	21,0	17,3	19,0	11,7	2,79	2,14	1,46	17,7	29,3	18,0	47,5	43,8	31,2	
	Jacupiranguito	20,8	10,3	0,87	17,7	15,3	31,0	17,4	4,43	0,76	3,21	4,34	6,4	11,2	31,2	52,8	34,3	
	Total calc.	100,0	49,4	2,80	32,8	10,2	12,2	10,5	1,76	0,76	1,17	25,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-12,7+9,53	Carbonatito	49,3	2,41	3,67	46,6	4,86	0,83	3,18	0,07	-	0,12	38,6	67,6	68,6	23,7	3,3	17,4	
	Zona de Reação	26,2	1,28	2,87	22,7	14,6	16,9	14,2	2,51	1,62	1,51	17,3	28,1	17,8	37,8	35,7	41,1	
	Jacupiranguito	24,5	1,19	0,47	18,6	15,9	30,9	15,4	4,04	0,49	2,93	4,86	4,3	13,6	38,5	61,0	41,6	
	Total calc.	100,0	4,88	2,68	33,5	10,1	12,4	9,03	1,68	0,54	1,17	24,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-9,53+6,35	Carbonatito	54,0	3,30	2,94	46,4	4,82	0,74	2,97	0,08	-	0,05	38,9	61,2	74,2	24,8	3,3	18,8	
	Zona de Reação	19,5	1,19	3,34	21,7	17,2	18,0	14,3	2,49	1,80	1,34	17,5	25,1	12,5	31,9	28,6	32,6	
	Jacupiranguito	26,5	1,62	1,34	16,9	17,1	31,4	15,7	4,36	0,98	2,76	5,06	13,7	13,3	43,3	68,1	48,6	
	Total calc.	100,0	6,11	2,59	33,8	10,5	12,2	8,53	1,68	0,61	1,02	25,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B30F688																		
-44,5+12,7	Carbonatito	36,4	27,2	2,35	45,5	5,46	1,27	4,34	0,07	0,07	0,18	39,1	49,1	58,7	17,0	2,4	11,9	
	Zona de Reação	27,8	20,7	2,71	19,4	17,4	22,1	14,4	3,07	2,45	1,94	14,8	43,2	19,1	41,5	32,1	30,0	
	Jacupiranguito	35,8	26,7	0,38	17,4	13,5	35,0	21,6	4,86	0,54	3,65	1,86	7,8	22,1	41,4	65,5	58,1	
	Total calc.	100,0	74,6	1,75	28,2	11,7	19,1	13,3	2,62	0,90	1,91	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-12,7+9,53	Carbonatito	50,3	2,98	2,66	45,2	6,04	0,71	3,92	0,05	0,08	0,14	39,6	67,0	72,0	28,8	2,4	17,2	
	Zona de Reação	14,6	0,87	2,96	19,0	18,3	21,6	13,8	2,96	2,44	1,99	14,9	21,7	8,80	25,3	21,0	17,5	
	Jacupiranguito	35,1	2,08	0,65	17,3	13,8	32,9	21,4	4,88	0,89	3,49	3,32	11,4	19,2	45,9	76,6	65,3	
	Total calc.	100,0	5,93	2,00	31,6	10,6	15,1	11,5	2,17	0,71	1,58	23,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
-9,53+6,35	Carbonatito	47,5	3,09	2,87	45,4	6,25	1,78	2,29	0,09	0,12	0,05	39,4	66,3	70,2	25,9	5,6	9,6	
	Zona de Reação	19,3	1,26	2,28	20,5	17,4	19,5	13,7	2,89	2,69	1,78	17,3	21,5	12,9	29,3	25,2	23,4	
	Jacupiranguito	33,2	2,16	0,76	15,6	15,5	31,2	22,7	4,30	0,94	3,23	4,06	12,3	16,9	44,8	69,1	66,9	
	Total calc.	100,0	6,51	2,06	30,7	11,5	15,0	11,3	2,03	0,87	1,44	23,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

Os teores de CaO e MgO no carbonatito, correspondentes a carbonatos, foram, respectivamente, o maior e menor apresentados pelo litotipo. Esses valores na zona de reação e no jacupiranguito foram da mesma ordem de grandeza, com o MgO presente em todos os minerais silicáticos identificados e o CaO no diopsídio e na tremolita, além dos carbonatos.

Os teores de SiO₂ foram mais elevados no jacupiranguito, seguidos da zona de reação, correspondendo principalmente a diopsídio e forsterita no primeiro litotipo e flogopita e fosterita no segundo. No carbonatito foram inferiores a 0,5%, evidenciando pequena porcentagem de silicatos (flogopita e forsterita) no litotipo.

O Fe₂O₃ apresentou teores menores nos carbonatitos e maiores no jacupiranguito, corresponde principalmente à magnetita, uma vez que esteve presente em pequenas quantidades nos silicatos, como verificado pelas análises por MEV-EDS.

Os teores de Al₂O₃ foram expressivos na zona de reação e no jacupiranguito, estando presentes na composição da flogopita, diopsídio e tremolita. O K₂O, constituinte da flogopita e também presente em pequenas quantidades na tremolita, foi importante apenas na zona de reação, litotipo no qual estes minerais foram mais abundantes. O TiO₂ foi mais elevado no jacupiranguito e correspondeu à magnetita e à ilmenita.

Acima de 50% do P₂O₅ associou-se ao carbonatito e um conteúdo significativo à zona de reação (21 a 43%), com 4 a 13% no jacupiranguito estéril. Já o SiO₂ apresentou-se com conteúdos superiores a 50% no jacupiranguito e inferiores a 6% no carbonatito, variando amplamente para a zona de reação (25 a 52%).

6.2.1 Consolidação da individualização de litotipos

As características mineralógicas dos três litotipos componentes das Zonas de Xenólitos são:

- ✓ carbonatito- assim como as diversas unidades carbonatíticas que ocorrem no Complexo Ultramáfico-Alcalino de Jacupiranga, é composto essencialmente por carbonatos (principalmente calcita e

subordinadamente dolomita), além de magnetita, fluorapatita, flogopita e traços de forsterita e sulfetos (Brumatti, 2004);

- ✓ jacupiranguito- rocha encaixante das intrusões carbonatíticas, trata-se de um magnetita-clinopiroxenito constituído principalmente por diopsídio marrom e verde-claro, contendo também forsterita incolor e preta, magnetita, flogopita castanha e verde, tremolita, pequenas quantidades de ilmenita, clinocrisotila, carbonatos, fluorapatita, forsterita laranja e traços de sulfetos;
- ✓ zona de reação- formada pela interação dos litotipos anteriores, constitui-se em grande parte por carbonatos (principalmente calcita e subordinadamente dolomita, assim como no carbonatito) e flogopita castanha e verde, seguidos de forsterita incolor e preta. Ocorrem ainda diopsídio marrom, tremolita, magnetita, fluorapatita, flogopita microcristalina laranja, forsterita laranja, clinocrisotila, ilmenita e traços de sulfetos.

A distribuição desses litotipos nas amostras estudadas foi variável e evidencia a heterogeneidade das Zonas de Xenólitos, porém com o carbonatito sempre predominando. Na XENorte a zona de reação foi o segundo litotipo em abundância, porém na XELeste foi o jacupiranguito, presente em uma proporção próxima à do carbonatito.

Os litotipos também apresentaram distribuição diferenciada em relação à granulometria após a britagem secundária: as proporções de carbonatito e jacupiranguito foram mais elevadas para as frações mais finas, em oposição à zona de reação. Destaca-se na britagem secundária a elevada porcentagem de fluorapatita associada aos finos (abaixo de 6,35 mm), com teores de P_2O_5 acima de 4% para a XENorte.

As análises químicas apresentadas na tabela 20 refletiram a mineralogia identificada. Os valores correspondem à fração -44,5+12,7 mm, que mostrou maior representatividade em massa e dos litotipos.

No carbonatito os elevados teores de CaO evidenciam o predomínio de calcita no litotipo e, associado aos expressivos valores de MgO e P_2O_5 , a presença de dolomita e fluorapatita, enquanto o Fe_2O_3 corresponde à magnetita. Os baixos teores de SiO_2 e K_2O mostram a pequena quantidade de flogopita presente.

Tabela 20 – Composição química dos litotipos constituintes das Zonas de Xenólitos (fração -44,5+12,7 mm).

Teores (%)	Litotipo		
	Carbonatito (36,4 - 51,2% em massa)	Zona de reação (27,8 - 29,5% em massa)	Jacupiranguito (20,8 - 35,8% em massa)
P₂O₅	2,35 - 3,52	2,71 - 3,07	0,38 - 1,42
CaO	45,4 - 47,9	18,1 - 21,0	15,7 - 17,7
MgO	4,25 - 5,46	17,3 - 18,5	13,5 - 19,0
SiO₂	0,26 - 1,27	19,0 - 22,1	31,0 - 35,0
Fe₂O₃	2,94 - 7,11	11,7 - 16,5	17,4 - 21,6
Al₂O₃	0,07 - 0,11	2,79 - 3,31	4,31 - 4,86
K₂O	nd - 0,07	2,10 - 2,45	0,54 - 1,00
TiO₂	0,11 - 0,19	1,46 - 1,94	2,48 - 3,65
Distribuição de P₂O₅ (%)	49,1 - 64,3	29,3 - 43,2	6,4 - 7,2
Distribuição de SiO₂ (%)	0,9 - 3,4	32,1 - 44,1	52,8 - 65,5

Nota: nd- abaixo do limite de detecção.

Na zona de reação os teores de CaO, MgO e SiO₂ mostram-se similares, evidenciando a presença em grande quantidade de silicatos magnesianos, principalmente forsterita e flogopita, e a ocorrência do CaO em outros minerais além de carbonatos e fluorapatita, como diopsídio e tremolita; a abundância de flogopita nesse litotipo também é mostrada pelos teores de K₂O significativamente elevados. Teores de P₂O₅ evidenciam a presença de fluorapatita em quantidade expressiva. O Fe₂O₃ não corresponde apenas à magnetita e, assim como o Al₂O₃, está presente na composição química dos diversos silicatos.

No jacupiranguito os óxidos estão associados principalmente aos silicatos, com exceção do TiO₂ que corresponde principalmente à magnetita e à ilmenita; baixos valores de P₂O₅ e K₂O revelaram pequenas quantidades de fluorapatita e flogopita, respectivamente.

Os teores de P₂O₅ no carbonatito e na zona de reação são similares e próximos ao teor de corte da Mina e, apesar da distribuição do óxido ser principalmente no primeiro litotipo, a zona de reação também contribui para a mineralização de fluorapatita das Zonas de Xenólitos, porém o litotipo apresenta pequena espessura na unidade e íntima relação espacial com o jacupiranguito estéril.

As distribuições de SiO₂ mostram predominante concentração de silicatos no jacupiranguito, porém a zona de reação também comporta parcela importante desses minerais.

6.3 Caracterização tecnológica

6.3.1 Análises granuloquímicas

6.3.1.1 Amostras totais

As amostras de frente de lavra, denominadas de *amostras totais*, moídas abaixo de 0,833 mm e desmagnetizadas apresentaram a distribuição em massa passante ilustrada no gráfico da figura 14. O comportamento delas quanto à moagem foi bastante similar, inclusive quando comparado ao de um carbonatito típico, porém a amostra B-10F304/3, assim como no produto da britagem secundária, apresentou maior concentração em massa nos finos que as outras amostras, variando de 52 a 60% passante em 0,147 mm.

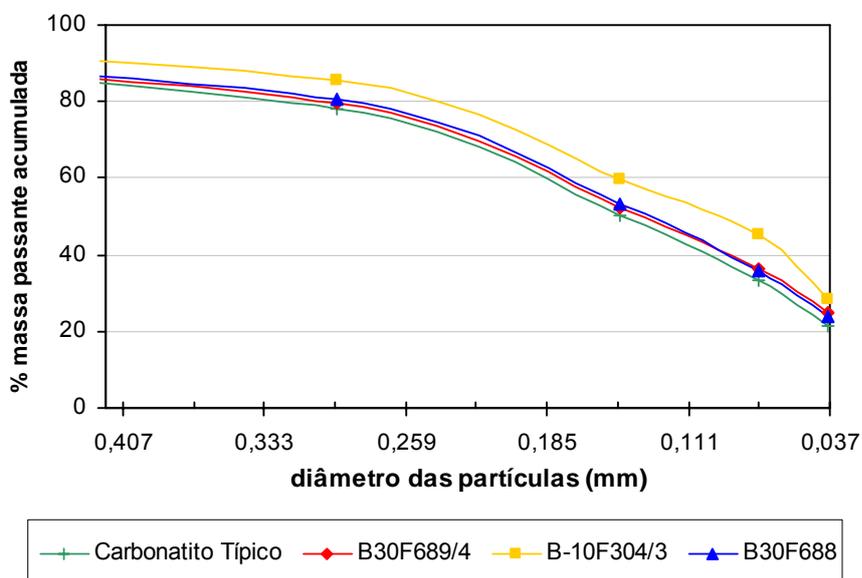


Figura 14 – Amostras totais. Distribuição em massa na classificação granulométrica do produto de moagem abaixo de 0,833 mm.

A tabela 21 apresenta o balanço metalúrgico para os produtos da “desmagnetização” e da classificação granulométrica.

Tabela 21 – Amostras totais. Balanço metalúrgico para as etapas de “desmagnetização” e classificação granulométrica após moagem abaixo de 0,833 mm.

Fração (mm)	% em massa		Teores (%)										Distribuição na amostra (%)				
	retida	acumulada	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	PF	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
B30F689/4																	
Magnético	9,3	9,3	0,33	2,21	5,30	4,00	74,7	2,24	0,14	5,17	2,49	1,0	0,6	4,7	2,8	70,7	
-0,833+0,295	20,3	29,7	1,52	32,9	12,1	19,3	3,81	2,93	1,13	0,87	24,6	9,8	20,0	23,6	29,2	7,9	
-0,295+0,147	27,5	57,2	3,90	38,6	10,2	13,6	2,78	1,64	0,43	0,68	27,2	33,9	31,8	26,8	27,8	7,8	
-0,147+0,074	15,7	72,9	4,88	37,5	11,1	13,1	2,85	1,52	0,49	0,70	26,9	24,2	17,6	16,6	15,3	4,5	
-0,074+0,037	11,6	84,4	4,29	36,0	12,0	13,7	3,04	1,67	0,68	0,86	26,7	15,7	12,5	13,3	11,8	3,6	
-0,037	15,6	100,0	3,13	37,2	10,1	11,2	3,53	1,65	0,70	0,88	30,1	15,4	17,4	15,1	13,0	5,6	
Total calc.	100,0		3,16	33,4	10,5	13,4	9,85	1,94	0,63	1,19	24,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B-10F304/3																	
Magnético	8,6	8,6	0,28	4,01	6,11	7,21	72,5	2,02	0,18	4,96	0,00	0,7	1,0	4,9	4,1	66,7	
-0,833+0,295	14,5	23,1	2,18	33,6	11,4	20,2	4,03	2,71	0,75	1,07	22,7	8,8	14,8	15,6	19,4	6,3	
-0,295+0,147	25,7	48,8	4,05	37,1	10,4	15,6	3,13	1,88	0,37	0,85	24,7	28,9	28,8	25,1	26,5	8,7	
-0,147+0,074	14,5	63,3	5,01	36,4	11,4	15,3	2,94	1,88	0,54	0,83	24,3	20,2	16,0	15,6	14,7	4,6	
-0,074+0,037	17,1	80,4	4,83	35,2	12,2	15,8	3,19	2,07	0,75	1,01	23,8	23,0	18,2	19,6	17,8	5,9	
-0,037	19,6	100,0	3,39	35,9	10,4	13,5	3,71	1,97	0,77	0,89	28,0	18,4	21,2	19,2	17,5	7,8	
Total calc.	100,0		3,60	33,1	10,6	15,1	9,29	2,06	0,58	1,27	22,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B30F688																	
Magnético	9,9	9,9	0,36	4,53	6,89	8,39	68,7	2,14	0,38	5,59	0,84	1,3	1,5	5,6	4,8	66,8	
-0,833+0,295	19,2	29,0	1,77	30,4	13,5	23,1	4,44	2,95	1,04	1,14	20,7	12,6	19,3	21,3	25,6	8,4	
-0,295+0,147	27,6	56,7	2,98	34,2	12,4	18,1	3,50	2,11	0,62	1,00	24,3	30,5	31,2	28,1	28,9	9,5	
-0,147+0,074	17,4	74,1	3,81	33,4	13,0	17,4	3,42	2,11	0,82	1,02	24,0	24,6	19,3	18,7	17,6	5,9	
-0,074+0,037	12,1	86,2	3,68	32,9	13,4	16,8	3,44	2,19	1,06	1,15	24,1	16,5	13,1	13,3	11,8	4,1	
-0,037	13,8	100,0	2,82	34,2	11,5	14,1	3,98	1,97	0,91	1,08	28,2	14,5	15,7	13,0	11,3	5,4	
Total calc.	100,0		2,70	30,2	12,2	17,3	10,2	2,26	0,80	1,51	21,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

O produto magnético, gerado na etapa de “desmagnetização” após moagem em laboratório, o qual é constituído essencialmente por magnetita, correspondeu a cerca de 9% em massa com 0,7 a 1,3% de P₂O₅ associado, mostrando boa liberação da fluorapatita em relação à magnetita.

Ao longo do intervalo granulométrico os teores de P₂O₅ foram maiores para os finos, principalmente entre 0,147 e 0,037 mm. Já os teores de SiO₂ foram mais elevados em -0,833+0,295 mm e os teores de MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃ e K₂O, apesar de não apresentarem variações significativas entre as faixas granulométricas, foram um pouco maiores nessa fração, evidenciando sua associação com os silicatos.

Cerca de 29 a 34% do P₂O₅ total da amostra permaneceu contido na fração -0,295+0,147 mm, intervalo granulométrico de elevado grau de liberação da fluorapatita e selecionado para a realização dos ensaios de separação mineral. A porcentagem associada aos finos, abaixo de 0,037 mm, variou de 15 a 18%, superior à fração grossa -0,833+0,295 mm (9 a 13%).

O SiO₂ também se concentrou em -0,295+0,147 mm (27 a 29% do total da amostra), porém, ao contrário do P₂O₅, seu conteúdo na fração grossa também foi elevado, variando de 19 a 29%.

Na figura 15 se encontram os gráficos de distribuição acumulada dos principais óxidos analisados para as frações granulométricas.

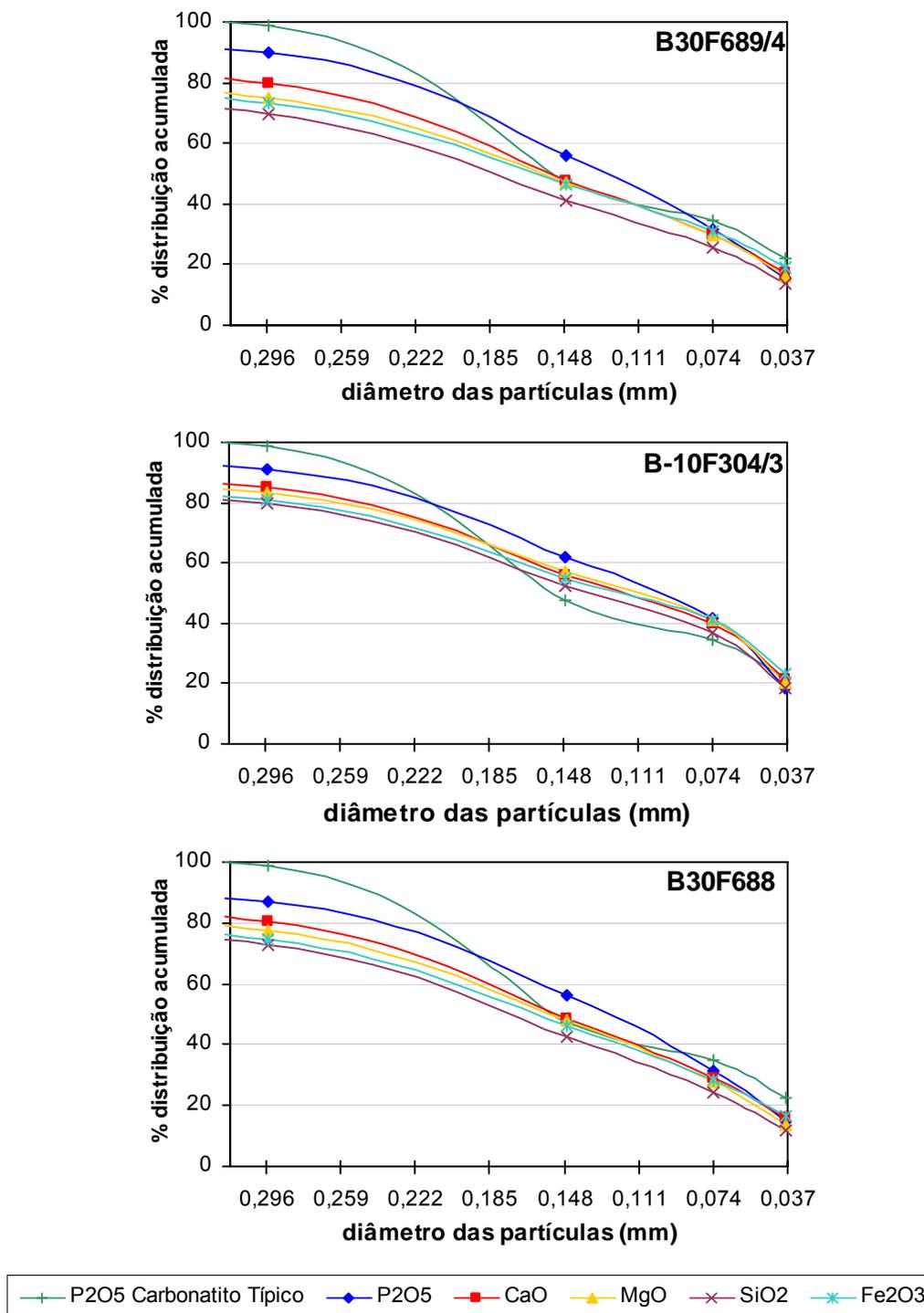


Figura 15 – Amostras totais. Distribuição acumulada dos teores na classificação granulométrica do produto de moagem abaixo de 0,833 mm.

A principal diferença nas curvas de valores acumulados foi entre SiO_2 e P_2O_5 , com conteúdos de 10-13% e 20-30% acima de 0,295 mm, respectivamente; CaO , MgO e Fe_2O_3 apresentaram distribuições similares, porém mais próximas à do SiO_2 , mostrando a relação desses óxidos com os silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos. Em comparação a um carbonatito típico a distribuição de P_2O_5 das amostras totais se mostrou em geral com conteúdos menores nas frações - 0,295+0,147 mm e -0,037 mm, sendo maiores entre 0,147 e 0,037 mm.

6.3.1.2 Amostras de catação

As amostras de catação corresponderam a dois litotipos constituintes das Zonas de Xenólitos obtidos na etapa de *individualização dos litotipos por catação* (como indicado no item 5.2) e foram representadas pelas letras ZR (zona de reação) e J (jacupiranguito) ao final de seu nome. Elas foram geradas a partir da fração -44,5+12,7 mm, devido à sua maior representatividade em massa e dos litotipos, principalmente da zona de reação.

As amostras, moídas abaixo de 0,833 mm e desmagnetizadas, na classificação granulométrica apresentaram a distribuição em massa acumulada passante indicada no gráfico da figura 16. O comportamento das amostras de catação quanto à moagem foi bastante similar, com a B-10F304/3-ZR apresentando concentração em massa nos finos maior que as outras. Quando comparadas às totais e a um carbonatito típico, as amostras de catação mostraram porcentagem de finos um pouco maior, variando de 54 a 61% passante em 0,147 mm.

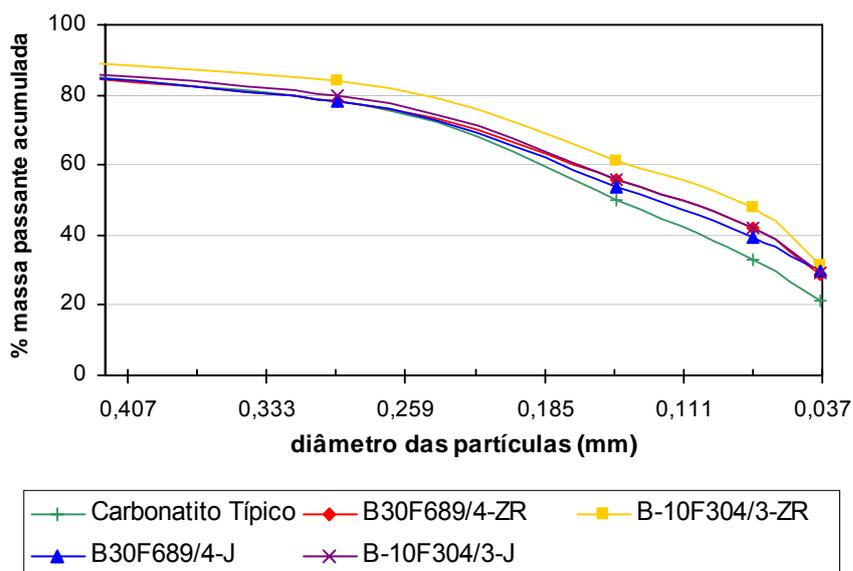


Figura 16 – Amostras de catação. Distribuição em massa na classificação granulométrica no produto de moagem abaixo de 0,833 mm.

A tabela 22 apresenta o balanço metalúrgico para os produtos da “desmagnetização” e da classificação granulométrica. Os teores de P_2O_5 e K_2O foram mais elevados nas amostras de zona de reação que nas de jacupiranguito enquanto o oposto ocorreu com os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 , relacionados à maior abundância de fluorapatita e flogopita na zona de reação em contraste com o predomínio de silicatos (principalmente diopsídio e forsterita), magnetita e ilmenita no jacupiranguito. CaO e MgO mostraram-se com valores semelhantes para os dois litotipos.

O produto magnético das amostras de zona de reação correspondeu de 10 a 12% em massa com 1,4 a 1,7% de P_2O_5 total, semelhante às amostras totais. Já nas de jacupiranguito este produto correspondeu a cerca de 18% em massa com P_2O_5 associado variando de 2,8 a 6,2%, evidenciando maior porcentagem de magnetita nesse litotipo com conseqüente maior perda de fluorapatita nessa etapa de separação mineral.

Tabela 22 – Amostras de catação. Balanço metalúrgico para as etapas de “desmagnetização” e classificação granulométrica após moagem abaixo de 0,833 mm.

Fração (mm)	% em massa		Teores (%)										Distribuição na amostra (%)				
	retida	acumulada	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	PF	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	
B30F689/4-ZR																	
Magnético	12,8	12,8	0,33	2,19	7,09	5,78	74,9	1,56	0,51	3,94	0,28	1,4	1,4	4,9	3,5	70,8	
-0,833+0,295	22,1	34,8	1,96	17,3	21,5	28,4	5,33	4,43	3,04	1,20	15,0	14,1	19,2	25,9	29,9	8,7	
-0,295+0,147	22,0	56,8	4,31	24,4	20,2	21,0	3,92	2,62	1,86	1,12	18,8	30,9	27,0	24,1	22,1	6,4	
-0,147+0,074	14,0	70,9	3,36	25,0	19,2	21,3	3,96	2,84	1,92	1,06	20,1	15,4	17,6	14,7	14,3	4,1	
-0,074+0,037	13,3	84,1	4,73	23,5	20,7	21,8	4,27	2,80	2,06	1,27	17,5	20,4	15,7	14,9	13,8	4,2	
-0,037	15,9	100,0	3,44	23,9	17,9	21,6	4,98	3,00	2,09	1,28	20,2	17,8	19,1	15,4	16,4	5,8	
Total calc.	100,0		3,07	19,9	18,4	20,9	13,5	3,00	2,02	1,53	15,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B-10F304/3-ZR																	
Magnético	9,7	9,7	0,51	2,88	6,72	6,01	73,2	1,26	0,67	4,11	0,61	1,7	1,3	3,7	2,9	62,3	
-0,833+0,295	15,8	25,5	1,77	20,5	19,4	24,9	5,50	3,61	2,65	1,21	18,4	9,6	15,0	17,3	20,0	7,7	
-0,295+0,147	23,2	48,7	3,15	25,6	18,7	19,6	4,43	2,45	1,76	1,05	21,3	25,0	27,5	24,5	23,0	9,0	
-0,147+0,074	12,9	61,6	3,96	24,6	19,5	20,3	4,11	2,77	1,99	1,15	19,4	17,5	14,7	14,3	13,3	4,7	
-0,074+0,037	16,9	78,5	4,19	22,9	19,8	21,2	4,50	3,15	2,32	1,53	18,2	24,2	17,9	18,9	18,1	6,7	
-0,037	21,5	100,0	2,99	23,7	17,5	20,8	5,09	3,19	2,41	1,30	21,0	22,0	23,6	21,3	22,7	9,6	
Total calc.	100,0		2,92	21,6	17,7	19,7	11,4	2,84	2,06	1,52	18,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B30F689/4-J																	
Magnético	18,4	18,4	0,48	2,95	7,03	6,34	70,6	3,23	0,23	6,28	0,00	6,2	3,5	7,1	3,8	70,2	
-0,833+0,295	21,9	40,4	0,95	18,0	19,9	39,8	7,11	5,18	1,31	1,78	3,94	14,7	25,1	24,0	28,1	8,4	
-0,295+0,147	24,6	64,9	1,48	19,6	19,9	37,3	6,76	4,40	0,93	1,76	5,49	25,6	30,5	26,8	29,5	8,9	
-0,147+0,074	13,9	78,8	1,75	18,5	22,0	36,2	6,42	3,98	0,94	1,68	6,25	17,1	16,4	16,8	16,2	4,8	
-0,074+0,037	9,6	88,4	2,55	17,7	23,2	34,8	6,14	3,92	1,22	1,80	7,07	17,3	10,8	12,3	10,8	3,2	
-0,037	11,6	100,0	2,34	18,7	20,4	31,3	7,18	4,30	1,37	2,01	10,6	19,1	13,7	13,0	11,7	4,5	
Total calc.	100,0		1,42	15,7	18,2	31,1	18,5	4,24	0,96	2,62	4,99	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
B-10F304/3-J																	
Magnético	17,5	17,5	0,14	5,98	6,93	12,0	62,4	3,44	0,06	7,22	0,00	2,8	5,6	7,8	6,3	66,4	
-0,833+0,295	20,0	37,5	0,38	21,8	16,6	42,0	7,31	5,58	0,66	2,50	3,91	8,8	23,5	21,3	25,3	8,9	
-0,295+0,147	23,9	61,5	0,55	22,0	16,6	39,5	6,52	5,03	0,54	2,37	5,45	15,2	28,4	25,5	28,4	9,5	
-0,147+0,074	13,8	75,2	1,19	21,1	18,4	36,0	6,11	4,48	0,66	2,22	5,92	18,9	15,6	16,2	14,9	5,1	
-0,074+0,037	12,9	88,1	1,98	20,5	19,3	35,0	6,10	4,42	1,03	2,33	6,76	29,3	14,2	15,9	13,5	4,8	
-0,037	11,9	100,0	1,83	19,9	17,4	32,2	7,36	5,07	1,43	2,34	10,4	25,0	12,7	13,3	11,5	5,3	
Total calc.	100,0		0,87	18,6	15,6	33,3	16,4	4,71	0,67	3,21	5,01	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	

O comportamento dos principais teores ao longo do intervalo granulométrico das amostras de zona de reação foi semelhante às totais, com P₂O₅ mais elevado para os finos (principalmente entre 0,147 e 0,037 mm) e SiO₂ maior em -0,833+0,295 mm, associado a MgO, Fe₂O₃ e Al₂O₃ e K₂O. Já nas de jacupiranguito os teores de K₂O foram mais elevados em -0,037 mm, evidenciando concentração de flogopita para os finos, e de MgO em -0,074+0,037 mm, mostrando nesse litotipo maior relação do óxido com outras espécies minerais; teores de Fe₂O₃ apresentaram pouca variação na granulometria.

A distribuição de P₂O₅ foi muito variável entre as amostras de catação, em geral com maior conteúdo na fração -0,295+0,147 mm (25 a 31% do total para a zona de reação e 15 a 26% do total para o jacupiranguito), assim como entre as totais, e com porcentagem semelhante a essas de P₂O₅ associado à fração grossa -0,833+0,295 mm (9 a 15%). Já para os finos os conteúdos foram mais elevados, variando de 18 a 25% abaixo de 0,037 mm.

O maior conteúdo de SiO_2 em geral também se associou à fração $-0,295+0,147$ mm (cerca de 23% para amostras de zonas de reação e 29% para as de jacupiranguito), porém com porcentagem elevada na fração grossa, variando de 20 a 30% do total. Assim como para as amostras totais, esse comportamento diferente na cominuição entre silicatos e fluorapatita refletiu a baixa associação entre os minerais, porém nas amostras de catação essa diferença na classificação granulometria foi mais contrastante.

Na figura 17 se encontram os gráficos de distribuição acumulada dos principais teores analisados para as frações granulométricas. Semelhante às amostras totais, o P_2O_5 apresentou conteúdos pequenos acima de 0,295 mm (9 a 16%) em contraste ao SiO_2 (21 a 31%); CaO e MgO apresentaram-se em distribuições mais próximas às do SiO_2 .

O litotipo zona de reação apresentou distribuição acumulada dos óxidos diferente entre as duas amostras, estando a amostra B-10F304/3-ZR com maior conteúdo desses para os finos. Já para o litotipo jacupiranguito essa distribuição foi similar entre as duas amostras, excetuando o P_2O_5 , com conteúdo mais elevado para os finos na B-10F304/3-J.

Em comparação a um carbonatito típico, a distribuição de P_2O_5 das amostras de catação, assim como as totais, se mostrou em geral com conteúdos menores na fração grossa e na mais fina, $-0,037$ mm, sendo maiores de 0,147 a 0,037 mm.

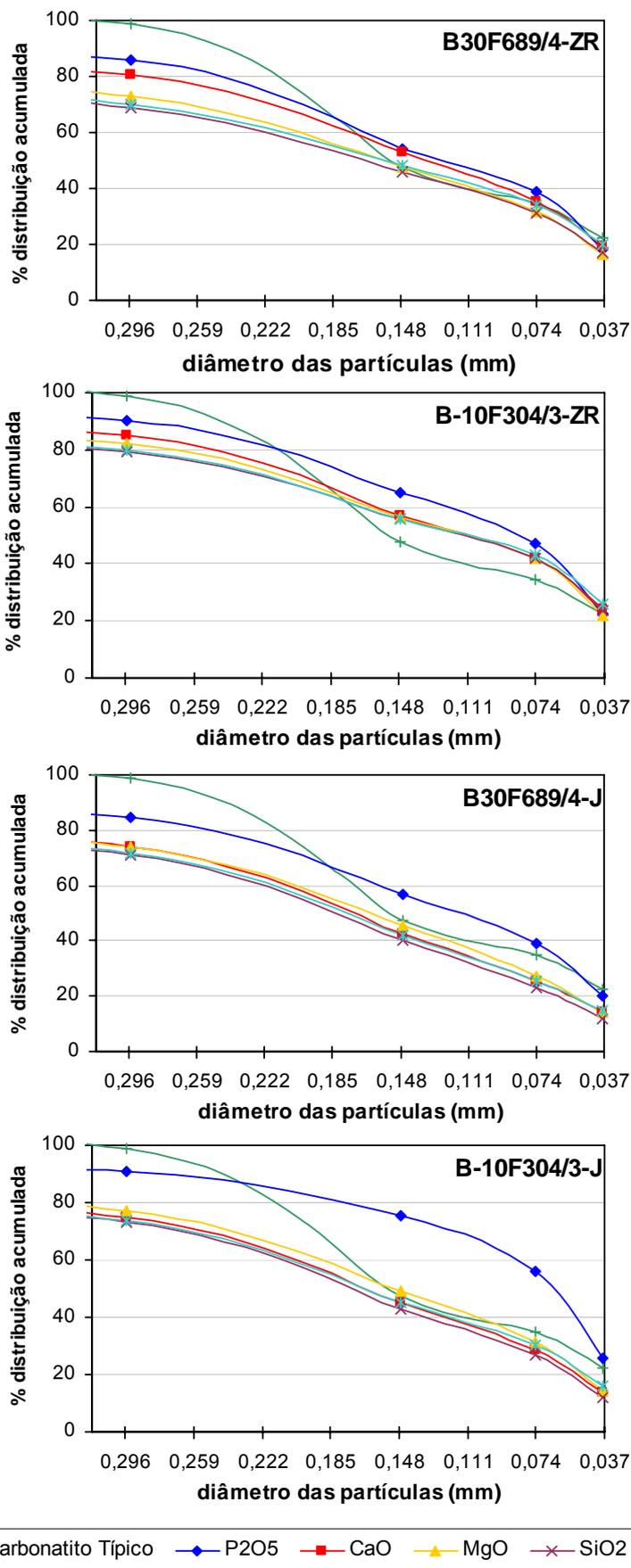


Figura 17 – Amostras de catação. Distribuição acumulada dos teores na classificação granulométrica no produto de moagem abaixo de 0,833 mm.

6.3.2 Separações minerais

As separações minerais, conduzidas na fração $-0,295+0,147$ mm, envolveram primeiramente a utilização de um líquido de densidade elevada, compatível com a dos minerais componentes do minério, e, posteriormente, separação em Frantz de Barreiras com a aplicação de diferentes campos magnéticos.

6.3.2.1 Líquido denso

A separação, realizada em líquido de densidade $2,96 \text{ g/cm}^3$, visou isolar as fases minerais mais abundantes (carbonatos e, para algumas amostras, flogopita) das demais fases presentes, como citado no item 5.4.1. A partição em massa entre os produtos gerados para cada amostra encontra-se no gráfico da figura 18.

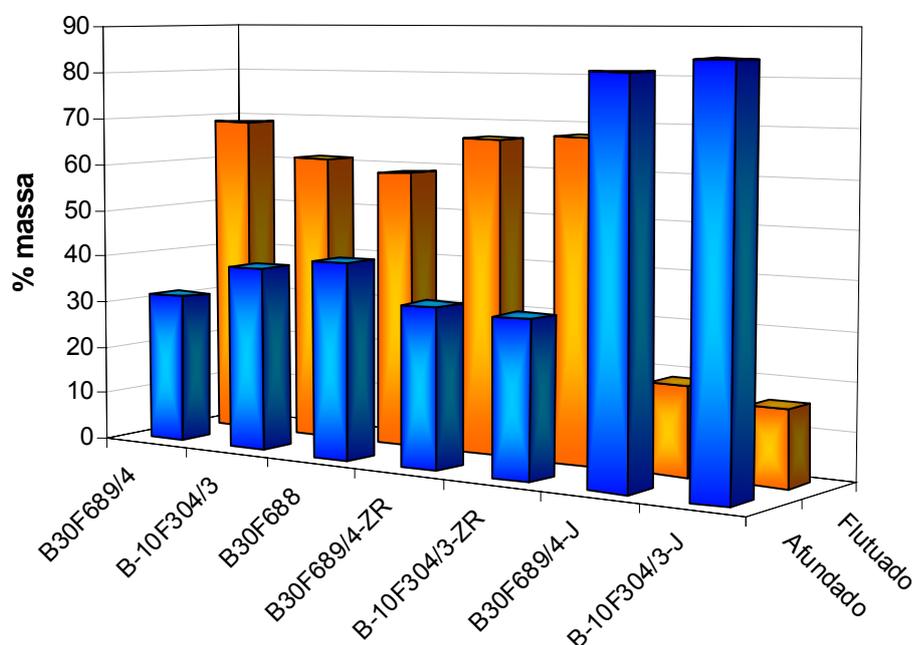


Figura 18 – Partição em massa dos produtos da separação em líquido denso para a fração $-0,295+0,147$ mm.

Nas amostras totais a variação nas proporções em massa dos produtos flutuado e afundado refletiu a heterogeneidade das Zonas de Xenólitos, com a amostra da XELeste, que mostrou maior percentagem de jacupiranguito, como indicado na figura 13, apresentando massa de produto afundado mais elevada que as da XENorte.

Nas amostras de zona de reação a maior percentagem de produto flutuado refletiu predomínio de carbonatos e flogopita sobre os outros minerais, enquanto para o jacupiranguito a baixa percentagem desse produto mostra pequena quantidade de flogopita no litotipo.

A tabela 23 apresenta o balanço metalúrgico para os produtos da separação em líquido denso. Os óxidos analisados mostraram comportamento semelhante para as amostras totais e de zona de reação, com teores elevados de CaO no flutuado e de P₂O₅, MgO, SiO₂, Fe₂O₃ e TiO₂ no afundado, evidenciando o predomínio de calcita sobre dolomita e o caráter magnesiano dos silicatos.

Tabela 23 – Balanço metalúrgico da separação em líquido denso para a fração -0,295+0,147 mm.

Produto	% em massa		Teores (%)									Distribuição no ensaio (%)				
	ensaio	amostra	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	PF	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
B30F689/4																
Flutuado	68,5	18,8	0,46	41,7	7,90	5,86	1,17	1,44	0,97	0,14	38,1	11,3	79,5	47,7	27,1	27,1
Afundado	31,5	8,7	7,87	23,5	18,8	34,2	6,84	3,31	0,21	1,94	2,05	88,7	20,5	52,3	72,9	72,9
Total calc.	100,0	27,5	2,79	36,0	11,3	14,8	2,95	2,03	0,73	0,71	26,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
B-10F304/3																
Flutuado	61,2	15,7	0,25	44,2	7,70	4,34	0,90	0,86	0,71	0,13	40,0	4,0	72,3	43,5	18,2	19,7
Afundado	38,8	10,0	9,58	26,7	15,8	30,8	5,82	3,25	0,20	2,02	2,44	96,0	27,7	56,5	81,8	80,3
Total calc.	100,0	25,7	3,87	37,4	10,8	14,6	2,81	1,79	0,51	0,87	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
B30F688																
Flutuado	58,7	16,2	0,39	40,7	8,88	6,18	1,27	1,42	0,83	0,14	39,0	7,7	71,0	42,4	19,8	21,5
Afundado	41,3	11,4	6,61	23,6	17,2	35,7	6,58	3,60	0,28	2,22	2,33	92,3	29,0	57,6	80,2	78,5
Total calc.	100,0	27,6	2,96	33,6	12,3	18,4	3,46	2,32	0,60	1,00	23,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
B30F689/4-ZR																
Flutuado	66,5	14,6	0,43	29,4	14,7	15,7	2,51	3,47	2,40	0,35	30,0	10,5	79,2	52,0	49,8	42,1
Afundado	33,5	7,4	7,31	15,3	26,9	31,3	6,84	1,87	0,56	2,17	3,07	89,5	20,8	48,0	50,2	57,9
Total calc.	100,0	22,0	2,73	24,7	18,8	20,9	3,96	2,93	1,78	0,96	21,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
B-10F304/3-ZR																
Flutuado	67,4	15,6	0,42	30,8	14,7	14,0	2,59	2,80	2,54	0,44	30,5	9,3	80,7	50,0	50,6	43,6
Afundado	32,6	7,6	8,49	15,2	30,4	28,1	6,93	1,37	0,83	2,31	3,68	90,7	19,3	50,0	49,4	56,4
Total calc.	100,0	23,2	3,05	25,7	19,8	18,6	4,00	2,33	1,98	1,05	21,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
B30F689/4-J																
Flutuado	18,6	4,6	1,04	23,9	18,9	18,4	3,81	4,77	4,67	0,64	21,9	17,7	22,3	18,0	9,1	10,6
Afundado	81,4	20,0	1,11	19,0	19,7	42,0	7,35	4,28	0,05	2,05	1,68	82,3	77,7	82,0	90,9	89,4
Total calc.	100,0	24,6	1,10	19,9	19,6	37,6	6,69	4,37	0,91	1,79	5,44	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
B-10F304/3-J																
Flutuado	16,0	3,8	0,57	24,7	18,2	19,5	3,17	4,23	3,32	0,81	24,2	18,3	18,7	16,5	8,2	8,1
Afundado	84,0	20,1	0,48	20,5	17,6	41,4	6,81	5,03	0,21	2,75	1,40	81,7	81,3	83,5	91,8	91,9
Total calc.	100,0	23,9	0,50	21,2	17,7	37,9	6,22	4,90	0,71	2,44	5,04	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Nas amostras de zona de reação os teores de K_2O e Al_2O_3 foram expressivos no produto flutuado, estando associados à flogopita, enquanto nas totais o Al_2O_3 foi mais elevado no produto afundado, refletindo a sua ocorrência também em diopsídio e tremolita, como verificado por MEV-EDS.

Já nas amostras de jacupiranguito o produto flutuado teve valores elevados de CaO e K_2O e o afundado de SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 ; diferentemente das totais e de zona de reação os teores de MgO e Al_2O_3 não apresentaram variações significativas, com importante ocorrência tanto em flogopita quanto diopsídio e tremolita. Ressalta-se que o P_2O_5 está presente em valores muito baixos, o que mostra a fluorapatita como mineral pouco importante nesse litotipo.

O conteúdo de P_2O_5 foi superior a 89% para as amostras totais e de zona de reação e cerca de 80% para as de jacupiranguito no produto afundado, mostrando diferenças de liberação da fluorapatita em relação aos carbonatos e flogopita.

O SiO_2 também se concentrou nesse produto para as amostras totais e de jacupiranguito (72-82% e cerca de 90%, respectivamente), porém para as de zona de reação a relação de conteúdo entre esse produto e o flutuado é de 1:1, mostrando a elevada quantidade de flogopita nesse litotipo.

6.3.2.2 *Frantz de Barreiras*

Visando comparar o comportamento magnético das diversas fases minerais presentes nas amostras, adotou-se uma separação magnética sistemática nos produtos flutuado (FL) e afundado (AF) da separação em líquido denso, com variação regular da corrente de 0,25 A entre 0,00 A e 1,25 A, como citado no item 5.4.2. A partição em massa entre os produtos gerados para cada amostra encontra-se no gráfico da figura 19.

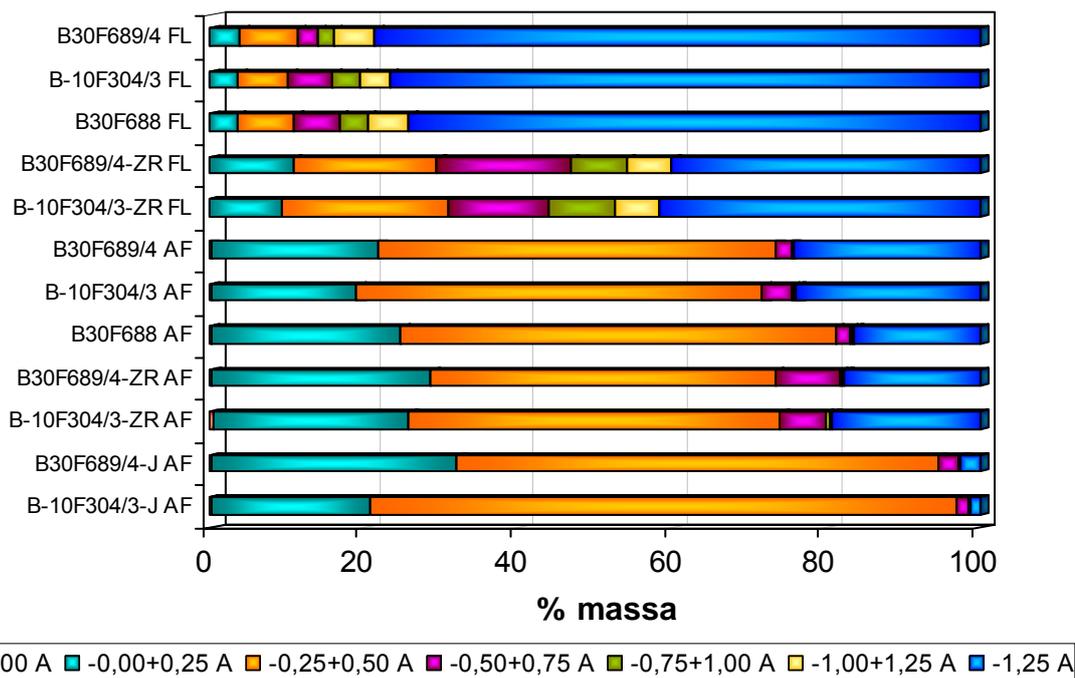


Figura 19 – Partição em massa dos produtos da separação magnética para a fração -0,295+0,147 mm.

Na separação magnética verificou-se partição em massa variada para cada tipo de amostra e produto da separação em líquido denso. Em geral, os flutuados apresentaram maior massa no produto não-magnético (-1,25 A), composto por carbonatos, e os afundados no produto magnético -0,25+0,50 A, com composição variada em função do tipo de amostra.

O produto flutuado não-magnético das amostras totais apresentou a maior porcentagem em massa devido à presença do litotipo carbonatito; já nas de zona de reação destacam-se também os intervalos -0,25+0,50 A e -0,50+0,75 A, nos quais ocorreu concentração de flogopita.

Os afundados das amostras totais e de zona de reação apresentaram distribuição em massa similar ao longo do intervalo magnético, com maiores porcentagens nos intervalos -0,00+0,25 A e -0,25+0,50 A, onde ocorreram principalmente diopsídio, forsterita, tremolita e clinocristotila, e -1,25 A, no qual ocorreu fluorapatita e raros sulfetos. Já nas amostras de jacupiranguito os intervalos -0,00+0,25 A e -0,25+0,50 A foram os mais abundantes e apresentaram composição mineralógica similar à das totais e de zona de reação, porém seu produto não-magnético foi pouco expressivo, refletindo o baixo conteúdo de fluorapatita no litotipo.

Em relação às duas porções das Zonas de Xenólitos, a amostra proveniente da XELeste apresentou na separação magnética proporção do produto afundado diferente das da XENorte, com porcentagem de não-magnético significativamente menor, refletindo, juntamente com seus baixos valores de P_2O_5 , o pequeno conteúdo de fluorapatita nessa porção da unidade litológica.

O produto magnético +0,00 A, no qual concentrou-se principalmente magnetita, apresentou uma porcentagem em massa muito pequena tanto no flutuado como no afundado. Com a magnetita sendo retirada previamente na etapa de “desmagnetização”, a mesma ocorreu nesse produto em grãos mistos com outros minerais, como descrito por estereomicroscopia.

A tabela 24 apresenta o balanço metalúrgico para os produtos compostos da separação magnética, como indicado no item 5.5. Os flutuados das amostras totais e de zona de reação geraram produtos menos magnéticos com elevados valores de CaO, evidenciando seu enriquecimento em carbonatos (principalmente calcita) com o aumento do campo magnético. Já os outros óxidos maiores constituintes apresentaram comportamento oposto, mostrando concentração de silicatos (essencialmente flogopita) nos produtos mais magnéticos (-0,25+0,50 A e -0,50+0,75 A).

Os afundados não-magnéticos concentraram principalmente fluorapatita, evidenciada pelos elevados valores de CaO e P_2O_5 nos mesmos.

Os teores de SiO_2 e Al_2O_3 mostraram-se maiores em -0,25 +0,50 A e, associados a valores intermediários de CaO, revelaram um produto mais enriquecido em diopsídio para as amostras total e de jacupiranguito. Já na amostra de zona de reação esse produto também apresentou elevado valor de MgO, similar ao composto -0,50+1,25 A, e com baixo valor de CaO, evidenciando nessa amostra o predomínio de forsterita sobre diopsídio e a ocorrência desse mineral em um intervalo de intensidade de corrente mais amplo que nas outras amostras, que concentraram forsterita em -0,50+1,25 A (amostra total) e -0,50+0,75 A (amostra de jacupiranguito).

Tabela 24 – Balanço metalúrgico da separação magnética para a fração -0,295+0,147 mm.

Produto	% em massa		Teores (%)									Distribuição no ensaio (%)				
	ensaio	amostra	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	PF	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Amostra total (B-10F304/3) FL																
+0,25A	3,8	0,6	0,60	22,0	19,2	19,4	4,47	3,57	2,82	0,80	23,6	8,9	1,9	9,4	16,8	18,6
-0,25+0,50A	6,4	1,0	0,42	10,7	23,7	29,2	5,58	6,03	5,12	1,04	16,0	10,7	1,5	19,8	43,3	39,7
-0,50+0,75A	5,7	0,9	0,61	18,2	21,9	22,1	3,01	5,39	4,04	0,56	23,6	13,8	2,4	16,3	29,3	19,1
-0,75+1,25A	7,5	1,2	0,41	32,0	17,7	3,30	0,99	0,37	0,43	0,08	42,4	12,1	5,4	17,2	5,7	8,2
-1,25A	76,6	12,0	0,18	51,2	3,75	0,28	0,17	<0,01	0,02	<0,01	43,8	54,5	88,8	37,3	4,9	14,4
Total calc.	100,0	15,7	0,25	44,2	7,70	4,34	0,90	0,86	0,71	0,13	40,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Amostra de zona de reação (B-10F304/3-ZR) FL																
+0,25A	9,3	1,5	0,65	18,3	21,2	22,1	5,55	4,05	3,62	0,94	21,8	14,4	5,5	13,4	14,7	19,9
-0,25+0,50A	21,7	3,4	0,48	7,75	25,4	32,1	6,16	6,24	6,08	1,10	12,9	24,8	5,5	37,5	49,8	51,6
-0,50+0,75A	13,1	2,0	0,63	12,8	24,0	26,6	3,49	6,47	5,23	0,59	17,8	19,6	5,5	21,4	24,9	17,6
-0,75+1,25A	14,5	2,3	0,51	29,9	19,3	8,11	1,38	1,55	1,23	0,20	37,8	17,6	14,1	19,0	8,4	7,7
-1,25A	41,5	6,5	0,24	51,5	3,09	0,72	0,20	<0,01	0,06	0,02	43,1	23,7	69,5	8,7	2,1	3,2
Total calc.	100,0	15,6	0,42	30,8	14,7	14,0	2,59	2,80	2,54	0,44	30,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Amostra total (B-10F304/3) AF																
+0,25A	19,1	1,9	0,49	15,8	21,2	36,8	11,6	3,64	0,30	3,83	2,82	1,0	11,3	25,7	22,8	38,3
-0,25+0,50A	52,6	5,2	0,17	19,5	19,4	42,5	6,45	4,70	0,21	2,29	1,30	0,9	38,5	64,7	72,5	58,4
-0,50+1,25A	4,4	0,4	2,57	14,5	32,6	31,7	3,92	1,89	0,59	1,90	8,49	1,2	2,4	9,1	4,6	3,0
-1,25A	23,8	2,4	38,9	53,5	0,32	0,21	0,10	<0,01	0,01	0,01	3,51	96,9	47,8	0,5	0,2	0,4
Total calc.	100,0	10,0	9,58	26,7	15,8	30,8	5,82	3,25	0,20	2,02	2,44	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Amostra de zona de reação (B-10F304/3-ZR) AF																
+0,25A	25,9	2,0	1,03	5,20	34,1	28,8	14,3	1,37	1,03	6,41	4,63	3,1	8,8	29,0	26,6	53,5
-0,25+0,50A	48,2	3,6	0,44	5,98	39,3	38,7	6,03	1,99	1,05	1,21	3,18	2,5	18,9	62,3	66,3	41,9
-0,50+1,25A	6,8	0,5	4,68	13,0	37,7	28,0	3,51	0,80	0,69	0,89	8,77	3,8	5,8	8,5	6,8	3,5
-1,25A	19,1	1,4	40,3	53,2	0,33	0,49	0,39	<0,01	0,04	0,01	1,83	90,6	66,5	0,2	0,3	1,1
Total calc.	100,0	7,6	8,49	15,2	30,4	28,1	6,93	1,37	0,83	2,31	3,68	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Amostra de jacupiranguito (B-10F304/3-J) AF																
+0,25A	20,9	4,2	0,18	18,6	18,6	39,9	9,39	4,67	0,20	3,81	1,41	7,7	18,9	22,1	20,1	28,8
-0,25+0,50A	76,1	15,3	0,09	20,8	17,1	42,7	6,29	5,31	0,20	2,51	1,08	14,1	77,1	73,9	78,5	70,3
-0,50+0,75A	1,7	0,3	1,28	9,70	40,2	33,5	3,16	0,82	0,67	1,98	5,86	4,4	0,8	3,8	1,4	0,8
-0,75A	1,4	0,3	25,7	46,8	3,46	2,48	0,61	0,12	0,15	0,61	13,6	73,7	3,2	0,3	0,1	0,1
Total calc.	100,0	20,1	0,48	20,5	17,6	41,4	6,81	5,03	0,21	2,75	1,40	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Observando o comportamento de Fe₂O₃ ao longo de intervalo de separação magnética, tanto para os flutuados como afundados, notou-se que ele ocorre na composição de outros minerais além de magnetita e ilmenita, fato confirmado pelas análises de MEV-EDS; o produto -0,25+0,50 A, no qual se concentraram flogopita, diopsídio, forsterita e tremolita, apresentaram valores expressivos desse óxido.

O produto +0,25 A em geral não apresentou uma correlação de composição mineralógica como os outros da separação magnética Formado pela soma dos produtos +0,00 A e -0,00+0,25 A, apresentou grande quantidade de grãos mistos de magnetita com outras fases minerais, mostrando-se sem identidade mineralógica.

O conteúdo de P₂O₅ no não magnético afundado das amostras total e de zona de reação foi superior a 90%, evidenciando boa liberação da fluorapatita; já na amostra de jacupiranguito foi de 73%, com 15% no produto -0,25+0,50 A, mostrando associação do mineral com silicatos. Para o produto +0,00 A notou-se pequena quantidade de fluorapatita nas amostras total e de zona de reação (1 e 3% do P₂O₅

da fração, respectivamente), sendo mais elevada no jacupiranguito (7% do P_2O_5 da fração). Apesar do baixo teor do elemento no flutuado, a distribuição mostrou que a fluorapatita presente nele formava grãos mistos principalmente com carbonatos nas amostras totais, enquanto nas amostras de zona de reação associou-se também à flogopita.

O SiO_2 na separação magnética do flutuado tanto das amostras totais quanto de zona de reação apresentou maior conteúdo em -0,25+0,50 A (43 e 50% da fração, respectivamente), seguido de -0,50+0,75 A (29 e 25%, respectivamente), evidenciando o amplo intervalo de campo magnético em que ocorreu a flogopita. No afundado o principal intervalo de ocorrência do óxido também foi -0,25+0,50 A (73% da fração para amostra total, 66% da fração para zona de reação e 79% da fração para jacupiranguito), porém de 20 a 26% do conteúdo de SiO_2 da fração ocorreu associado ao produto magnético +0,00 A.

Com base nos resultados de separação magnética apresentados, foram calculados, para as amostras total e de zona de reação, as porcentagens em massa e os teores para os intervalos magnéticos compostos pelos valores dos produtos flutuados e afundados, que encontram-se expostos na tabela 25.

Tabela 25 – Balanço metalúrgico da separação magnética para as amostras total e de zona de reação com valores compostos a partir dos produtos flutuados e afundados (fração -0,295+0,147 mm).

Produto	% em massa		Teores (%)									Distribuição no ensaio (%)				
	ensaio	amostra	P_2O_5	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	PF	P_2O_5	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3
Amostra total (B-10F304/3)																
+0,25A	9,7	2,5	0,52	17,2	20,8	32,7	9,95	3,62	0,90	3,11	7,73	1,3	4,5	18,6	21,7	34,4
-0,25+0,50A	24,4	6,3	0,21	18,1	20,1	40,3	6,31	4,91	1,00	2,09	3,68	1,3	11,8	45,2	67,2	54,7
-0,50+1,25A	9,8	2,5	0,86	24,0	21,8	15,0	2,23	2,44	1,75	0,57	29,7	2,2	6,3	19,7	10,1	7,8
-1,25A	56,1	14,4	6,56	51,6	3,18	0,27	0,16	-	0,02	-	37,2	95,2	77,5	16,5	1,0	3,2
Total calc.	100,0	25,7	3,87	37,4	10,8	14,6	2,81	1,79	0,51	0,87	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Amostra de zona de reação (B-10F304/3-ZR)																
+0,25A	14,7	3,4	0,87	10,8	28,6	26,0	10,6	2,51	2,13	4,08	12,0	4,2	6,2	21,2	20,5	38,9
-0,25+0,50A	30,3	7,0	0,46	6,83	32,6	35,5	6,09	4,04	3,47	1,16	7,84	4,6	8,1	49,9	58,0	46,1
-0,50+1,25A	20,8	4,8	1,01	20,9	23,3	18,1	2,50	3,55	2,87	0,44	26,2	6,9	16,9	24,4	20,2	13,0
-1,25A	34,2	7,9	7,53	51,8	2,59	0,68	0,23	-	0,06	0,02	35,6	84,4	68,9	4,5	1,2	2,0
Total calc.	100,0	23,2	3,05	25,7	19,8	18,6	4,00	2,33	1,98	1,05	21,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Os teores de P_2O_5 e CaO mostraram que fluorapatita e carbonatos se concentraram essencialmente no produto não-magnético da separação, em contraste com o SiO_2 que evidenciou ocorrência de silicatos principalmente entre 0,25 e 0,50 A. Destaca-se a importante presença de MgO no mesmo intervalo magnético que o SiO_2 , revelando a abundância de silicatos magnesianos e baixa

quantidade de dolomita nas Zonas de Xenólitos, principalmente no litotipo zona de reação.

6.3.3 Consolidação da caracterização tecnológica

6.3.3.1 Composição química das amostras estudadas

A composição química das amostras coletadas em frentes de lavra das Zonas de Xenólitos encontra-se na tabela 26.

Tabela 26 – Composição química das amostras coletadas em frentes de lavra das Zonas de Xenólitos.

Teores (%)	Frentes de lavra (amostras totais)		
	XENorte		XELeste
	B30F689/4	B-10F304/3	B30F688
P ₂ O ₅	3,16	3,60	2,70
CaO	33,4	33,1	30,2
MgO	10,5	10,6	12,2
SiO ₂	13,4	15,1	17,3
Fe ₂ O ₃	9,85	9,29	10,2
Al ₂ O ₃	1,94	2,06	2,26
K ₂ O	0,63	0,58	0,80
TiO ₂	1,19	1,27	1,51

A amostra proveniente da XELeste apresenta maiores valores de MgO, SiO₂ e Fe₂O₃ e menores de P₂O₅, abaixo do teor de corte da Mina, e de CaO, refletindo a elevada porcentagem de jacupiranguito nessa porção das Zonas de Xenólitos. Já na XENorte as diferenças entre as duas amostras são menores, com teores de P₂O₅ acima do teor de corte da Mina, refletindo maior quantidade de carbonatito.

A composição química dos litotipos zona de reação e jacupiranguito, individualizados por catação (fração -44,5+12,7 mm) a partir das amostras de frente de lavra, encontra-se na tabela 27.

Tabela 27 – Composição química dos litotipos individualizados das Zonas de Xenólitos.

Teores (%)	Litotipos (amostras de catação)			
	B30F689/4-ZR	B-10F304/3-ZR	B30F689/4-J	B-10F304/3-J
P ₂ O ₅	3,07	2,92	1,42	0,87
CaO	19,9	21,6	15,7	18,6
MgO	18,4	17,7	18,2	15,6
SiO ₂	20,9	19,7	31,1	33,3
Fe ₂ O ₃	13,5	11,4	18,5	16,4
Al ₂ O ₃	3,00	2,84	4,24	4,71
K ₂ O	2,02	2,06	0,96	0,67
TiO ₂	1,53	1,52	2,62	3,21

As amostras de zona de reação apresentam maiores teores de P₂O₅, CaO e K₂O e menores de SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ refletindo porcentagem mais elevada de fluorapatita, carbonatos e flogopita em comparação com o jacupiranguito, no qual os valores mostram predomínio de silicatos (principalmente diopsídio, forsterita e tremolita) e maior quantidade de magnetita.

6.3.3.2 Análise granulométricas

O comportamento das amostras nessa etapa é similar ao de um carbonatito típico sendo que concentra maior porcentagem em massa na fração -0,295+0,147 mm, intervalo granulométrico no qual a fluorapatita apresenta elevado grau de liberação segundo estudos de caracterização realizados anteriormente na mina, como citado no item 5.4.

A amostra B-10F304/3 mostra um comportamento diferenciado das outras duas nas etapas de cominuição (britagem e moagem), concentrando material nas frações finas devido à sua maior porcentagem de carbonatito (51,3% em massa), litotipo composto essencialmente por carbonatos, que são minerais de baixa dureza e proeminente clivagem.

Os teores de P₂O₅ são mais elevados na fração -0,147+0,074 mm; seu conteúdo é maior na -0,295+0,147 mm seguida da -0,147+0,074 mm, com baixa associação do mineral ao produto magnético. Em comparação a um carbonatito típico as Zonas de Xenólitos apresentam menores conteúdos em -0,295+0,147 mm

e maiores para frações mais finas (de 0,147 a 0,037 mm), resultado de uma fluorapatita com tendência a granulometria fina na cominuição.

O SiO_2 é mais elevado na fração -0,833+0,295 mm, evidenciando concentração de minerais silicáticos nos grossos, comportamento que para diopsídio, forsterita e tremolita se relaciona à sua elevada dureza em comparação aos carbonatos e fluorapatita, e que para flogopita é devido seu hábito placóide e sua clivagem proeminente. Apresenta maiores conteúdos entre 0,833 a 0,147 mm, evidenciando pouca associação desses minerais com a fluorapatita.

Já os litotipos zona de reação e jacupiranguito na cominuição mostram porcentagem em massa pouco mais elevada para as frações finas que as amostras totais e um carbonatito típico, porém também concentram maior porcentagem de material na -0,295+0,147 mm. O litotipo zona de reação da amostra B-10F304/3, assim como a amostra total, também concentra maior porcentagem de material nas frações finas em comparação às outras amostras de catação, evidenciando uma zona de reação com maior porcentagem de carbonatos.

Nas amostras de zona de reação os teores de P_2O_5 apresentam comportamento variável: na B30F689/4-ZR os valores são maiores em duas frações, -0,295+0,147 mm e -0,074+0,037 mm, enquanto na B-10F304/3-ZR ele é mais elevado apenas na fração mais fina. A distribuição do óxido é similar para as duas amostras, com conteúdos maiores em -0,295+0,147 mm e subordinadamente em -0,074+0,037 mm e evidenciando a existência de duas gerações distintas de fluorapatita.

Os teores de P_2O_5 nas amostras de jacupiranguito são maiores para as frações mais finas (entre 0,295 e 0,037 mm), porém sua distribuição é variável: a B30F689/4-J tem maior conteúdo de fluorapatita na fração -0,295+0,147 mm com importante parcela do mineral para as frações finas, enquanto na amostra B-10F304/3-J ocorre concentração de fluorapatita apenas nos finos.

Assim como as amostras totais, quando comparadas a um carbonatito típico, as amostras de catação apresentam menores conteúdos de P_2O_5 na fração grossa e maiores para os finos até 0,037 mm, resultado de uma fluorapatita com tendência a granulometria fina na cominuição além de ocorrer naturalmente fina, como constatado por observações de campo.

Já o SiO_2 , assim como nas amostras totais, é mais elevado fração $-0,833+0,295$ mm, evidenciando concentração de minerais silicáticos nos grossos. A distribuição do óxido nos dois litotipos é similar à das amostras totais, revelando concentração de silicatos nas frações mais grossas e pouca associação desses minerais com a fluorapatita.

De 0,7 a 1,7% da fluorapatita nas amostras totais e de zona de reação permanecem associados ao produto magnético em baixo campo na forma de grãos mistos com magnetita. Já nas amostras de jacupiranguito esse valor é de 2,8 a 6,2%, evidenciando maior associação entre os dois minerais.

6.3.3.3 Separações magnéticas

O intervalo granulométrico $-0,295+0,147$ mm, selecionado para as separações minerais em Frantz de Barreiras, contém de 25,0 a 33,9% do P_2O_5 das amostras totais e de zona de reação e de 15,2 a 25,6% das de jacupiranguito.

Nas amostras totais verificou-se grau de liberação da ordem de 95% com a fluorapatita formando grãos mistos principalmente com carbonatos e magnetita. Nas de zona de reação esse grau diminui para 84% e nas de jacupiranguito para 62%.

Na separação magnética verificou-se maior quantidade de massa nos produtos flutuados não magnéticos $-1,25$ A, compostos essencialmente por carbonatos, e nos afundados $-0,25+0,50$ A, com composição mais diversificada, porém concentrando principalmente diopsídio e forsterita.

a) *Ábaco de separação no Frantz de Barreiras*

As observações estereomicroscópicas desses produtos permitiram estabelecer os intervalos de intensidade de corrente preferenciais de ocorrência dos minerais presentes nas Zonas de Xenólitos, gerando um ábaco de comportamento dos mesmos no Frantz de Barreiras, que é indicado na tabela 28 onde são apresentados

os valores aplicados de intensidade de campo magnético e de gradiente de campo. A conversão das intensidades de corrente foi efetuada com base no gráfico da figura 8 (ilustrado no item 3.5.1), fornecido pelo fabricante do equipamento.

Tabela 28 – Comportamento no Frantz de Barreiras das principais fases minerais identificadas nas amostras das Zonas de Xenólitos (fração -0,295+0,147 mm), com valores correspondentes de campo magnético e de gradiente de campo.

Intensidade de corrente no Frantz de Barreiras (A) (Inclinação lateral: 20°; inclinação frontal: 10°; granulometria -0,295+0,147 mm)		0,00	0,25	0,5	0,75	1,00	1,25	Não-mag.
Campo magnético (x 10 ³ Gauss) ¹		0	2,8	5,7	8,8	11,4	13,8	-
Gradiente de campo (x 10 ⁷ Gauss ² /cm) ¹		0	1,1	3,7	10,8	22	28,5	-
Minerais	Magnetita							
	Ilmenita							
	Flogopita verde							
	Flogopita castanha							
	Flogopita microcristalina laranja							
	Diopsídio marrom							
	Diopsídio verde-claro							
	Forsterita preta							
	Forsterita laranja							
	Forsterita incolor							
	Tremolita							
	Clinocrisotila							
	Carbonatos							
	Fluorapatita							
	Sulfetos							

Nota: As linhas mais grossas representam intervalos de ocorrência mais freqüentes.

1- Conversão de intensidade de corrente em campo magnético e gradiente de campo utilizando o gráfico da figura 8 (item 3.5.1).

Em relação ao comportamento dos silicatos, verificou-se que flogopita e forsterita ocorreram em um intervalo mais amplo de separação que diopsídio, tremolita e clinocrisotila.

A flogopita concentrou-se principalmente entre 0,00 e 0,75 A, não apresentando comportamento diferencial entre as três variedades do mineral (verde, castanha e microcristalina laranja), que em análises realizadas por MEV-EDS mostraram pequenas diferenças composicionais. Destaca-se que a presença de flogopita nos produtos menos magnéticos se deve principalmente ao seu hábito

placóide que promove fácil aderência a outros grãos prejudicando a seletividade na separação.

As duas variedades de diopsídio mostraram comportamento diferenciado e se concentraram em intervalos magnéticos bem definidos, com o marrom presente apenas entre -0,00 e +0,50 A e o verde-claro principalmente em -0,50+0,75 A.

A forsterita, assim como a flogopita, ocorreu em três variedades (preta, laranja e incolor) que apresentaram pequenas diferenças composicionais, porém a seletividade na separação magnética foi melhor do que para os outros minerais e foram mais definidos os intervalos de intensidade de corrente que se concentraram. Entre 0,00 e 0,50 A ocorreu apenas forsterita preta e incolor, enquanto de 0,50 a 0,75 A ocorreram as três variedades.

Tremolita e clinocristolita, que apresentaram comportamento magnético semelhante, ocorreram principalmente em -0,25+0,50 A.

Já os carbonatos e a fluorapatita mostraram comportamento bastante distinto dos silicatos e ocorreram para os produtos menos magnéticos, concentrando-se principalmente no não-magnético.

b) Curvas de separabilidade magnética

As curvas de separabilidade magnética estão expostas na figura 20. A distribuição dos principais teores auxiliou a visualizar a distribuição dos minerais em função dos intervalos da separação magnética, associando as análises químicas com a mineralogia observada por estereomicroscopia.

Nos produtos flutuados observa-se que SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O , contidos essencialmente à flogopita, apresentaram comportamento semelhante ao longo do intervalo de separação magnética, concentrados principalmente no -0,25+0,50 A e subordinadamente em -0,50+0,75 A. O Fe_2O_3 apresentou o mesmo comportamento dos teores citados anteriormente, evidenciando sua presença na flogopita, porém na amostra total ele mostrou-se pouco mais elevado para os produtos menos magnéticos (-0,75+1,25 A e -1,25 A) em relação à amostra de zona de reação, mostrando maior abundância de flogopita neles.

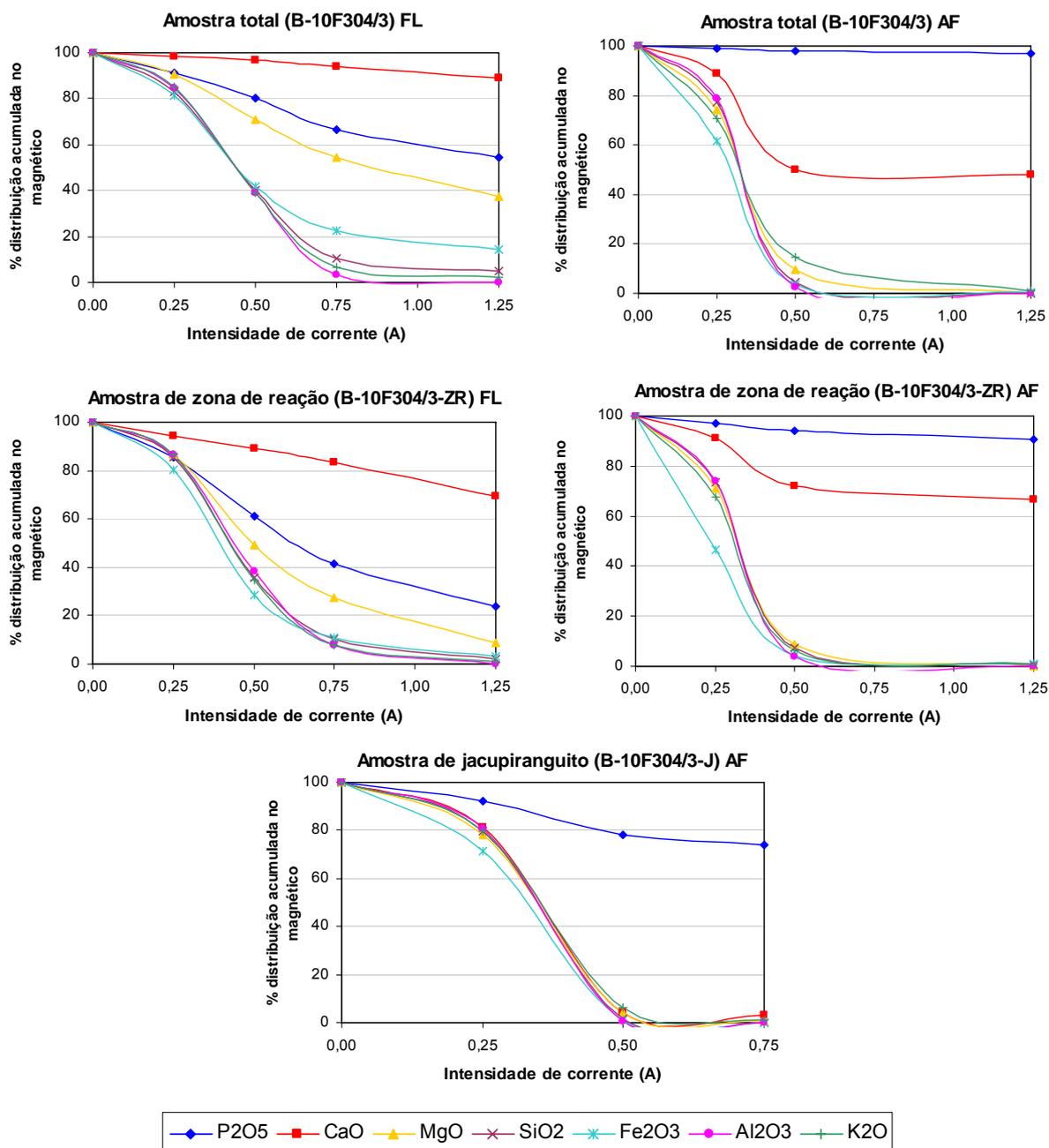


Figura 20 – Curvas de separabilidade magnética (fração -0,295 +0,147 mm).

CaO apresentou pouca variação ao longo do intervalo de campo magnético aplicado, correspondendo essencialmente aos carbonatos, e concentrou-se no produto -1,25 A. No entanto, o MgO apresentou maior variabilidade ao longo do intervalo, estando associado aos carbonatos e à flogopita, e mostrou comportamento diferente entre as amostras total e de zona de reação, com conteúdos elevados nos produtos -1,25 A e -0,25+0,50 A, respectivamente, evidenciando maior quantidade de flogopita na segunda amostra. Para o P₂O₅ foi verificado seu predomínio no -1,25

A, porém vale ressaltar que a fluorapatita presente no produto flutuado encontra-se principalmente em grãos mistos com fases minerais típicas desse produto.

Nos afundados o P_2O_5 não apresentou variações significativas ao longo do intervalo de campo magnético aplicado e se concentrou no produto não-magnético. Para as amostras total e de zona de reação o CaO apresentou concentração elevada no produto -1,25 A e subordinadamente em -0,25+0,50 A, correspondendo à fluorapatita e ao diopsídio, respectivamente. MgO, SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 e K_2O ocorrem em -0,25+0,50 A, correspondendo a diopsídio, forsterita, tremolita e raras clinocristotila e flogopita, sendo que na amostra de jacupiranguito o CaO apresentou esse mesmo comportamento, evidenciando o baixo conteúdo de fluorapatita.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A mineralogia das Zonas de Xenólitos constitui-se principalmente em carbonatos (calcita e subordinadamente dolomita), flogopita, diopsídio e forsterita, além de magnetita, tremolita, fluorapatita e quantidades pequenas de clinocristita, ilmenita e sulfetos. Diferente de Morbidelli *et al.* (1986), o anfibólio identificado não foi richterita e sim tremolita devido seu hábito fibroso, sua coloração verde e por difratometria de raios X.

São formadas por três litotipos: o carbonatito, mais abundante, a zona de reação e o jacupiranguito. Devido à heterogeneidade de dimensões e distribuição destes litotipos a representatividade das amostras é um aspecto crítico, superado nesse estudo através de amostragem volumétrica (30 ton de cada frente de lavra) e procedimentos de preparação e amostragem secundária apoiados no conhecimento empírico da mineração.

O carbonatito é constituído essencialmente por carbonatos (calcita e subordinadamente dolomita), além de fluorapatita, flogopita, magnetita e traços de forsterita e sulfetos. No jacupiranguito predominam diopsídio, forsterita, magnetita, flogopita e tremolita, com quantidades menores de ilmenita, clinocristita, carbonatos, fluorapatita e traços de sulfetos. Já a zona de reação é constituída por minerais provenientes dos outros dois litotipos e minerais neoformados, contendo carbonatos, flogopita, forsterita, diopsídio e tremolita, além de magnetita, fluorapatita, clinocristita, ilmenita e traços de sulfetos.

A fluorapatita presente no carbonatito mostrou liberação acima de 95% para o material cominuído abaixo de 0,833 mm; no litotipo zona de reação esse valor diminui para 84% e no jacupiranguito para 62%. Nos três tipos observou-se o mineral na forma de grãos mistos principalmente com carbonatos e em menor proporção com a magnetita, sendo insignificante a proporção de grãos mistos de fluorapatita com silicatos.

Tanto o jacupiranguito como a zona de reação contribuem para a elevada quantidade de silicatos nas Zonas de Xenólitos. Essas fases minerais mostraram variabilidade de cores e composição química, todos sendo portadores de MgO e

pequenas porcentagens de Fe_2O_3 , com alguns contendo Al_2O_3 (flogopita, diopsídio e tremolita) e K_2O (flogopita e tremolita).

A mineralização de apatita nas Zonas de Xenólitos, com teores de 2,70 a 3,60% P_2O_5 , próximos ao teor de corte de 3% adotado na Mina, está associada ao carbonatito e à zona de reação, enquanto os blocos de jacupiranguito são estéreis. Porém a unidade apresenta teores elevados de MgO , que classificam a unidade como minério de baixo teor do tipo *Magnésiano* segundo tipologia corrente na Mina (Brumatti, 2004), e de SiO_2 , ambos associados principalmente à zona de reação e ao jacupiranguito. Essa classificação não é correta para a unidade, pois foi definida originalmente para as unidades carbonatíticas onde os valores de MgO são provenientes de carbonatos, porém nas Zonas de Xenólitos esse óxido está relacionado aos silicatos, cuja presença compromete a recuperação de P_2O_5 do minério no processamento industrial.

O comportamento das amostras volumétricas na britagem industrial, observado através da individualização dos litotipos em três frações granulométricas (12,7 mm, 9,53 mm e 6,35 mm), revelou uma tendência da zona de reação estar em maior quantidade nos grossos, propiciando teores de P_2O_5 próximos ao teor de corte da Mina. Já na fração mais fina o carbonatito e em menor escala o jacupiranguito ocorreram em maiores proporções, tendo a fração -9,53+6,35 mm teores de P_2O_5 mais baixos.

O material passante em 6,35 mm mostrou maiores conteúdos de fluorapatita, com teores de P_2O_5 mais elevados que nas frações grossas (2,91 a 4,49%), proporção em massa variando de 12,0 a 39,6% e conteúdos de P_2O_5 associado de 19,4 a 51,4% e de SiO_2 de 10,2 a 46,6% em relação ao ROM.

Na moagem os litotipos zona de reação e jacupiranguito apresentaram distribuição em massa similar a um carbonatito típico e às amostras de frente de lavra, porém nas últimas o maior conteúdo de P_2O_5 se associou à fração -0,295+0,147 mm (28,9 a 33,9%) enquanto nos litotipos também foi significativo em granulometria mais fina (15,2 a 30,9% em -0,295+0,147 mm; 17,3 a 29,3% em 0,074+0,037 mm). Já o SiO_2 , em todos os tipos de amostras estudadas, concentrou-se para os grossos (19,4 a 29,9% acima de 0,147 mm), mostrando comportamento diferencial da fluorapatita em relação aos silicatos. Todos os tipos de amostras, quando comparadas a um carbonatito típico, apresentaram menores conteúdos na

fração -0,295+0,147 mm e -0,037 mm e maiores de 0,147 a 0,037 mm, evidenciando para as Zonas de Xenólitos uma fluorapatita com tendência a granulometria fina na cominuição além de ocorrer naturalmente fina nos litotipos da zona de reação e do jacupiranguito.

Nas separações magnéticas realizadas em Frantz de Barreiras os silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos ocorreram em intervalos de campo magnético bem definidos e distintos da fluorapatita e dos carbonatos, fato que possibilitou sua separação em escala de caracterização tecnológica. Verificou-se ainda pouca interferência dos silicatos nos minerais não-magnéticos na forma de grãos mistos ou inclusões.

Os carbonatos e a fluorapatita ocorreram predominantemente no produto não-magnético da separação (-1,25 A) e na forma de grãos liberados. A flogopita, em sua maioria magnética no intervalo de intensidade de campo de 0,25 a 0,75 A, devido seu hábito placóide, que lhe confere aderência a outros minerais e superfícies, permaneceu ainda junto aos produtos menos magnéticos, raramente em grãos mistos com carbonatos.

O diopsídio e a forsterita ocorreram em intervalos magnéticos bem definidos, concentrando-se principalmente no mesmo intervalo que a flogopita (-0,25+0,75 A). A forsterita ocorreu em maior intervalo de campo magnético devido à sua associação mais freqüente a outros minerais, principalmente a carbonatos. Tremolita e clinocristotila apresentaram o mesmo comportamento ao longo do intervalo magnético, concentrando-se principalmente em -0,25+0,50 A e raramente ocorrendo associados a forsterita.

A magnetita remanescente da etapa de “desmagnetização” ocorreu principalmente associada às outras fases minerais e na forma de inclusões nas mesmas, estando presente essencialmente no produto magnético +0,00 A da separação no Frantz de Barreiras.

Assim, em intensidade de corrente de 0,50 A (equivalente a um campo magnético de 5.700 Gauss com gradiente de campo de 37.000.000 Gauss²/cm) obteve-se, para a amostra de frente de lavra estudada, uma redução de 88,9% do SiO₂ total contido na fração -0,295+0,147 mm com apenas 2,6% de P₂O₅ associado, gerando um produto não-magnético com teores de 5,72% de P₂O₅ e 2,46% de SiO₂.

Aplicando-se uma intensidade de corrente mais elevada (1,25 A, equivalente a um campo magnético de 13.800 Gauss com gradiente de campo de 285.000.000 Gauss²/cm) a redução de SiO₂ passou para 99,0% do total contido na fração e amostra citadas acima e contendo 4,8% de P₂O₅ associado, com o produto não-magnético apresentando teores de 6,56% de P₂O₅ e 0,27% de SiO₂.

Com base nos dados obtidos pela caracterização tecnológica e mineralógica, confirmando a sugestão dos dados compilados de literatura, foi possível verificar que a separação magnética é um método eficiente para a separação entre fluorapatita e silicatos presentes nas Zonas de Xenólitos. Esta separação ocorre mesmo com a aplicação de campos magnéticos inferiores a 6.000 Gauss, desde que estes tenham um gradiente de campo adequado para obter seletividade entre o mineral de minério e os deletérios. O produto não-magnético gerado após a retirada dos silicatos se constitui essencialmente de fluorapatita e carbonatos.

Face aos resultados apresentados e ao atual processo de beneficiamento utilizado na mina, há duas possibilidades para o aproveitamento do minério proveniente das Zonas de Xenólitos, que podem ser adotadas isoladamente ou em conjunto:

- ✓ classificação granulométrica após britagem secundária para aproveitamento do material mais fino (passante em 12,7 mm no estudo realizado) enriquecido em P₂O₅, com teores variando de 2,48 a 4,08% e 26,4 a 59,8% do P₂O₅ total associado, e rejeitando a fração grossa;
- ✓ separação de alta intensidade e alto gradiente de campo magnético a ser realizada no ROM após a etapa de “desmagnetização” ou ainda no concentrado de fluorapatita obtido na flotação.

REFERÊNCIAS

ABOUZEID, A.Z.M. **Mineral processing laboratory manual**. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1990. 181p.

ALVES, P.R.P.C. **Estudos de caracterização tecnológica no minério apatítico do Complexo Alcalino de Jacupiranga, SP**. 1999. 59 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

AUGUSTO, P.A.; AUGUSTO, P.; CASTELO-GRANDE, T. Magnetic classification. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 15, n. 1-2, p. 35-43, 2002.

BETEJTIN, A. **Curso de mineralogia**. 2ª ed. Moscou: Mir, 1970. 739 p.

BONÁS, T.B. **Consolidação de critérios de descrição litológica para o minério apatítico do Complexo Alcalino de Jacupiranga**. 2001. 48 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BONÁS, T.B. **Aplicação de índice mineralógico como apoio na avaliação de reservas da mina de fosfato de Cajati-SP**. 2007. 80 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BONÁS, T.B.; SANT'AGOSTINO, L.M. Aplicação de índice mineralógico como apoio a avaliação de reserva e lavra da mina de fosfato de Cajati-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá. **Anais**. Araxá: SBG, 2004. 1 CD-ROM.

BRANDÃO, A.G.P. **Investigações mineralógicas em matéria-prima carbonática de uma determinada unidade litológica da Mina de Cajati (SP), visando novas aplicações industriais**. 2003. 39 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BRUMATTI, M. **Detalhamento mineralógico da zona de xenólitos a norte e a leste da Mina de Cajati, SP**. 2004. 45 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CHEN, C-W. **Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials**. New York : Dover Publications, 1986. 571 p.

DAHLIN, D.C.; RULE, A.R. **Magnetic susceptibility of minerals in high magnetic fields**. Pittsburgh: U. S. Bureau of Mines, 1993. 13 p. (Report of Investigations, n. 9449).

DELBONI JR., H. Metodologia para determinação de parâmetros magnéticos de minerais. In: ENCONTRO DO HEMISFÉRIO SUL SOBRE TECNOLOGIA MINERAL, 3, 1992, São Paulo, e ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA, 15, 1992, São Lourenço. **Tecnologia mineral I**. Belo Horizonte: ABTM, 1992. p. 46-61.

DERBY, O.A. The magnetite ore districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil. **American Journal of Science**, Series 3, New Haven, v. 141, p. 311-321, 1891.

GASPAR, J.C. **Geologie et mineralogie du complexe carbonatitique de Jacupiranga, Brésil**. 1989. 344 p. Tese (Doutoramento) - U.E.R. de Science Fundamentales et Appliquées, Université d'Orleans, Orleans, Fr., 1989.

GAUDIN, A.M. Principles of mineral dressing. New York: TMH Publishing Co., 1971. 554 p.

GERMAN, A.; MARKER, A.; FRIEDRICH, G. The alkaline complex of Jacupiranga, São Paulo, Brazil. Petrology and genetic consideration. **Zentralblatt fuer Geologie und Palaeontologie**, Teil I, Stuttgart, n. 7/8, p. 807-818, 1987.

HAYES, P.C. **Process selection in extractive metallurgy**. Brisbane: Hayes Publishing Co., 1985. 406p.

HOPSTOCK, D.M. Magnetic properties of minerals. In: WEISS, N.L. **SME Mineral Processing Handbook**. New York: Society of Mining Engineers, 1985. p. 6-10.

HUNT, C.P.; MOSKOWITZ, B.M.; BANERJEE, S.K. Magnetic properties of rocks and minerals. In: AHRENS, T. **Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants**. Washington: American Geophysical Union, 1995. p. 189-204.

KAHN, H.; TASSINARI, M.M.L. **Separações minerais em laboratório**. São Paulo: Epusp, 2005. 16 p. Notas da disciplina de pós graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, PMI-5712 - Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais.

KLEIN, C. **The 22nd edition of the manual of mineral science**. 22nd ed. New York. John Wiley, 2002. 641 p.

LUZ, A.B. **Tratamento de minérios**. 4^a ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. 858 p.

MELCHER, G.C. O carbonatito de Jacupiranga. **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo**. Ser. Geologia, São Paulo, n. 21, p. 1-75, 1965.

MENEZES JR., L.A.D.; MARTINS, J. M. The Jacupiranga mine, São Paulo, Brasil. **The Mineralogical Record**, Bowie, v. 15, n. 5, p. 261-270, 1984.

MINERALOGY DATABASE. **Alphabetical Index of Minerals**. Disponível em: <<http://www.mindat.org>>. Acesso em: 15 ago. 2007.

MORBIDELLI, L.; BECCALUVA, L.; BROTZU, P.; CONTE, A.; GARBARINO, C.; GOMES, C.B.; MACCIOTTA, G.; RUBERTI, E.; SCHEIBE, L.F.; TRAVERSA, G. Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. 3. Fenitization of jacupiranguite by carbonatite magmas in the Jacupiranga Complex, SP. **Periódico di Mineralogia**, Rome, v. 55, n. 2-3, p. 261-295, 1986.

OLIVEIRA, S.B. **Caracterização tecnológica da área de pesquisa denominada Mesquita Sampaio, situada no Complexo Alcalino de Jacupiranga, Cajati, SP**. 2005. 47 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PARFENOFF, A.; POMEROL, C, TOURENQ, J. **Les minéraux em grains: méthodes d'étude et détermination**. Paris: Masson, 1970. 578 p.

RAPOSO, D.B. **Investigação tecnológica em minério carbonatítico de Cajati-SP, utilizado como matéria-prima na produção de foscálcio**. 2002. 28 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ROSENBLUM, S. Magnetic susceptibilities of minerals in the Frantz Isodynamic magnetic separator. **American Mineralogist**, Lancaster, v. 43, n. 1-2, p. 170-173, 1958.

ROSENBLUM, S; BROWNFIELD, I.K. Magnetic susceptibilities of minerals. **Open-File report**. Reston: U. S. Geological Survey. 2000. 37 p. (Publications of U.S. Geological Survey, n. 99-529).

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

S.G. FRANTZ COMPANY INC. **Laboratory separators**. Disponível em: <<http://www.sqfrantz.com>>. Acesso em: 14 ago. 2006.

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

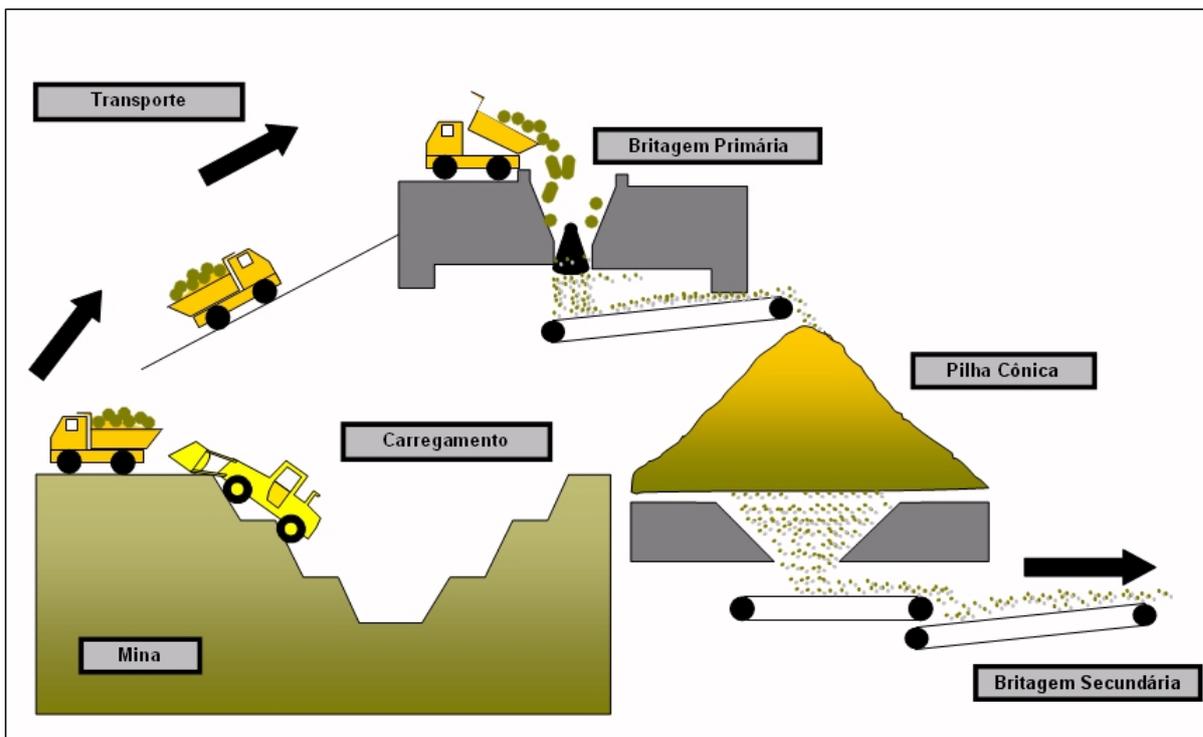
SAITO, M.M.; BARROS, G.; BONÁS, T.B.; BETTENCOURT, J. Mapeamento geológico de detalhe da mina de Cajati (SP): modelo conceitual e aplicação à lavra, produção e beneficiamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá. **Anais**. Araxá: SBG, 2004. 1 CD-ROM.

SILVA, J.F. **Detalhamento da mineralogia em apoio à caracterização tecnológica do minério de fosfato da mina de Cajati, São Paulo**. 2001. 33 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

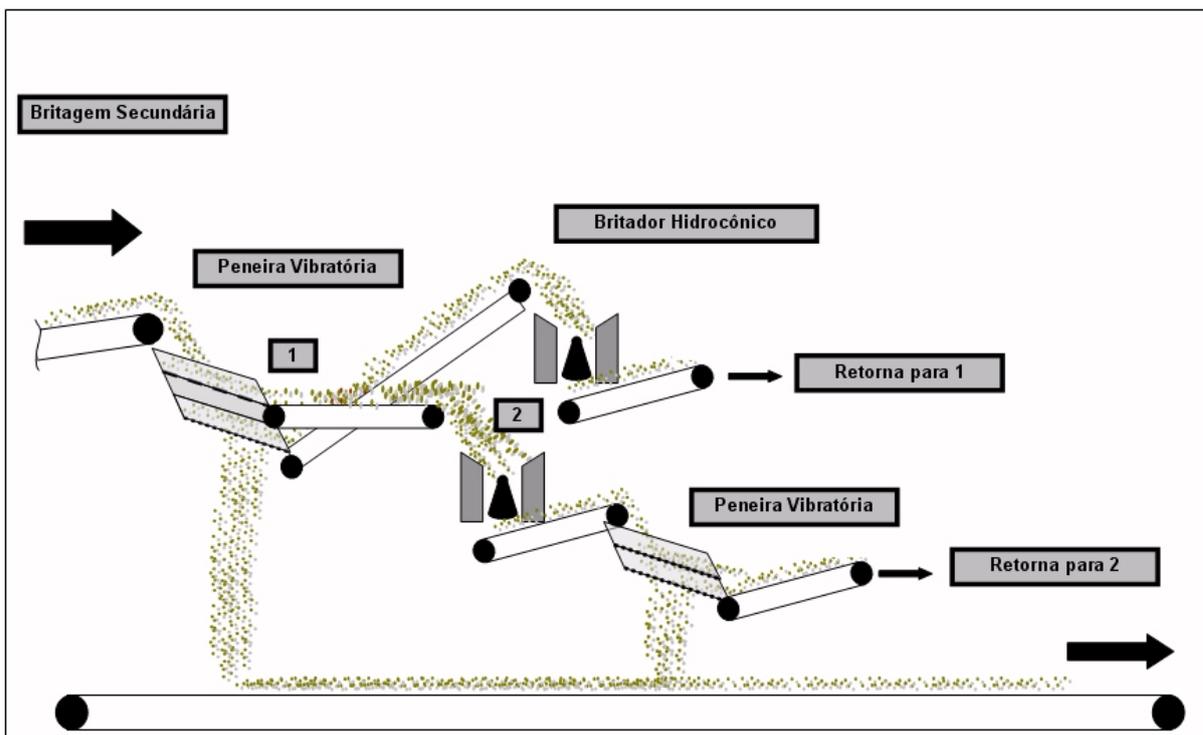
SVOBODA, J. **Magnetic methods for the treatment of minerals**. New York: Elsevier, 1987. 692 p.

ANEXO A – SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO - CROQUI DO COMPLEXO INDUSTRIAL

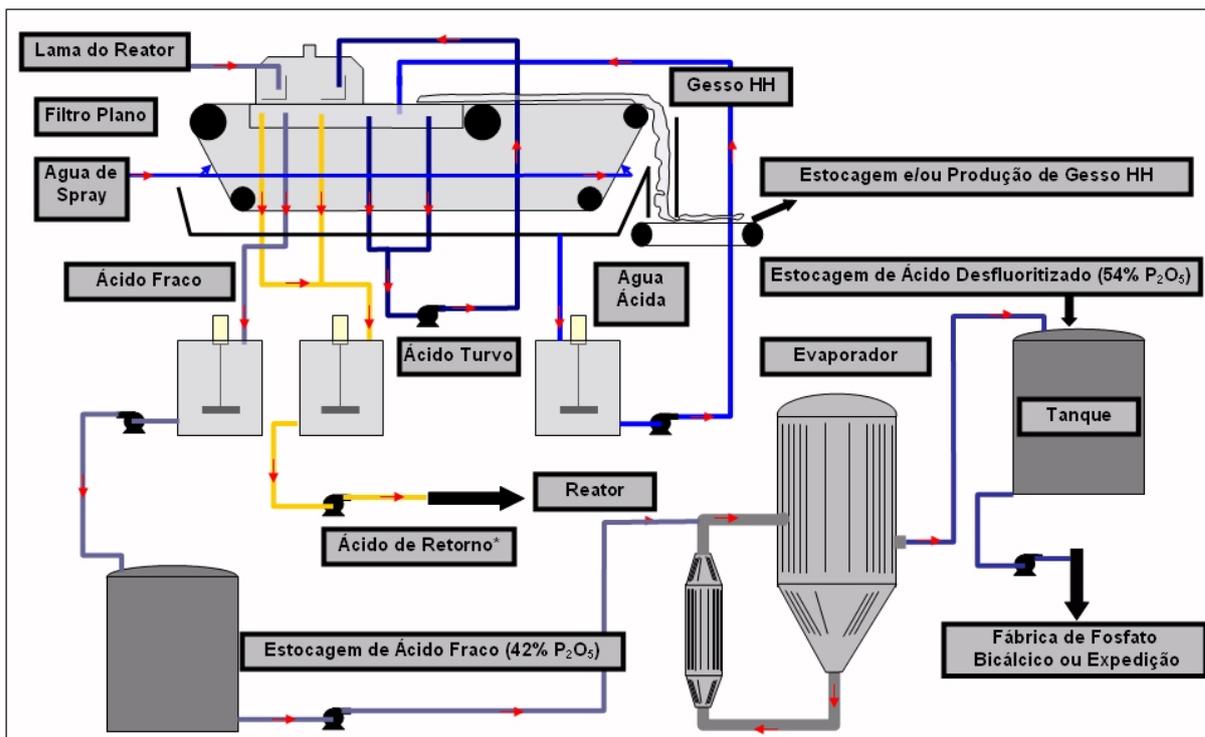
MINA – BRITAGEM



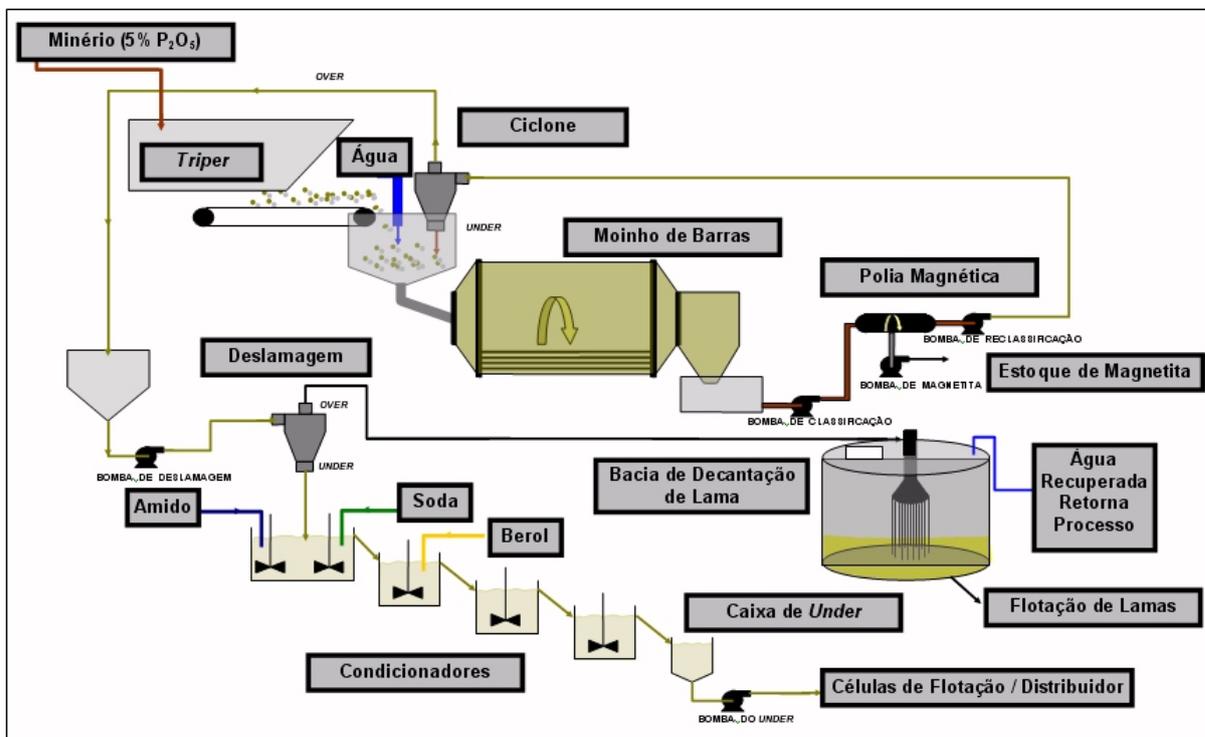
BRITAGEM SECUNDÁRIA



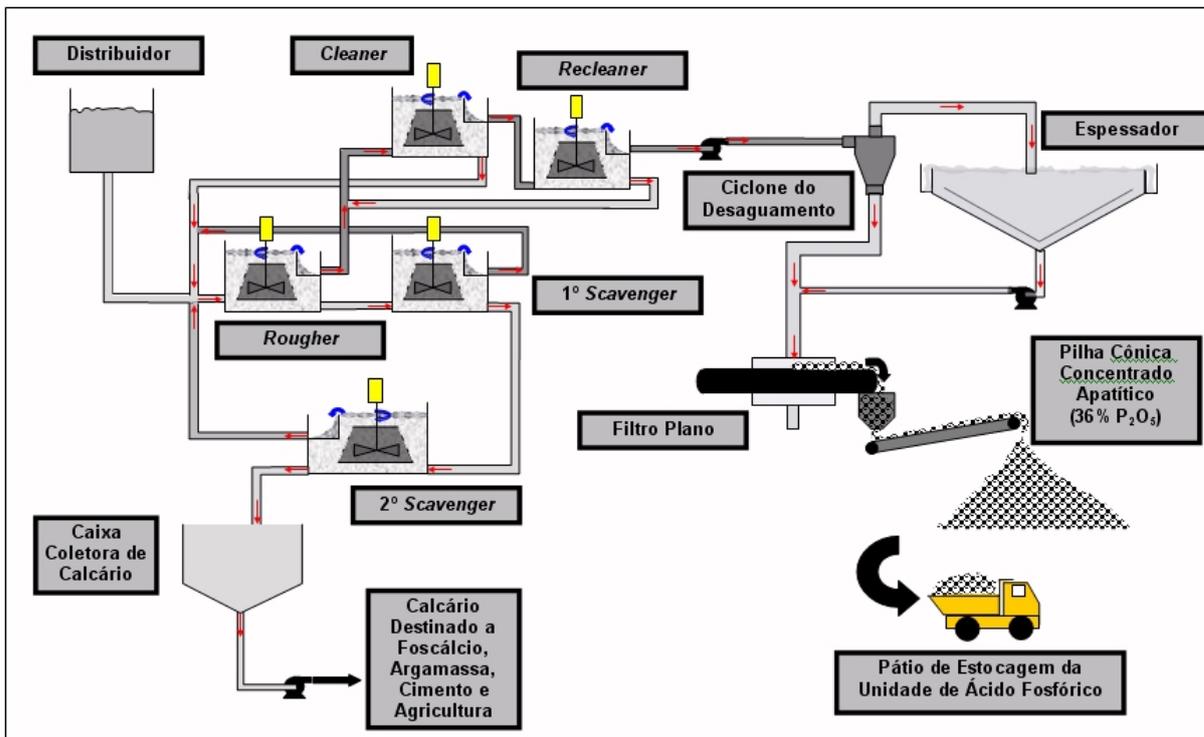
EMPILHAMENTO E RETOMAGEM



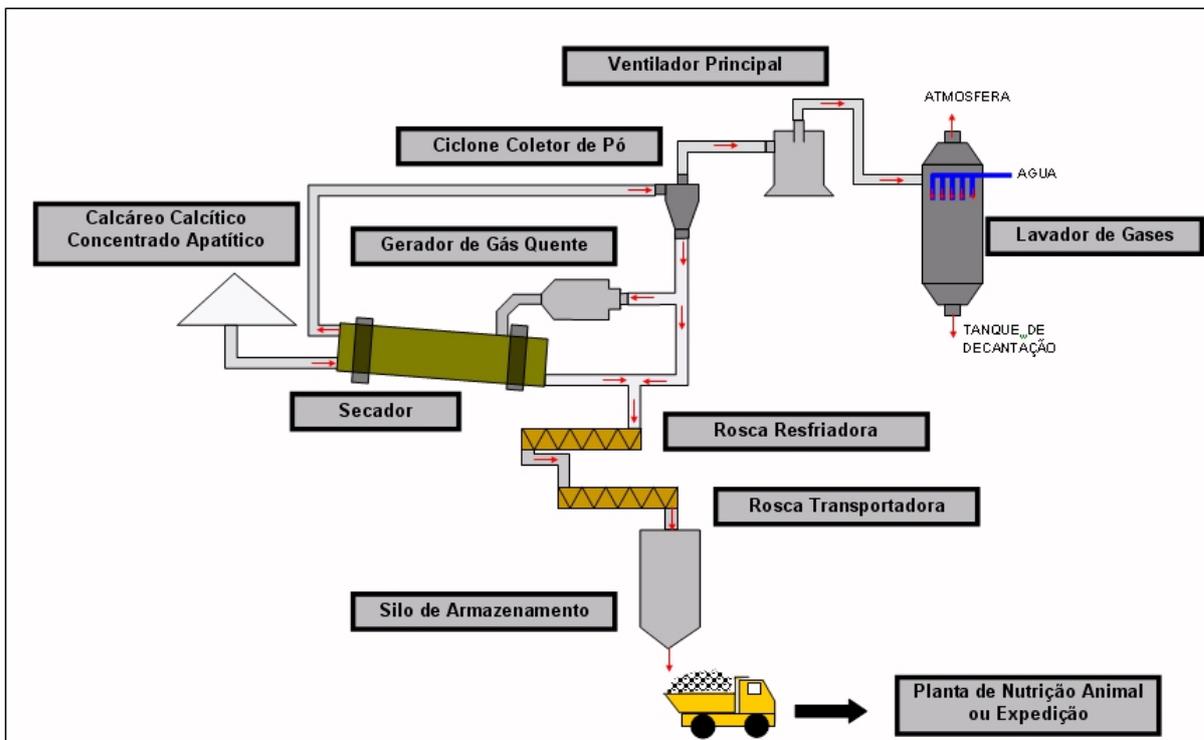
MOAGEM E CONDICIONAMENTO



FLOTAÇÃO

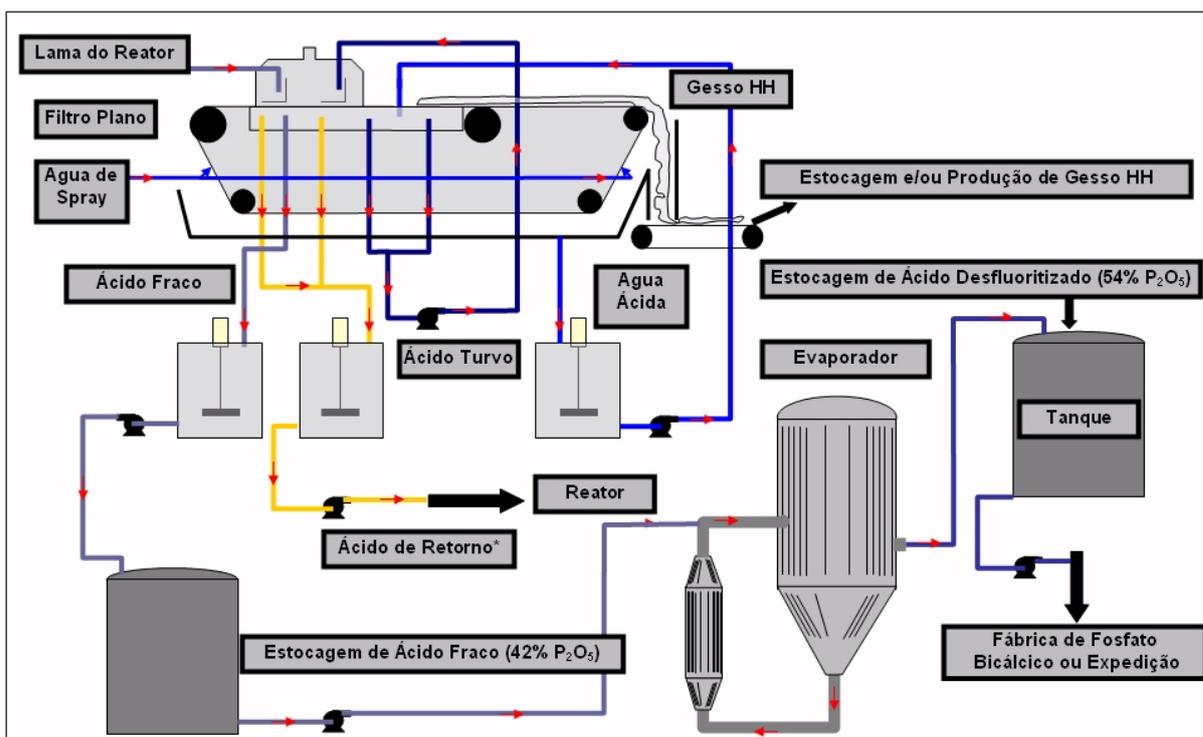


SECAGEM

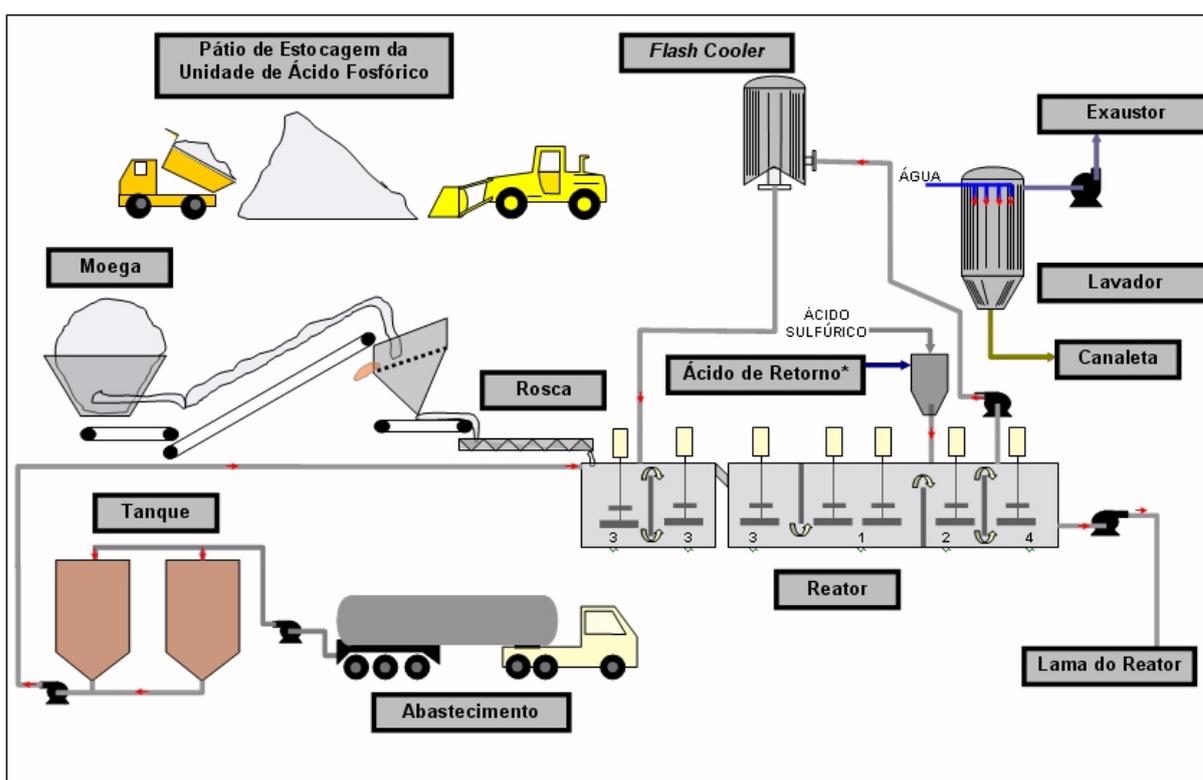


ANEXO B – SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO - CROQUI DO COMPLEXO QUÍMICO

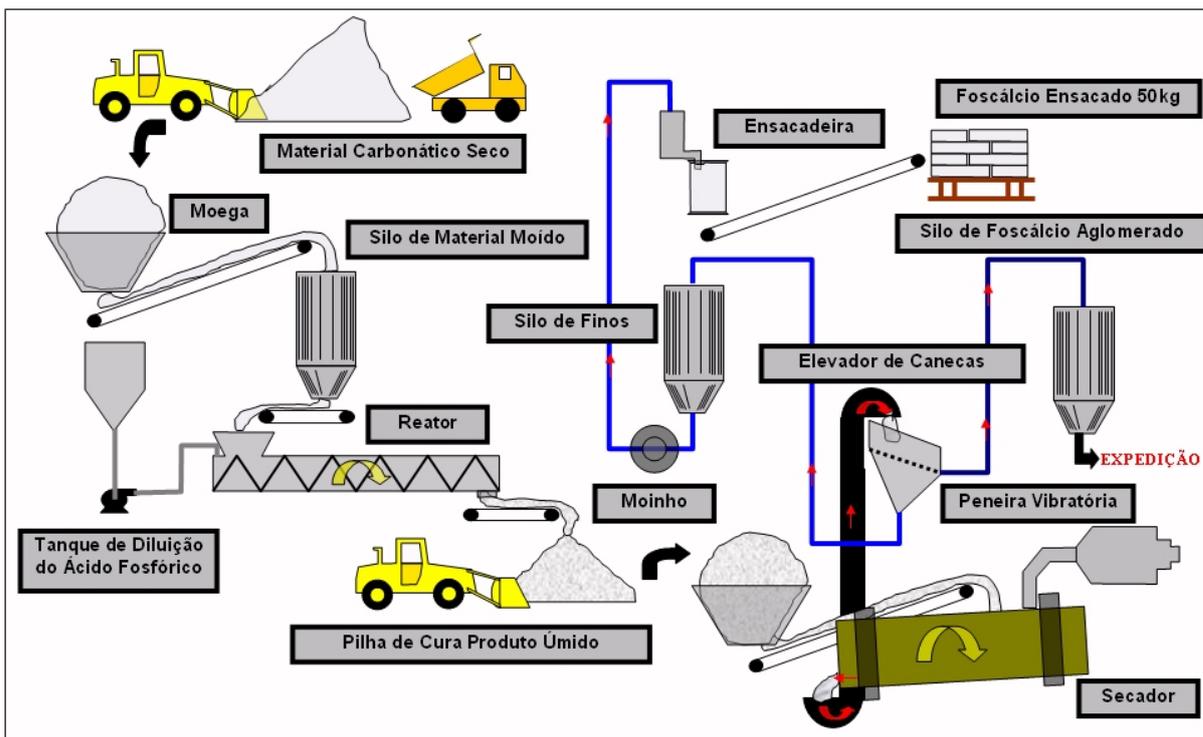
FILTRAGEM E DESFLUORITIZAÇÃO



PRODUÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO



PRODUÇÃO DE FOSFATO BICÁLCICO



ANEXO C – DESCRIÇÕES ESTEREOMICROSCÓPICAS DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

PRODUTO +0,00 A

✓ FLUTUADO

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de magnetita, por vezes associadas a carbonatos; - Poucas partículas de carbonatos e olivina com inclusões de magnetita; - Poucas partículas de mica castanha, em geral liberadas, raramente associadas a magnetita; - Raras partículas de mica verde, repletas de inclusões de magnetita.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de magnetita, por vezes associadas a carbonatos, mica e apatita; - Partículas de mica com inclusões de magnetita; - Poucos aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja, em geral associados a magnetita.

✓ AFUNDADO

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de magnetita; - Abundância de partículas liberadas de ilmenita; - Partículas de mica, piroxênio e olivina associadas a magnetita; - Raras partículas de apatita, sulfetos, serpentina com inclusões de magnetita.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de ilmenita; - Partículas liberadas de magnetita; - Partículas de mica, olivina e apatita associadas a magnetita; - Raras partículas de anfibólio, sulfetos e apatita, associadas a magnetita.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de magnetita; - Partículas liberadas de ilmenita, - Partículas de piroxênio e olivina associadas a magnetita e também com inclusões; - Poucas partículas de apatita com inclusões de magnetita; - Poucas partículas de mica castanha associadas a magnetita e repletas de inclusões; - Raras partículas de sulfetos.

PRODUTO -0,00+0,25 A✓ **FLUTUADO**

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de mica verde e menor quantidade de mica castanha, com poucas inclusões de magnetita; - Abundância de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja, freqüentemente associadas a carbonatos e olivina; - Partículas de carbonatos associadas a olivina e, menos freqüentemente a mica; - Poucas partículas liberadas de serpentina; - Raras partículas de anfibólio, piroxênio e apatita associadas a mica e carbonatos.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de mica castanha e verde, repletas de inclusões de magnetita; - Abundância de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja¹, freqüentemente associadas a magnetita e olivina; - Partículas de serpentina e carbonatos, repletas de inclusões de magnetita e olivina.

1- Mineral mais abundante na amostra B-10F304/3-ZR.

✓ **AFUNDADO**

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de piroxênio marrom, com raras inclusões de magnetita; - Abundância de partículas de olivina incolor e preta¹; - Partículas liberadas de mica, serpentina² e anfibólio, por vezes com inclusões de magnetita; - Poucas partículas de carbonatos e apatita, associadas a olivina; - Raras partículas de sulfetos.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Abundância de partículas de olivina incolor e preta¹, por vezes associadas a serpentina e anfibólio e com inclusões de magnetita; - Partículas de piroxênio marrom e mica, por vezes associadas a olivina; - Poucas partículas liberadas de serpentina e anfibólio³; - Raras partículas de sulfetos e apatita, associadas a olivina.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de piroxênio marrom, com raras inclusões de magnetita; - Partículas de olivina incolor e preta com raras inclusões de magnetita e, por vezes, associadas a piroxênio; - Partículas liberadas de mica castanha; - Poucas partículas de anfibólio e serpentina, por vezes associadas a olivina.

1- Mineral mais abundante nas amostras B-10F304/3 e B30F304/3-ZR.

2- Mineral mais abundante na amostra B30F688.

3- Mineral mais abundante na amostra B30F689/4-ZR.

PRODUTO -0,25+0,50 A✓ *FLUTUADO*

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de mica verde e castanha, com raras inclusões de magnetita e olivina, e associações com carbonatos e magnetita; - Abundância de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja¹, por vezes com associadas a olivina; - Partículas liberadas de carbonatos, por vezes associadas a mica; - Poucas partículas de serpentina; - Raras partículas de olivina e anfibólio, associadas a carbonatos.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de mica castanha e verde, com poucas de inclusões de magnetita e olivina; - Aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja¹, por vezes com inclusões de magnetita; - Partículas de carbonatos, freqüentemente com inclusões e associados a olivina; - Poucas partículas de serpentina, anfibólio e olivina, freqüentemente associadas a carbonatos.

1- Mineral mais abundante nas amostras B30F688 e B-10F304/3-ZR.

✓ *AFUNDADO*

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de piroxênio marrom; - Abundância de partículas liberadas de olivina incolor e preta¹; - Partículas liberadas de anfibólio, serpentina e mica castanha; - Raras partículas de mica e apatita, em geral liberada e com poucas inclusões de olivina.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas de olivina incolor e preta, por vezes associados a apatita - Abundância de partículas de piroxênio marrom; - Partículas liberadas de anfibólio; - Partículas de mica, freqüentemente com inclusões de olivina; - Poucas partículas de serpentina; - Raras partículas de apatita.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de piroxênio marrom; - Partículas de olivina incolor e preta, por vezes associadas a piroxênio e com inclusões; - Partículas de mica castanha, com poucas inclusões de olivina; - Partículas de anfibólio, com raras inclusões de olivina; - Poucas partículas de serpentina, com raras inclusões de olivina.

1- Mineral mais abundante na amostra B30F688.

PRODUTO -0,50+0,75 A✓ *FLUTUADO*

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de mica verde e castanha, com raras inclusões de olivina; - Partículas liberadas de carbonatos; - Aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja¹; - Poucas partículas de serpentina e olivina; - Raras partículas de anfibólio e apatita.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de mica castanha, seguida de mica verde, com raras de inclusões de olivina; - Abundância de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja¹, com raras inclusões de olivina; - Abundância de partículas de carbonatos, por vezes associadas a olivina; - Poucas partículas de anfibólio e serpentina, freqüentemente associadas a carbonatos.

1- Mineral mais abundante nas amostras B30F688 e B-10F304/3-ZR.

✓ *AFUNDADO*

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de olivina incolor, preta e laranja¹; - Abundância de partículas liberadas de piroxênio verde-claro²; - Partículas liberadas de mica castanha, apatita e carbonatos, por vezes associadas a olivina e com inclusões; - Poucas partículas de serpentina², por vezes associadas a olivina e com inclusões; - Raras partículas de sulfetos.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas de olivina incolor, preta e laranja, freqüentemente associadas a carbonatos, e raramente a anfibólio; - Partículas liberadas de mica; - Partículas de anfibólio; - Poucas partículas de serpentina, por vezes associadas a olivina; - Raras partículas de piroxênio e sulfetos.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de olivina incolor e preta, por vezes associadas a piroxênio, carbonatos e apatita; - Abundância de partículas de carbonatos, freqüentemente com inclusões e associadas a olivina; - Abundância de partículas liberadas de piroxênio verde-claro e mica; - Partículas de serpentina, anfibólio e apatita, por vezes com inclusões e associadas a olivina; - Raras partículas de olivina laranja e sulfetos.

1- Minerais mais abundantes na amostra B-10F304/3.

2- Mineral mais abundante na amostra B30F689/4.

PRODUTO -0,75+1,00 A✓ *FLUTUADO*

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de carbonatos, com poucas inclusões de olivina; - Partículas liberadas de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja¹; - Partículas liberadas de mica¹; - Raras partículas de olivina e anfibólio.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de carbonatos; - Aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja; - Poucas partículas de mica, freqüentemente com inclusões de olivina; - Raras partículas de serpentina e anfibólio.

1- Minerais mais abundantes nas amostras B-10F304/3 e B-10F304/3-ZR.

✓ *AFUNDADO*

Amostras totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas de apatita, raramente associadas a olivina e com inclusões; - Partículas liberadas de olivina incolor, preta e laranja¹; - Poucas partículas liberadas de serpentina e mica; - Raras partículas de sulfetos.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas de apatita, raramente associadas a olivina e anfibólio, e com inclusões; - Partículas liberadas de olivina incolor, preta e laranja¹; - Poucas partículas de carbonatos e mica verde; - Raras partículas de serpentina, anfibólio e sulfetos.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas de apatita, pouco associadas a olivina e com inclusões, e raras associadas a sulfetos; - Abundância de partículas de carbonatos, freqüentemente com inclusões e associados a olivina; - Partículas liberadas de olivina incolor e preta, e anfibólio; - Raras partículas de piroxênio, mica castanha e sulfetos.

1- Minerais mais abundantes nas amostras B-10F304/3 e B-10F304/3-ZR.

PRODUTO -1,00+1,25 A✓ *FLUTUADO*

Amostras Totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de carbonatos, com raras inclusões de olivina; - Poucas partículas liberadas de olivina e mica; - Raras partículas de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja ⁽¹⁾, serpentina, anfibólio e apatita.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de carbonatos, com raras inclusões de olivina; - Raras partículas de mica ⁽¹⁾, aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja ⁽¹⁾, serpentina e apatita.

1- Minerais mais abundantes nas amostras B30F688 e B-10F304/3-ZR.

✓ *AFUNDADO*

Amostras Totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de apatita, com raras inclusões de olivina; - Poucas partículas de olivina preta ⁽¹⁾, - Raras partículas de mica, serpentina e sulfetos.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de apatita, com raras inclusões de olivina; - Partículas liberadas de olivina preta ⁽¹⁾; - Partículas de carbonatos, freqüentemente associadas a olivina; - Poucas partículas de aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja ⁽¹⁾ e sulfetos; - Raras partículas de serpentina, anfibólio e mica.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de apatita, com poucas inclusões de olivina; - Abundância de partículas de carbonatos, freqüentemente com inclusões e associados a olivina; - Raras partículas liberadas de mica castanha, serpentina, olivina e sulfetos.

1- Minerais mais abundantes nas amostras B30F688 e B-10F304/3-ZR.

PRODUTO -1,25 A✓ *FLUTUADO*

Amostras Totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de carbonatos; - Poucas partículas de mica; - Raras partículas de olivina, aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja⁽¹⁾, serpentina, anfibólio e apatita.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de carbonatos; - Raras partículas de mica⁽¹⁾, aglomerados de partículas microcristalinas de mica laranja^(1*) e apatita.

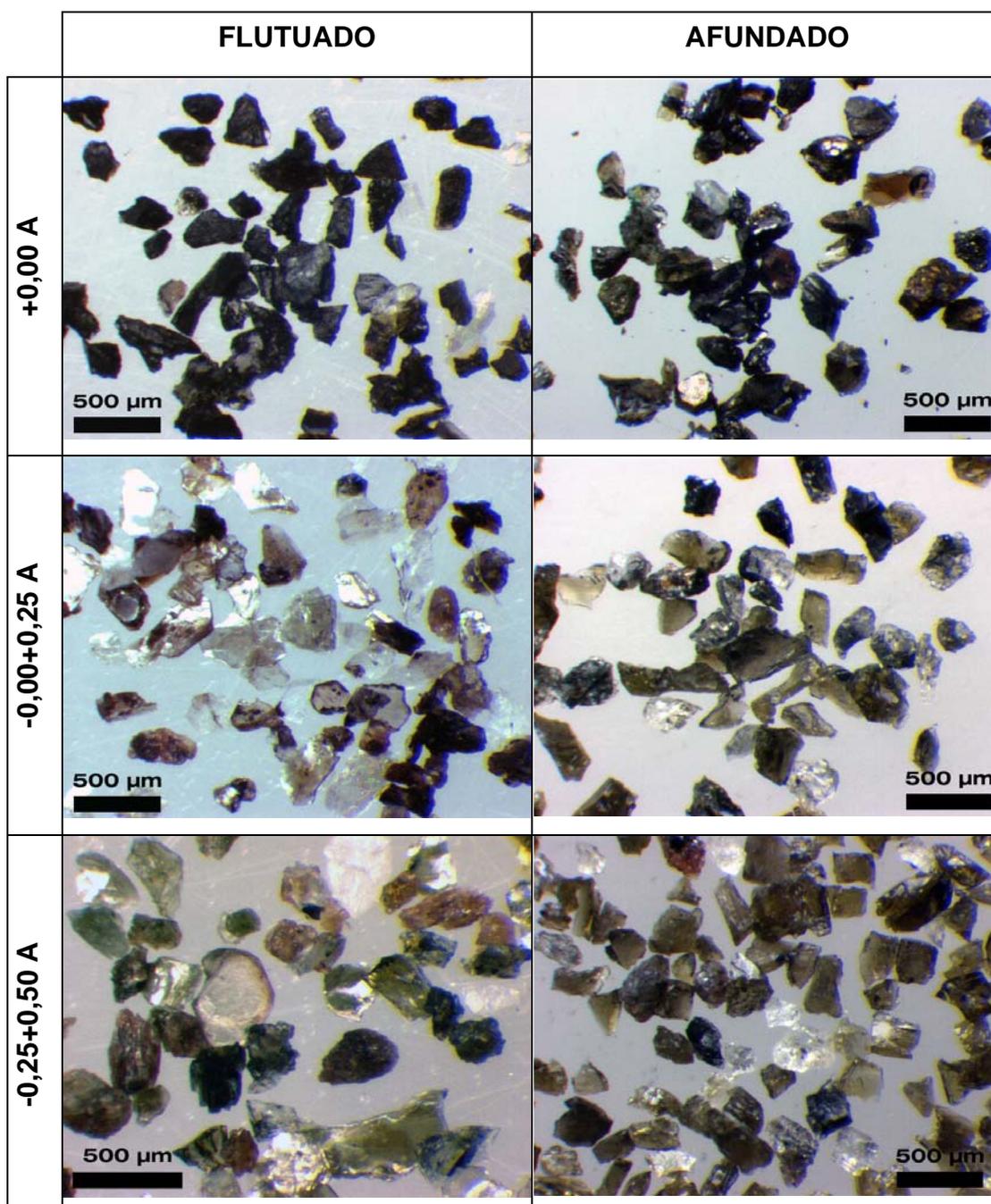
1- Minerais mais abundante nas amostras B30F688 e B-10F304/3-ZR.

✓ *AFUNDADO*

Amostras Totais	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de apatita, com raras inclusões de olivina e sulfetos; - Partículas de carbonatos, por vezes associados a apatita; - Raras partículas de sulfetos e olivina.
Amostras de Zona de Reação	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de apatita; - Poucas partículas carbonatos, mica e olivina, por vezes associadas a apatita.
Amostras de Jacupiranguito	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio de partículas liberadas de apatita, com poucas inclusões de olivina e sulfetos; - Abundância de partículas de carbonatos, freqüentemente com inclusões de olivina; - Poucas partículas liberadas de mica castanha. - Raras partículas de olivina, serpentina e sulfetos.

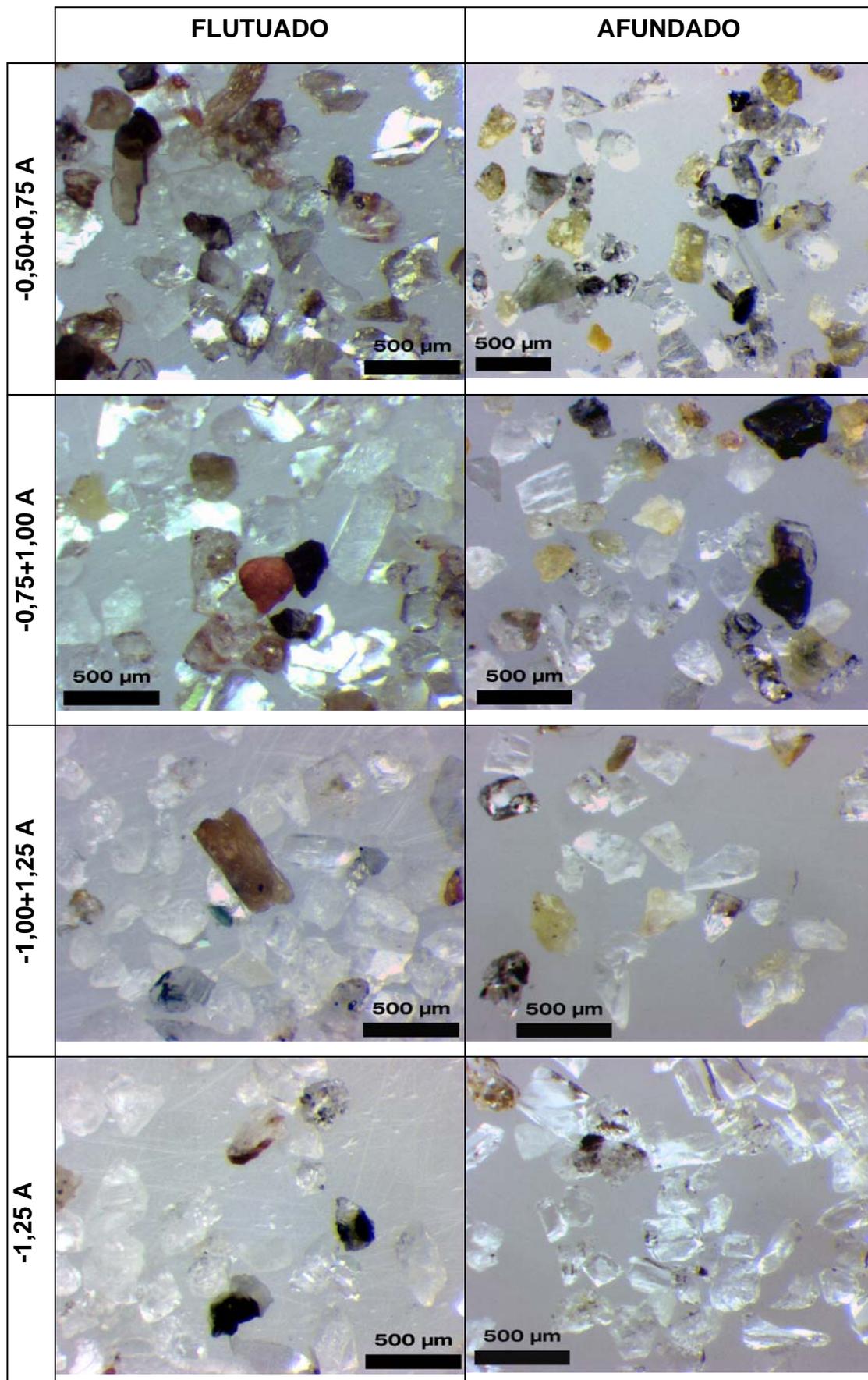
ANEXO D – MICROFOTOGRAFIAS DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA POR ESTEREOMICROSCOPIA

AMOSTRA B30F689/4

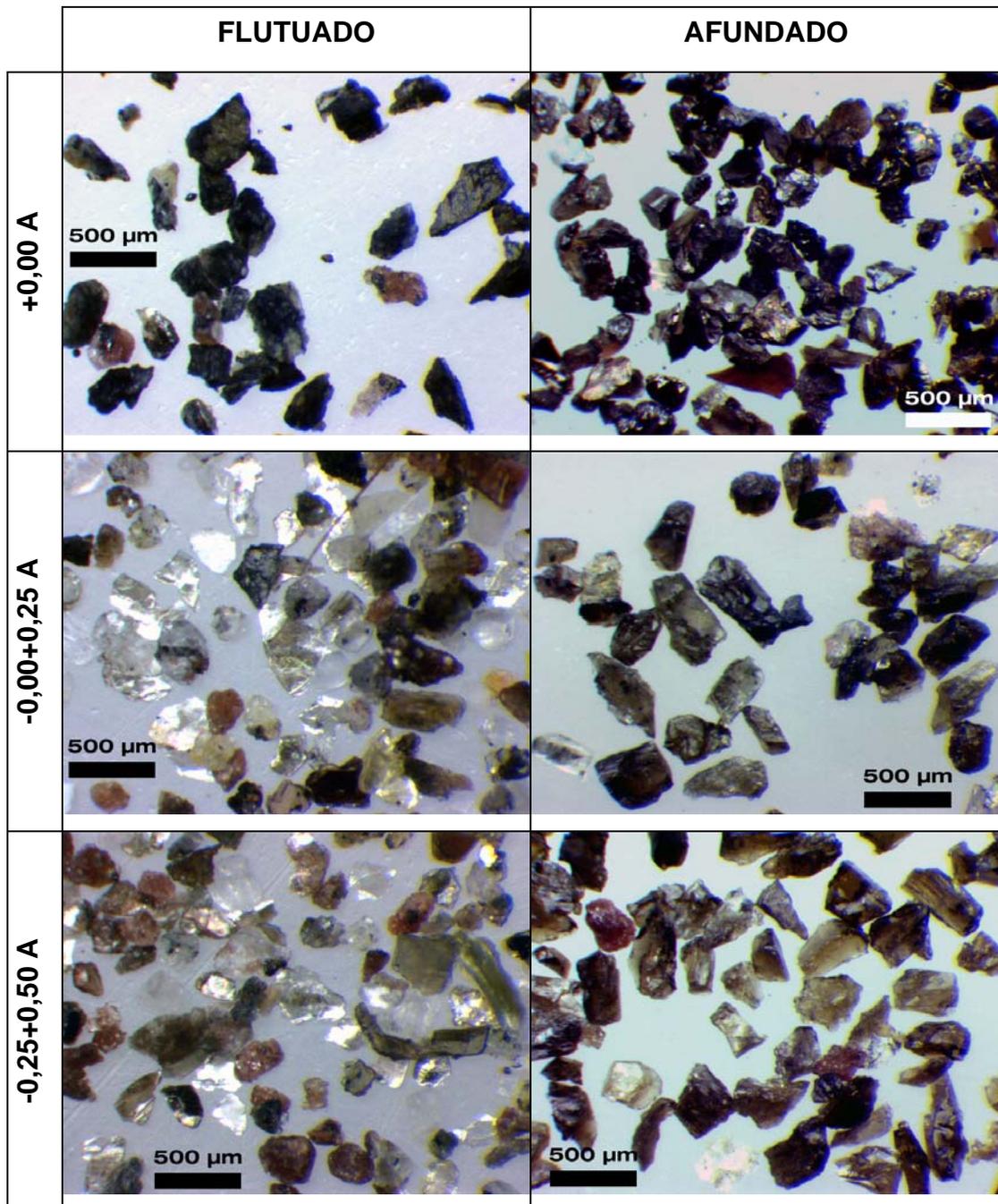


continua

continuação

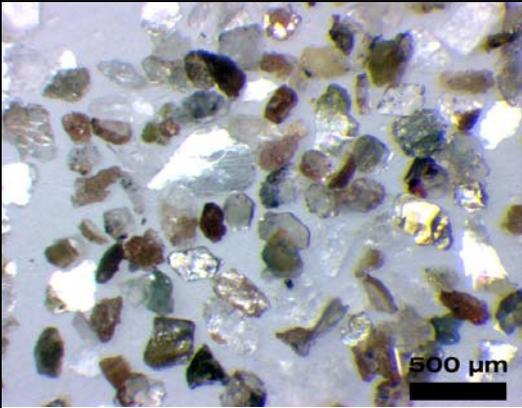
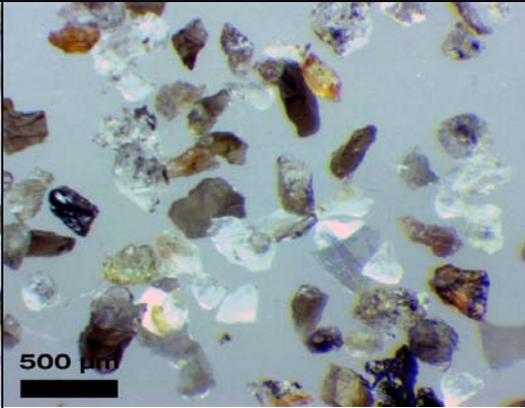
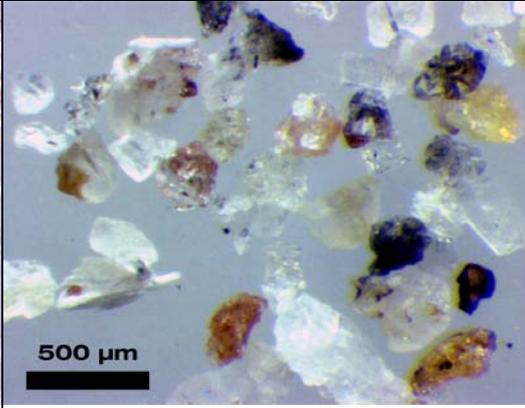
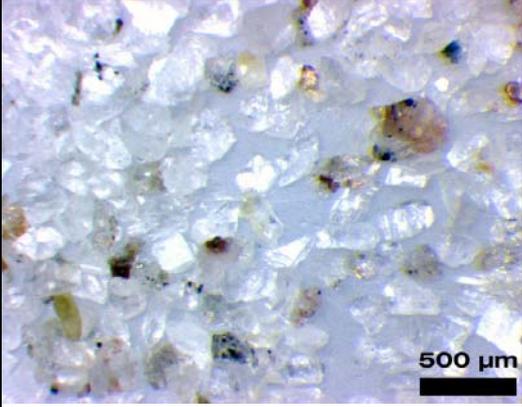
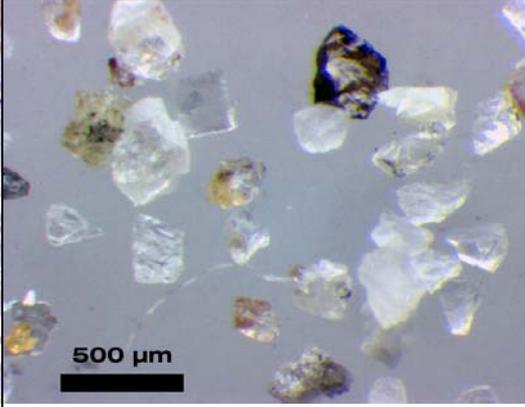
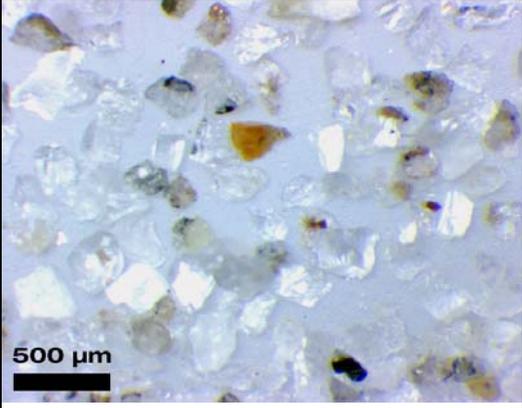
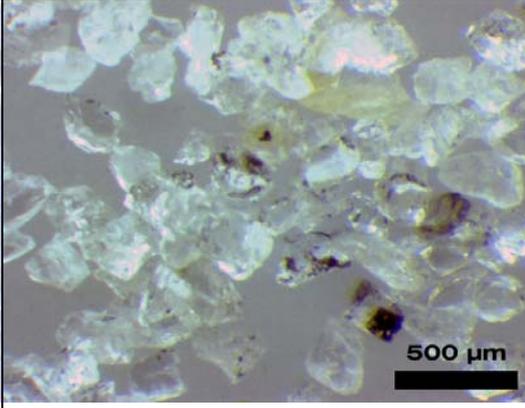


AMOSTRA B-10F340/3

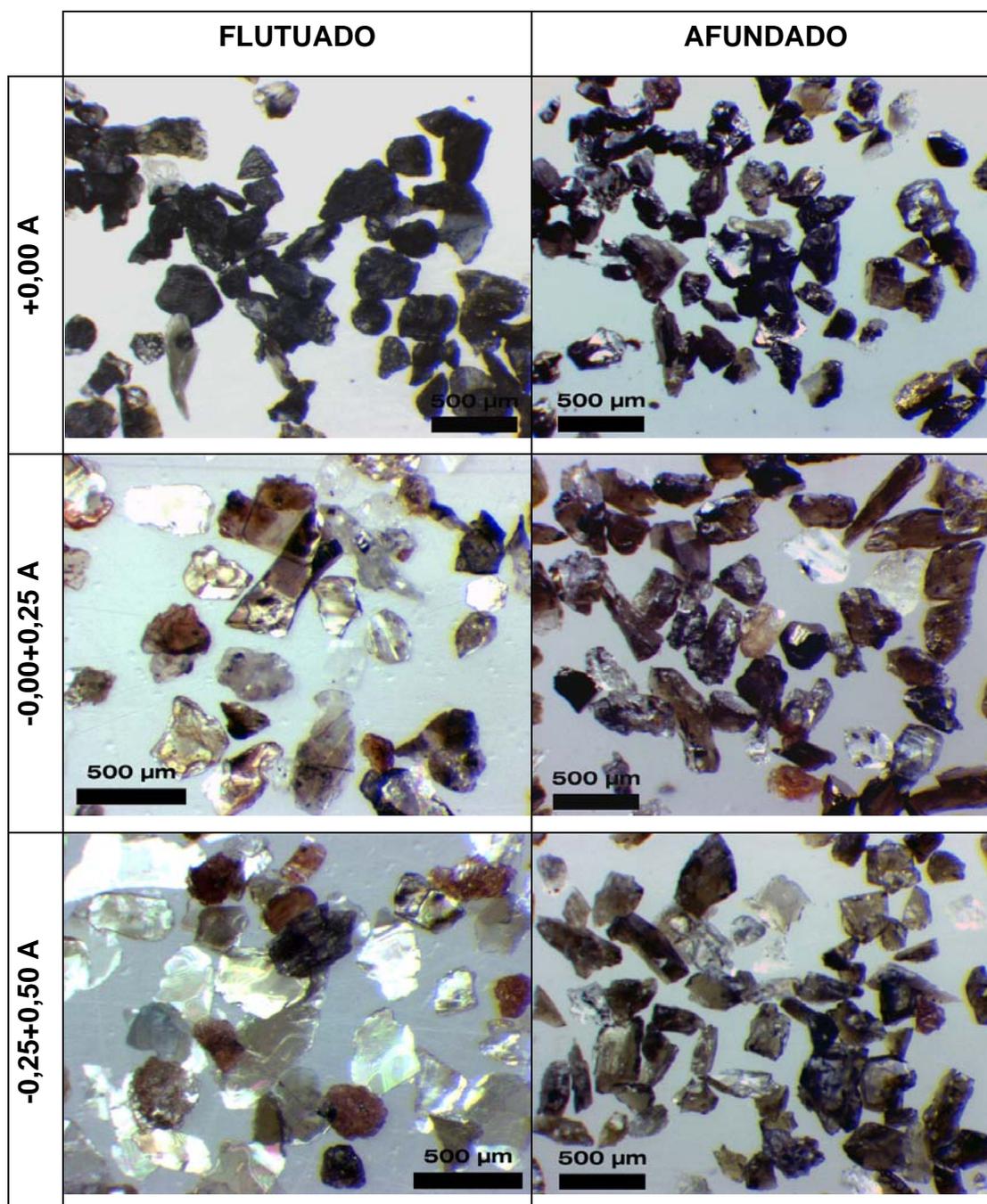


continua

continuação

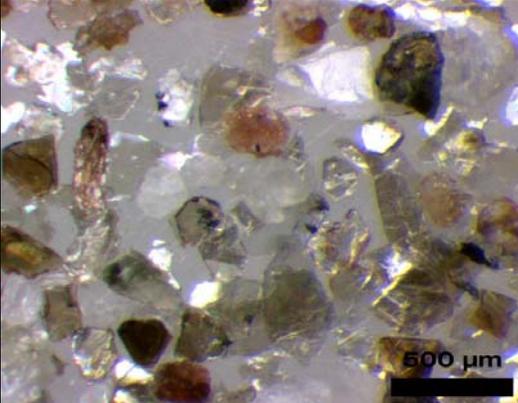
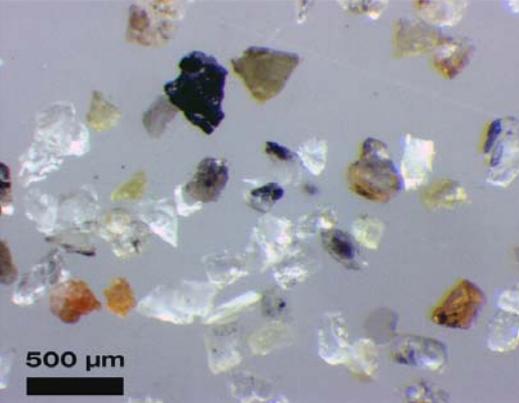
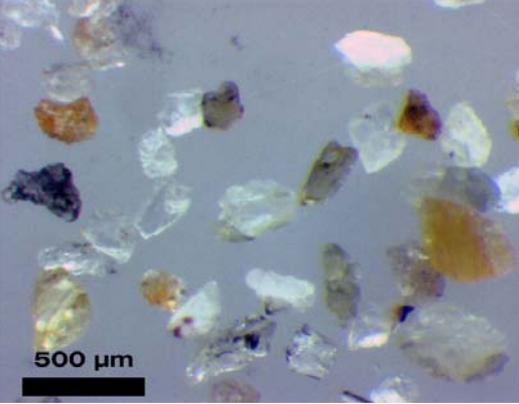
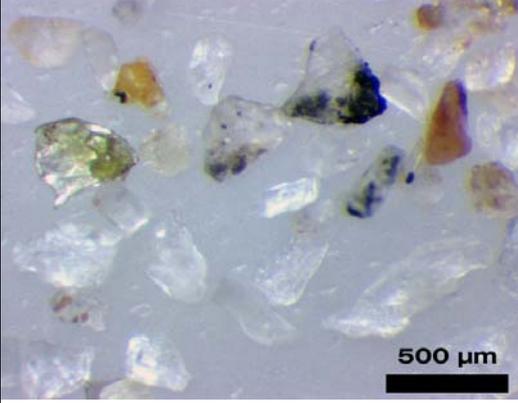
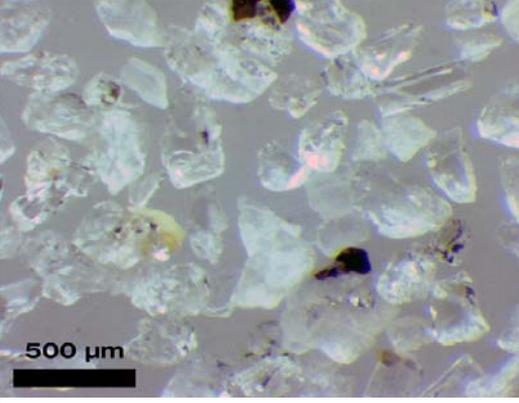
	FLUTUADO	AFUNDADO
-0,50+0,75 A		
-0,75+1,00 A		
-1,00+1,25 A		
-1,25 A		

AMOSTRA B30F688

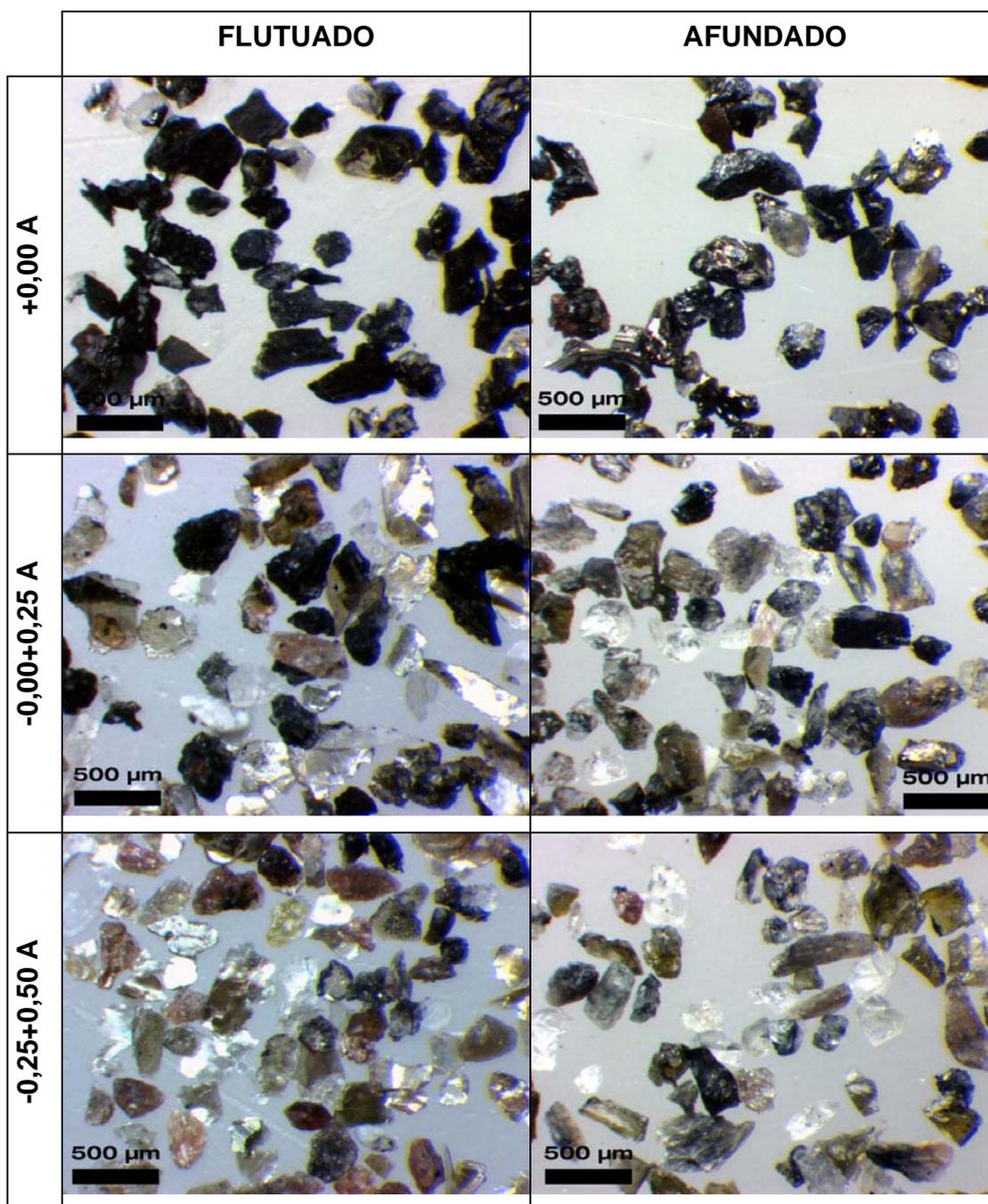


continua

continuação

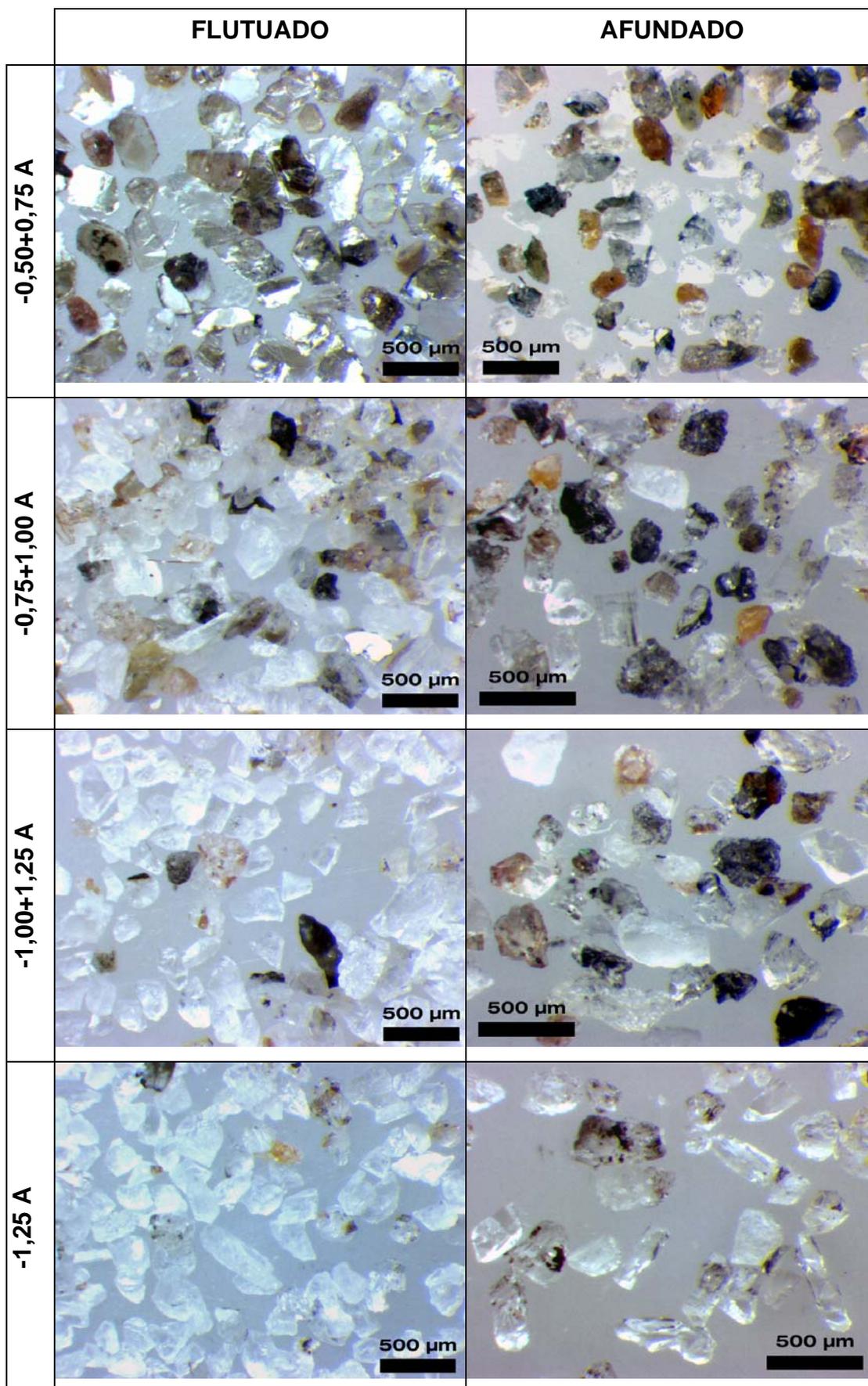
	FLUTUADO	AFUNDADO
-0,50+0,75 A		
-0,75+1,00 A		
-1,00+1,25 A		
-1,25 A		

AMOSTRA B30F689/4-ZR

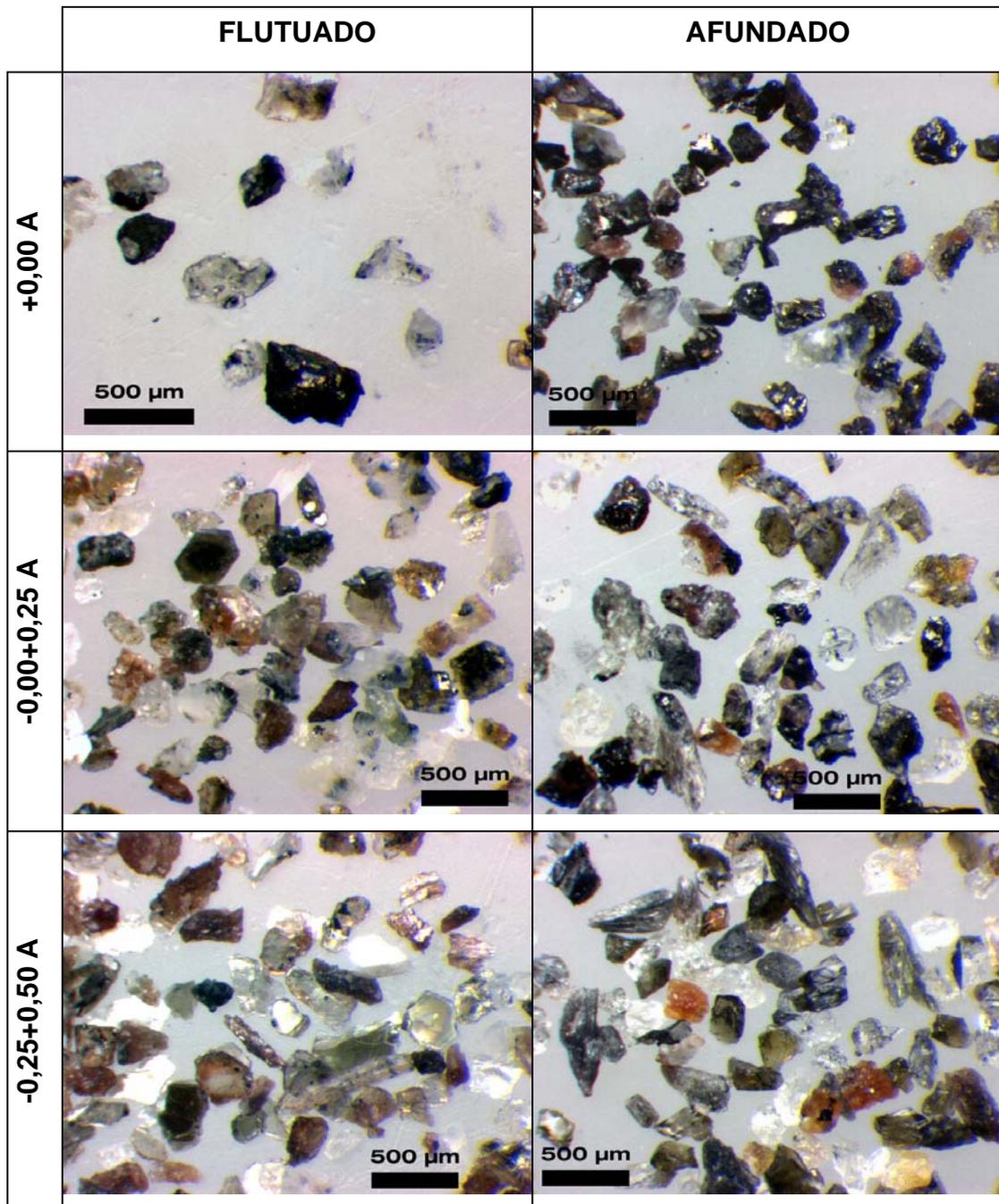


continua

continuação

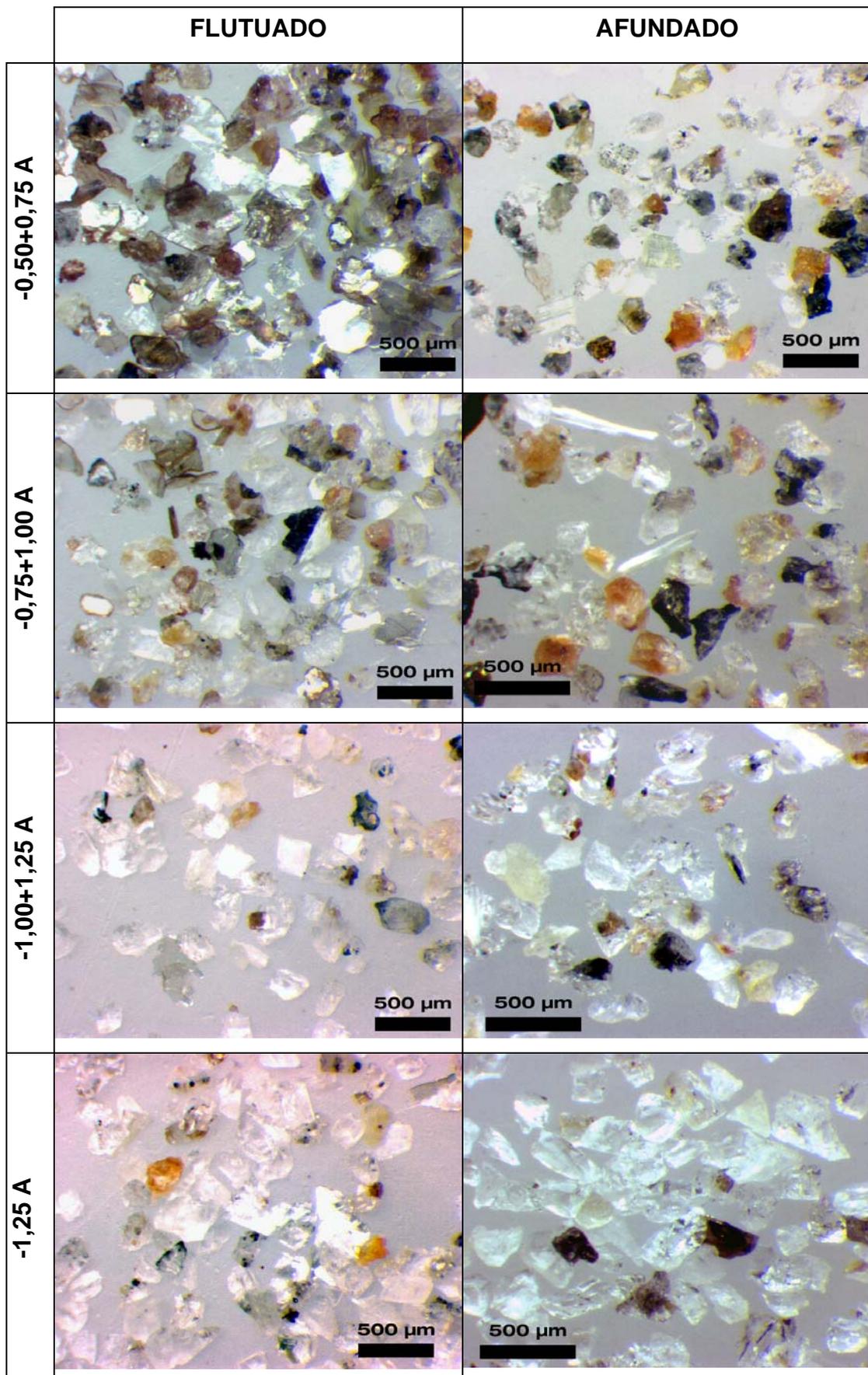


AMOSTRA B-10F304/3-ZR

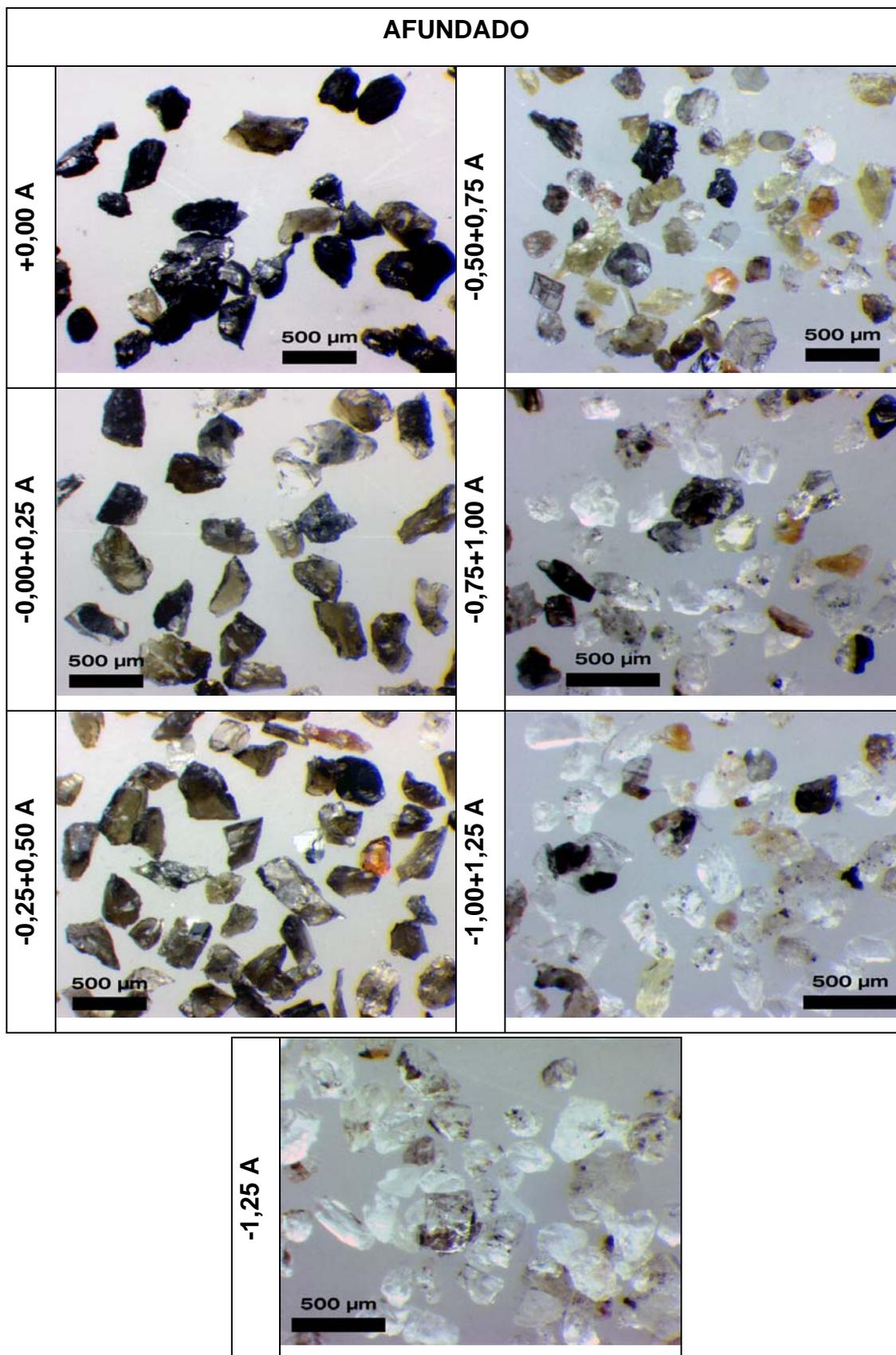


continua

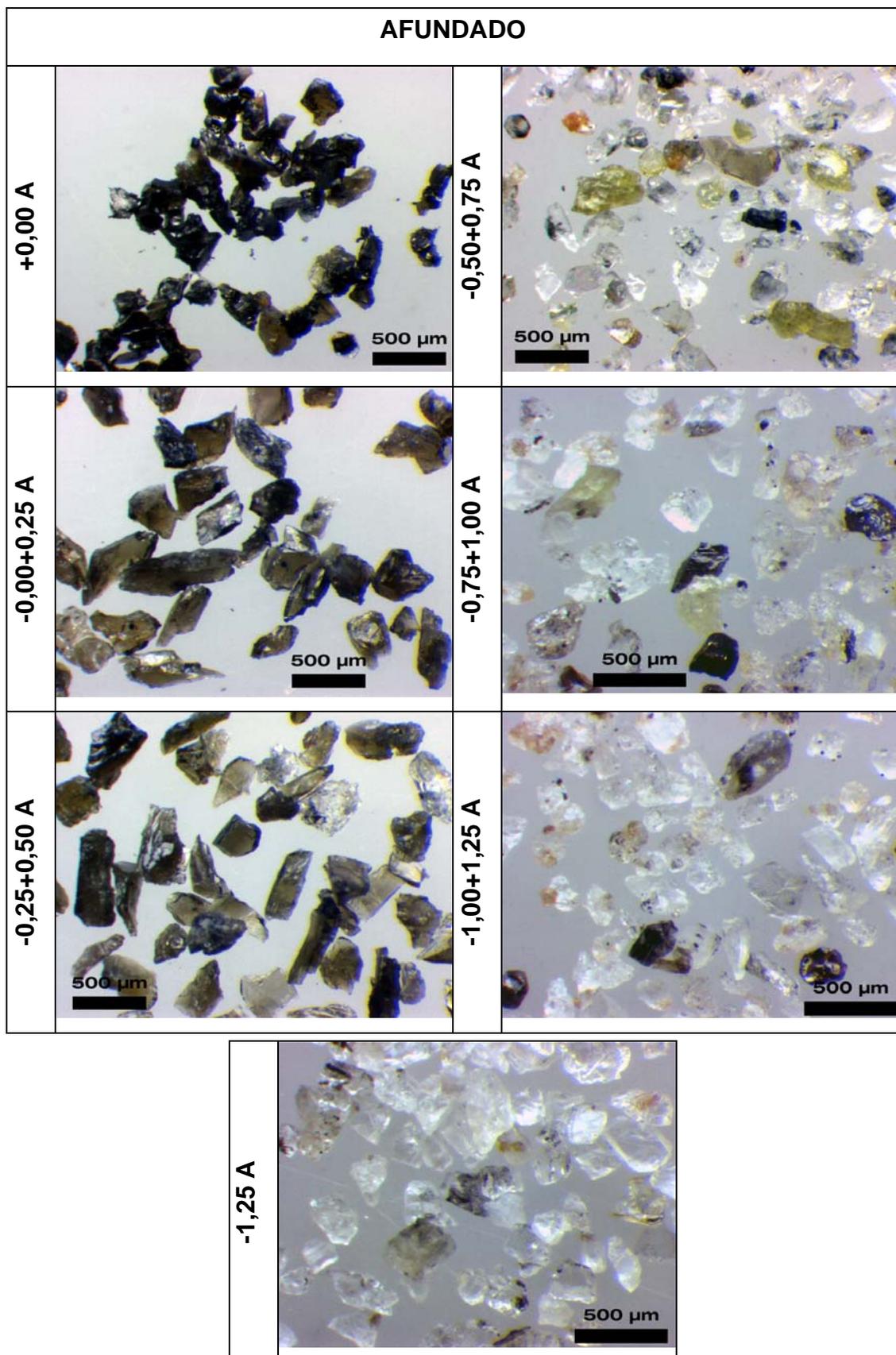
continuação



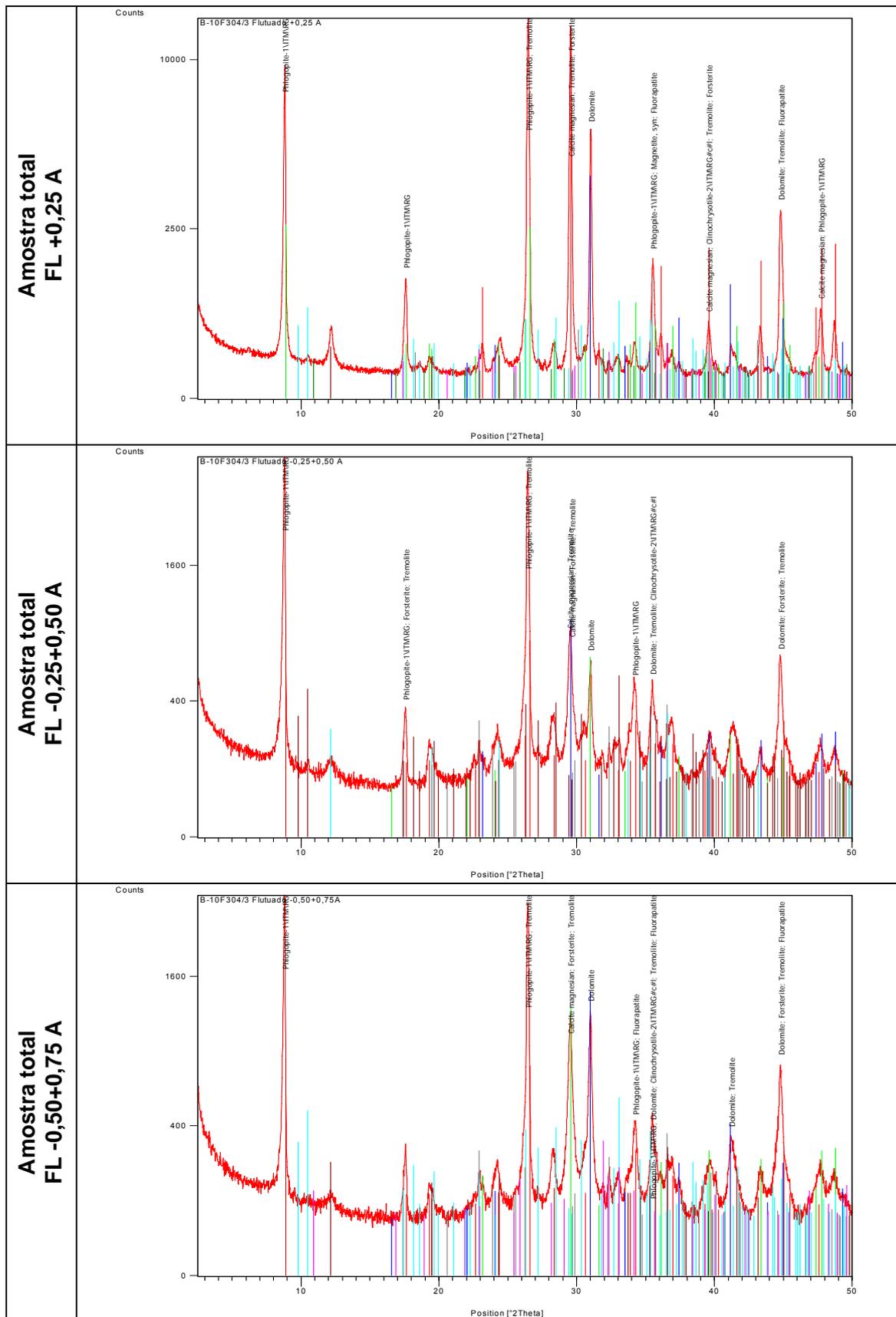
AMOSTRA B30F689/4-J

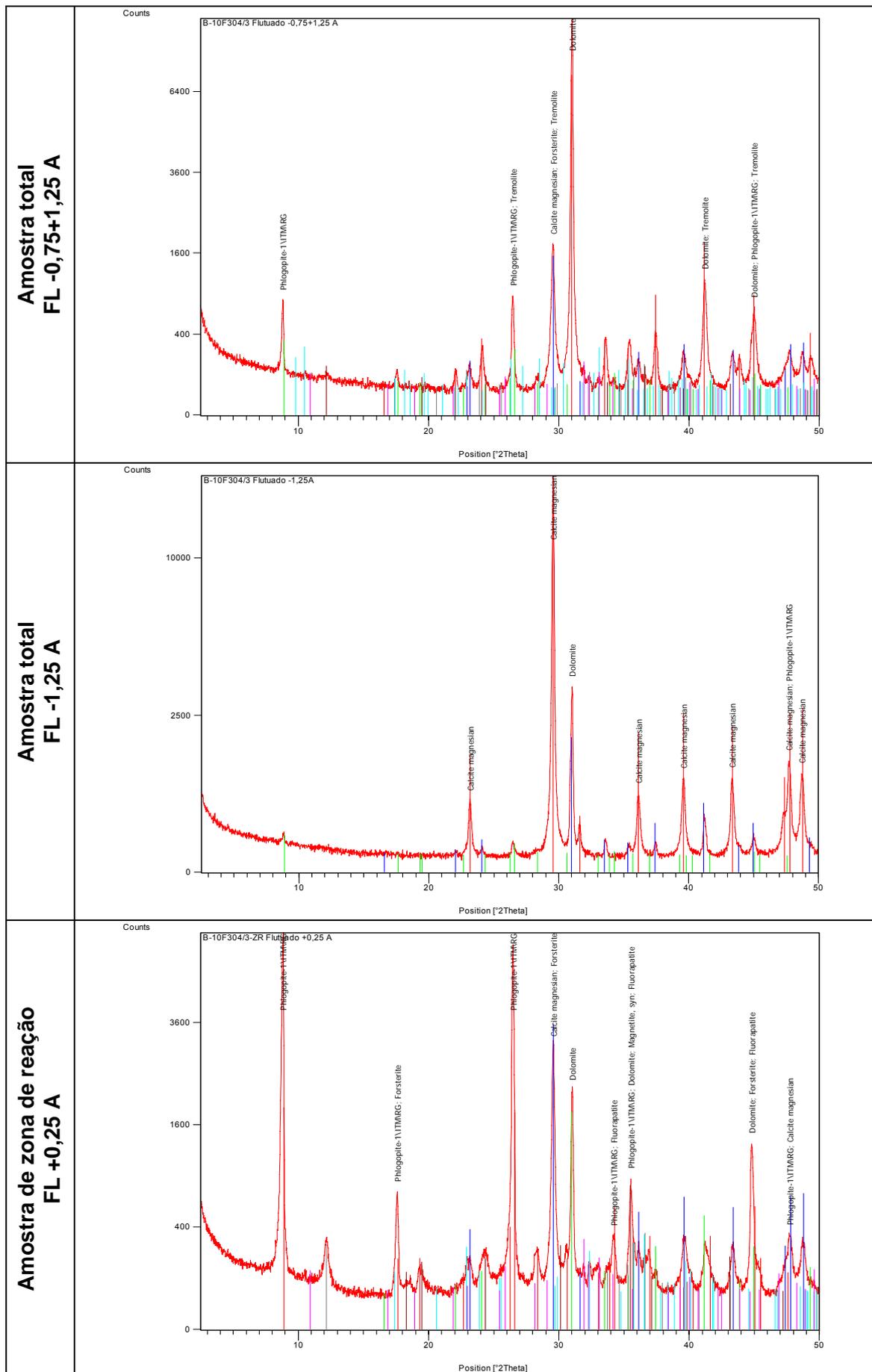


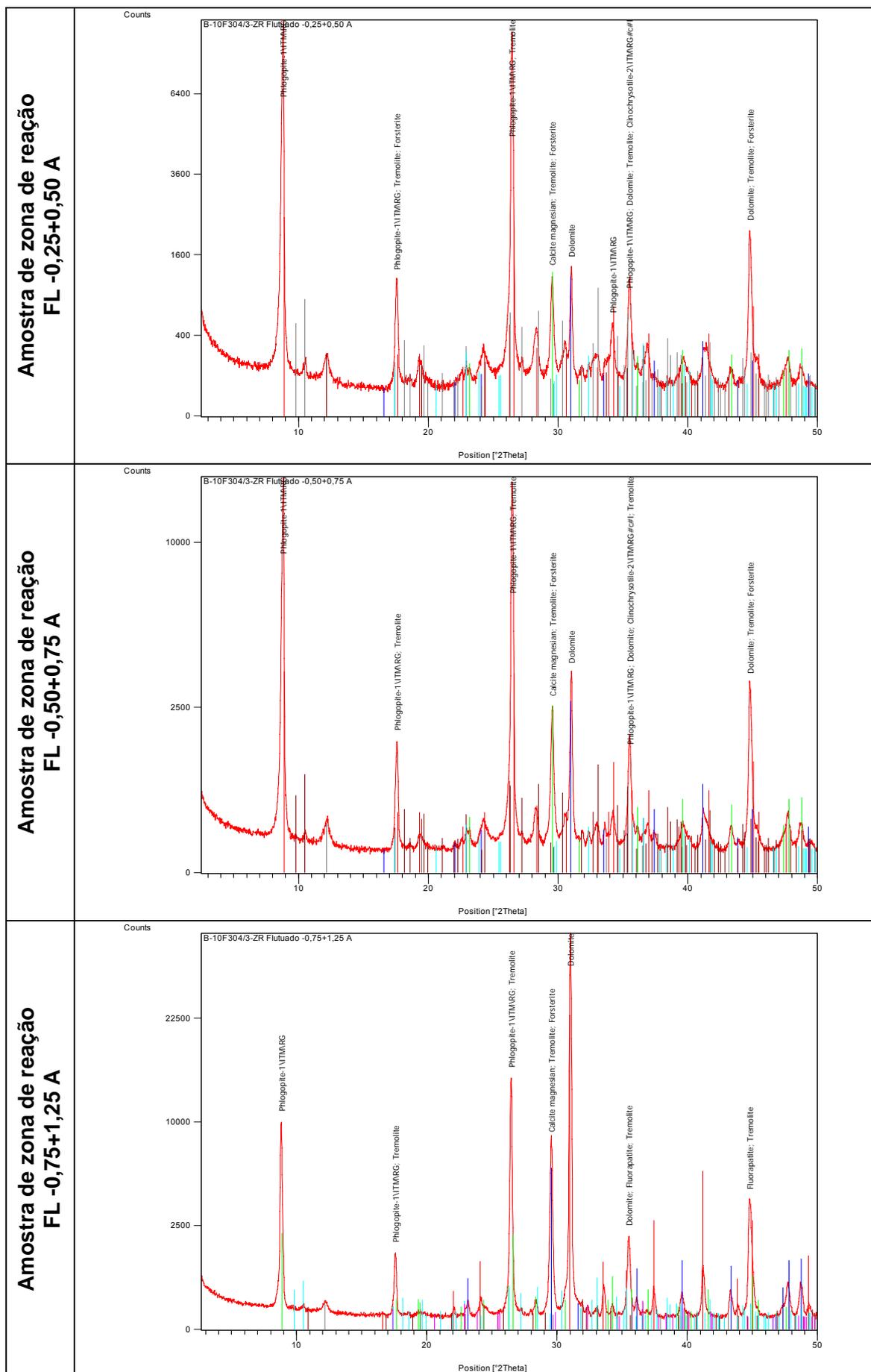
AMOSTRA B-10F304/3-J

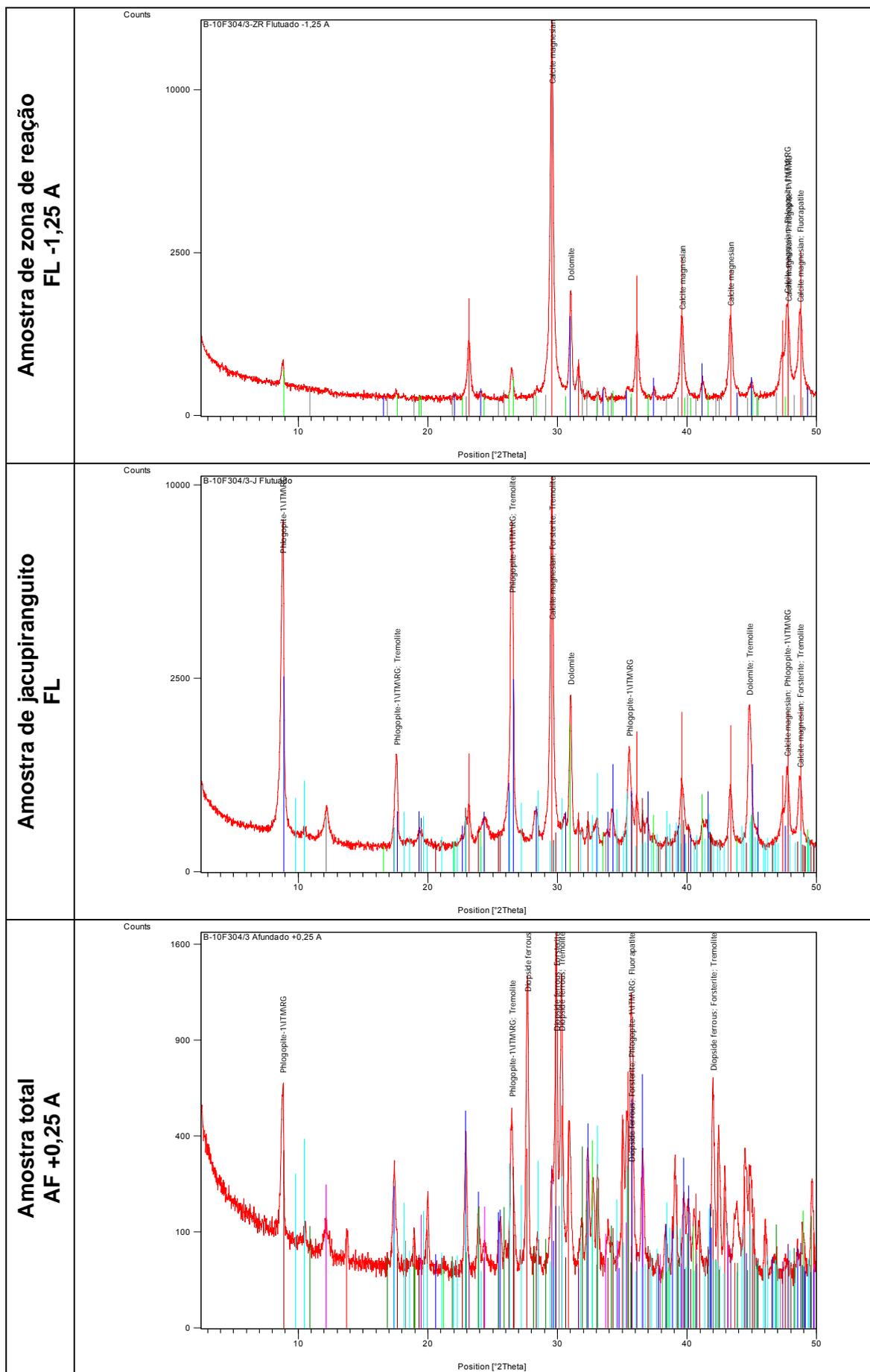


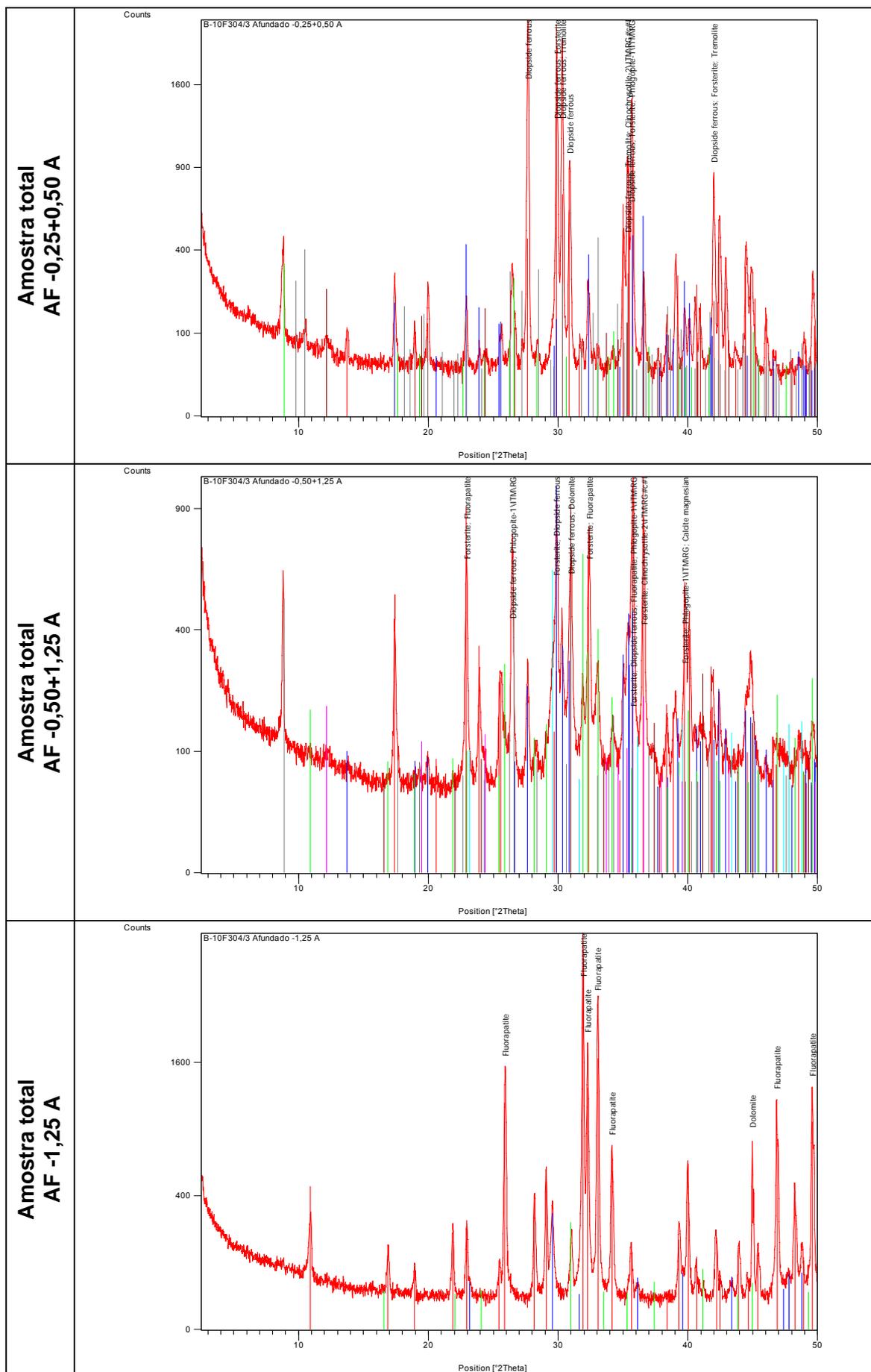
ANEXO E – DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X

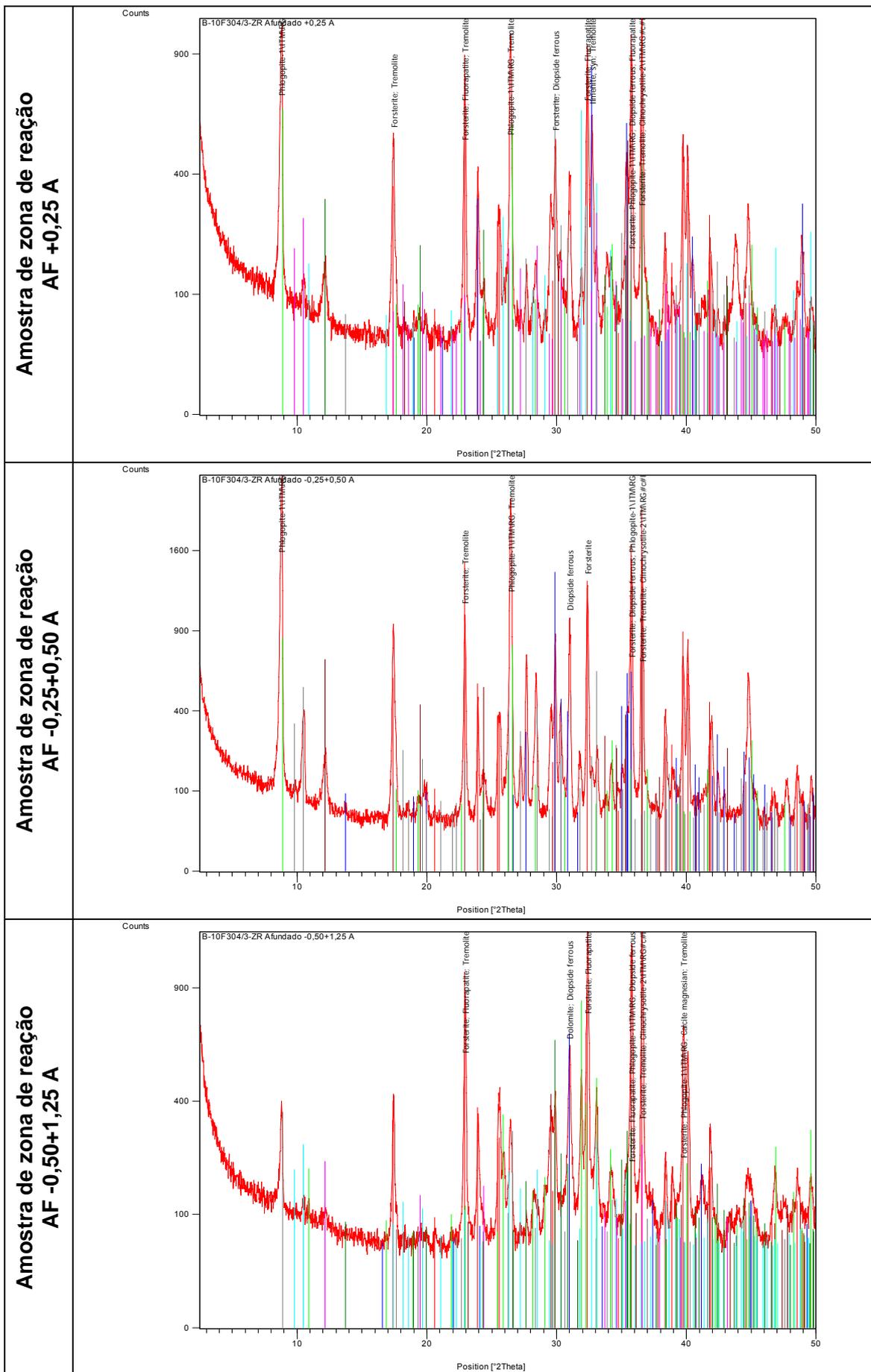


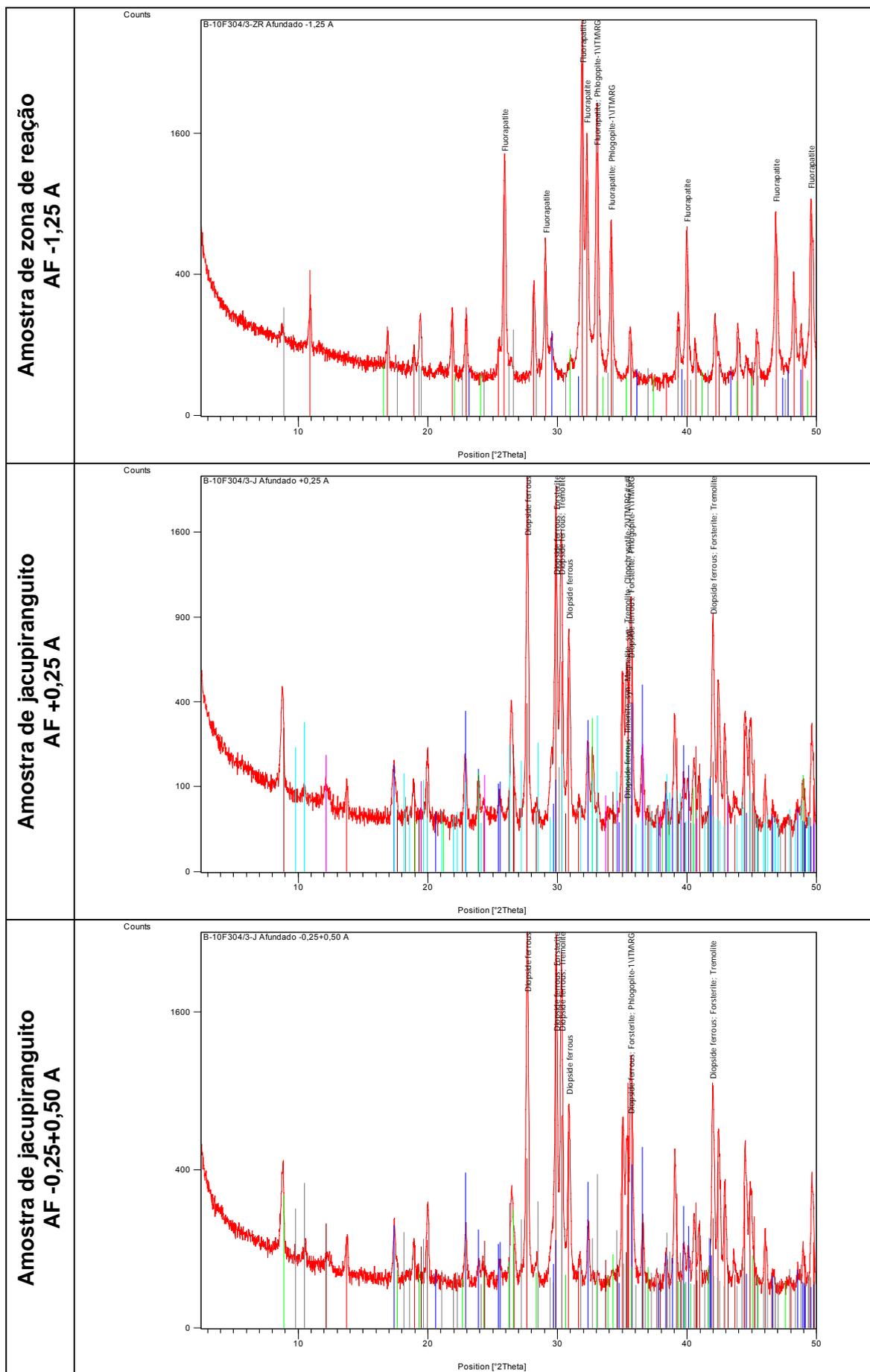


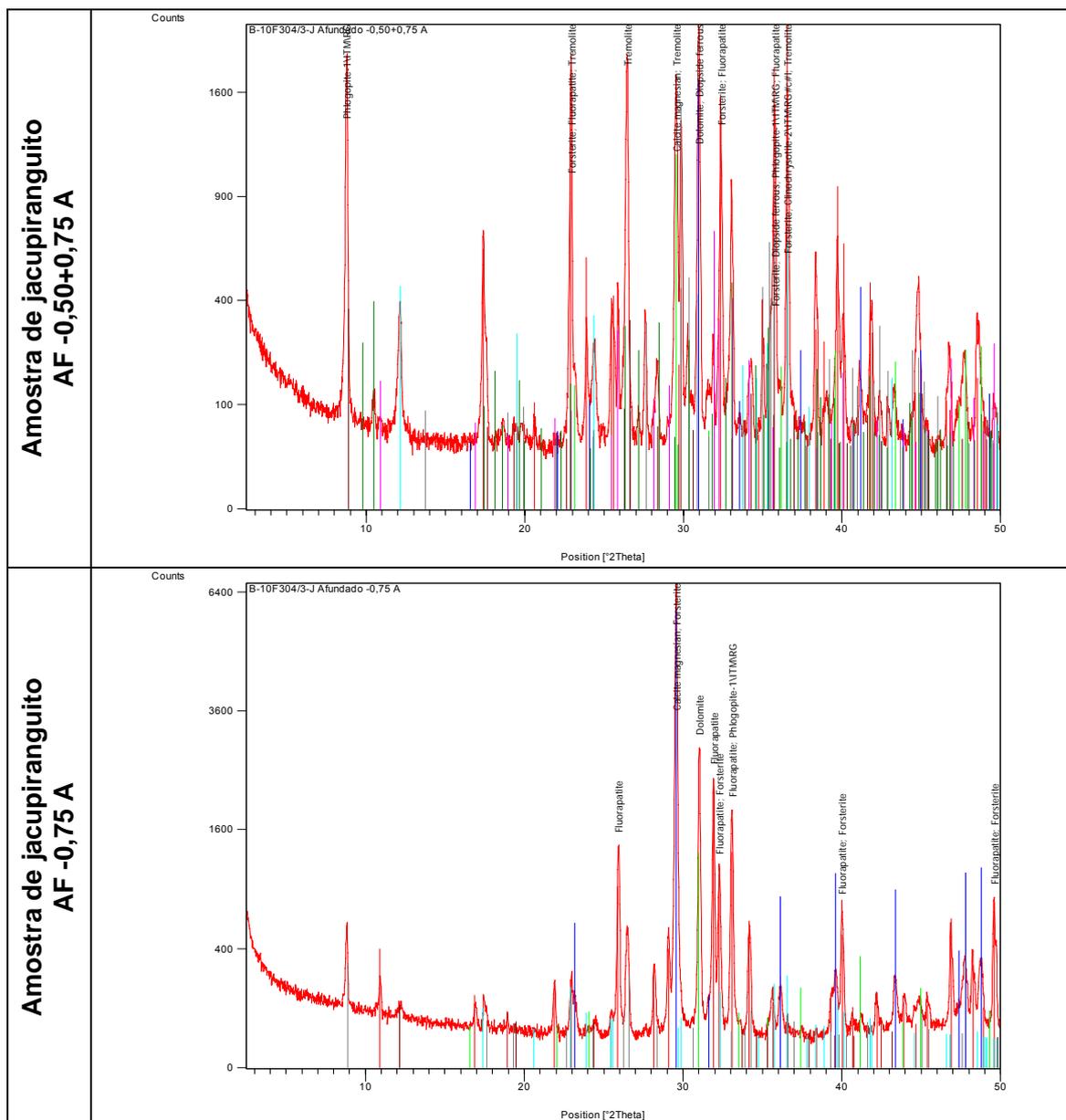












**ANEXO F – MICROANÁLISES POR DETETOR DE ENERGIA
DISPERSIVA (EDS) ACOPLADO A MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE
VARREDURA (MEV)**

FLOGOPITA

Grão	Teores (% em peso, normalizados)							BaO
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	
Zona de reação FL -0,25+0,50 A								
Mica 1	24,1	38,4	5,41	19,1	10,7	1,81	0,50	
Mica 2	27,1	43,0	13,7	5,28	8,77	0,44	1,68	
Mica 3	28,2	42,9	11,4	6,81	9,62		1,15	
Mica 4	28,5	43,6	4,02	12,4	11,3	0,25		
Mica 6	28,3	44,0	4,61	12,3	10,6	0,21		
Mica 7	26,9	41,5	4,36	14,7	10,9	1,30	0,40	
Mica 9	27,1	40,8	3,41	16,3	10,1	0,67		1,61
Mica 10	27,5	42,1	2,75	15,3	11,3	0,67	0,46	
Mica 11	23,0	39,2	9,11	15,9	9,93	2,21	0,71	
Mica 12	28,0	42,7	3,30	14,1	11,4	0,48		
Mica 13	26,2	42,1	19,5	1,81	10,3			
Mica 14	22,3	38,0	8,15	17,9	10,0	2,78	0,87	
Mica 15	27,2	42,9	12,1	6,73	10,5		0,68	
Mica 16	28,4	43,7	3,77	12,6	10,6	0,32	0,70	
Mica 17	24,0	40,3	7,31	14,1	9,86	1,98	0,44	1,94
Mica 19	28,1	43,6	4,64	12,2	11,2	0,32		
Mica 20	26,9	40,5	4,29	15,2	11,0	2,08		
Mica 21	27,3	42,9	3,82	13,5	10,7	1,37	0,45	
Mica 22	27,8	43,0	4,77	12,1	10,4	1,01	0,88	
Mica 23	25,9	39,8	4,64	16,2	10,8	2,15	0,56	
Mica 24	23,6	38,0	6,49	19,5	10,1	1,50	0,79	
Mica 25	26,6	41,3	4,39	14,6	11,4	1,66		
Mica 26	26,7	41,4	3,95	15,5	10,9	1,65		
Mica 27	28,0	43,3	6,45	11,1	10,6	0,49		
Mica 28	26,9	42,2	16,3	3,76	10,4		0,43	
Mica 29	28,3	42,9	2,64	15,0	10,6	0,49		
Mica 30	28,2	43,6	3,54	13,0	11,3		0,38	
Média	26,7	41,8	6,62	12,9	10,6			
Mínimo	22,3	38,0	2,64	1,81	8,77			
Máximo	28,5	44,0	19,5	19,5	11,4	2,78	1,68	1,94
Desvio padrão	1,77	1,82	4,36	4,45	0,61			

FLOGOPITA (continuação)

Grão	Teores (% em peso, normalizados)							
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	BaO
Zona de reação FL -0,50+0,75 A								
Mica 31	28,1	43,6	5,47	11,3	11,1		0,47	
Mica 32	27,9	43,4	4,78	12,1	10,6	0,36	0,92	
Mica 33	28,6	44,0	3,45	13,0	10,7	0,31		
Mica 34	26,4	38,2	2,56	18,9	9,73	0,74	0,60	2,88
Mica 35	27,6	42,1	2,58	15,6	11,0	0,75	0,43	
Mica 36	28,5	43,6	6,02	10,7	10,9	0,30		
Mica 37	28,0	43,2	2,66	14,3	11,4	0,46		
Mica 38	23,2	36,0	4,79	23,1	9,03	1,10	1,04	1,74
Mica 39	28,2	42,7	3,90	13,3	10,7	0,43	0,82	
Mica 40	28,0	43,7	4,33	12,2	10,8	0,28	0,75	
Mica 41	28,5	43,1	2,89	13,7	11,4	0,34		
Mica 42	27,5	42,7	4,97	12,8	10,8	0,61	0,54	
Mica 43	23,5	34,7	3,89	23,2	8,64	0,74	0,76	4,53
Mica 44	28,1	43,0	2,69	14,4	10,7	0,65	0,42	
Mica 45	27,4	41,4	2,73	16,3	11,1	1,00		
Mica 46	23,3	38,4	8,38	16,1	10,2	1,89		1,73
Mica 47	26,9	41,0	4,45	15,1	10,4	1,61	0,62	
Mica 48	27,9	41,7	2,60	15,2	11,0		0,41	1,20
Mica 49	28,3	43,6	3,85	12,7	11,2		0,40	
Mica 50	28,4	43,4	3,24	13,0	11,0	0,35	0,54	
Mica 51	27,2	42,2	3,90	14,3	11,5	0,84		
Mica 53	27,6	42,4	2,73	15,3	11,4	0,60		
Mica 54	27,6	42,3	4,09	13,5	11,2	0,80	0,45	
Mica 55	27,9	42,4	3,10	14,8	10,9	0,57	0,46	
Mica 56	28,6	44,0	3,40	12,3	11,1		0,62	
Mica 57	27,9	43,6	4,88	11,9	11,1	0,58		
Mica 58	28,5	43,5	3,51	12,8	11,5	0,22		
Mica 59	26,9	41,4	3,73	15,4	10,6	1,38	0,65	
Mica 60	28,4	43,1	3,58	13,4	10,5		0,93	
Média	27,4	42,0	3,90	14,5	10,8			
Mínimo	23,2	34,7	2,56	10,7	8,64			
Máximo	28,6	44,0	8,38	23,2	11,5	1,89	1,04	4,53
Desvio padrão	1,51	2,34	1,27	2,95	0,67			

DIOPSÍDIO

Grão	Teores (% em peso, normalizados)						
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O
Zona de reação AF -0,25+0,50 A							
Piroxênio 1	25,0	14,2	47,6	5,38	5,39	2,06	0,38
Piroxênio 2	24,4	13,6	47,1	6,38	5,51	2,58	0,37
Piroxênio 3	25,0	14,3	47,8	5,21	5,29	2,13	0,28
Piroxênio 4	24,7	13,6	47,0	6,10	5,83	2,45	0,34
Piroxênio 5	24,8	13,9	47,1	6,15	5,35	2,31	0,41
Piroxênio 6	24,3	13,4	46,5	6,68	6,04	2,66	0,43
Piroxênio 7	24,8	13,7	47,2	6,33	5,52	2,44	
Piroxênio 8	24,8	13,6	47,1	6,02	5,61	2,46	0,45
Piroxênio 9	24,8	14,2	48,4	5,94	4,42	2,25	
Piroxênio 10	24,7	14,0	48,2	5,83	4,99	2,35	
Piroxênio 11	24,5	13,6	46,6	6,07	6,07	2,67	0,44
Piroxênio 12	25,0	13,5	46,9	6,10	5,59	2,57	0,36
Piroxênio 13	24,6	13,5	46,5	6,30	6,22	2,61	0,30
Piroxênio 14	25,2	13,8	46,9	5,49	6,19	2,23	0,29
Piroxênio 15	24,7	14,0	47,6	5,77	5,19	2,39	0,39
Média	24,7	13,8	47,2	5,98	5,55	2,41	
Mínimo	24,3	13,4	46,5	5,21	4,42	2,06	
Máximo	25,2	14,3	48,4	6,68	6,22	2,67	0,45
Desvio padrão	0,23	0,28	0,58	0,40	0,49	0,19	
Zona de reação AF -0,50+0,75 A							
Piroxênio 16	24,9	13,8	47,5	5,81	5,64	2,35	
Piroxênio 17	26,1	16,1	52,6	3,20	1,41	0,65	
Piroxênio 18	25,2	13,7	48,2	5,65	5,04	2,17	
Piroxênio 19	25,7	15,7	51,7	3,81	2,44	0,78	
Piroxênio 20	24,7	13,9	47,7	5,46	5,45	2,47	0,38
Piroxênio 21	24,9	14,0	47,9	5,43	5,07	2,32	0,40
Piroxênio 22	24,7	14,1	47,5	5,61	5,54	2,37	0,26
Piroxênio 23	24,7	13,6	46,9	6,17	5,82	2,51	0,36
Piroxênio 24	24,5	13,3	46,9	6,29	6,10	2,55	0,38
Piroxênio 25	24,8	13,8	47,6	5,96	5,22	2,26	0,37
Piroxênio 26	25,0	14,4	49,5	5,18	4,08	1,49	0,44
Piroxênio 27	24,9	13,5	46,7	6,13	5,79	2,59	0,43
Piroxênio 28	24,8	14,3	48,1	5,53	5,14	2,09	
Piroxênio 29	25,2	13,9	48,4	5,32	4,95	1,90	0,41
Piroxênio 30	24,7	14,0	47,2	5,79	5,55	2,39	0,42
Média	25,0	14,1	48,3	5,42	4,88	2,06	
Mínimo	24,5	13,3	46,7	3,20	1,41	0,65	
Máximo	26,1	16,1	52,6	6,29	6,10	2,59	0,44
Desvio padrão	0,42	0,77	1,71	0,85	1,31	0,61	

DIOPSÍDIO (continuação)

Grão	Teores (% em peso, normalizados)						
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O
Jacupiranguito AF -0,25+0,50 A							
Piroxênio 31	24,5	12,9	45,3	6,71	7,29	2,86	0,47
Piroxênio 32	24,9	13,5	46,8	5,72	6,01	2,77	0,32
Piroxênio 33	24,6	12,8	45,4	6,67	7,69	2,49	0,35
Piroxênio 34	24,6	12,3	44,4	6,79	9,05	2,47	0,45
Piroxênio 35	24,6	12,7	44,8	6,67	7,68	3,27	0,29
Piroxênio 36	24,6	14,1	47,8	5,97	4,96	2,19	0,37
Piroxênio 37	24,9	14,2	47,9	5,34	5,16	2,28	0,30
Piroxênio 38	24,8	13,8	47,8	5,28	5,74	2,34	0,25
Piroxênio 39	24,5	12,7	45,8	7,23	6,60	2,73	0,40
Piroxênio 40	24,8	13,8	47,6	5,95	5,21	2,34	0,32
Piroxênio 41	24,9	13,4	46,1	5,71	7,64	2,24	
Piroxênio 42	24,7	13,8	47,9	5,78	5,32	2,29	0,29
Piroxênio 43	24,8	13,7	47,0	5,62	6,17	2,38	0,36
Piroxênio 44	24,9	12,7	45,0	7,54	7,10	2,78	
Piroxênio 45	24,9	13,8	47,5	5,87	5,17	2,51	0,30
Média	24,7	13,3	46,5	6,19	6,45	2,53	
Mínimo	24,5	12,3	44,4	5,28	4,96	2,19	
Máximo	24,9	14,2	47,9	7,54	9,05	3,27	0,47
Desvio padrão	0,16	0,59	1,28	0,69	1,24	0,30	
Jacupiranguito AF -0,50+0,75 A							
Piroxênio 46	25,8	16,1	52,3	3,51	1,59	0,67	
Piroxênio 47	26,0	16,5	53,1	2,96	0,94	0,59	
Piroxênio 48	24,9	13,6	47,3	5,89	5,49	2,37	0,46
Piroxênio 49	25,9	16,8	53,1	2,84	0,96	0,46	
Piroxênio 50	26,1	16,7	53,5	2,51	0,68	0,56	
Piroxênio 51	25,5	16,6	52,6	3,40	1,25	0,66	
Piroxênio 52	25,9	16,3	52,9	3,04	1,29	0,56	
Piroxênio 53	25,3	16,1	51,4	3,77	2,40	0,82	0,33
Piroxênio 54	25,7	16,6	53,1	2,92	1,13	0,55	
Piroxênio 55	25,7	15,8	51,8	3,52	2,33	0,89	
Piroxênio 56	25,5	16,0	53,1	3,34	1,32	0,56	0,25
Piroxênio 57	25,4	16,0	51,6	3,75	2,37	0,94	
Piroxênio 58	25,5	16,2	53,1	3,26	1,37	0,61	
Piroxênio 59	25,8	16,4	53,0	2,93	1,20	0,66	
Piroxênio 60	25,9	16,6	53,4	2,73	0,92	0,39	
Média	25,7	16,1	52,3	3,36	1,68	0,75	
Mínimo	24,9	13,6	47,3	2,51	0,68	0,39	
Máximo	26,1	16,8	53,5	5,89	5,49	2,37	0,46
Desvio padrão	0,31	0,76	1,54	0,79	1,19	0,47	

FORSTERITA

Grão	Teores (% em peso, normalizados)			
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO
Zona de reação AF -0,25+0,50 A				
Olivina 1	54,2	42,1	3,69	
Olivina 2	51,4	41,5	6,69	0,49
Olivina 3	52,3	41,3	6,01	0,37
Olivina 4	53,4	42,1	4,55	
Olivina 5	52,8	41,8	5,04	0,35
Olivina 6	52,4	41,7	5,45	0,42
Olivina 7	50,6	41,0	8,00	0,43
Olivina 8	54,4	41,6	3,71	0,32
Olivina 9	51,9	41,4	6,29	0,41
Olivina 10	52,2	41,4	6,07	0,32
Olivina 11	53,8	41,7	4,27	0,29
Olivina 12	51,5	40,9	7,24	0,34
Olivina 13	54,6	41,9	3,18	0,37
Olivina 14	53,7	41,8	4,19	0,37
Olivina 15	53,0	41,7	5,10	0,26
Média	52,8	41,6	5,30	
Mínimo	50,6	40,9	3,18	
Máximo	54,6	42,1	8,00	0,49
Desvio padrão	1,19	0,35	1,41	
Zona de reação AF -0,50+0,75 A				
Olivina 16	54,3	42,3	3,41	
Olivina 17	54,4	42,2	3,06	0,32
Olivina 18	54,3	42,0	3,48	0,25
Olivina 19	54,4	42,3	3,11	0,22
Olivina 20	54,3	42,2	3,29	0,25
Olivina 21	52,5	41,7	5,35	0,41
Olivina 22	53,4	42,3	4,05	0,32
Olivina 23	53,9	42,0	3,95	0,22
Olivina 24	52,8	41,7	5,06	0,46
Olivina 25	54,1	42,5	3,14	0,27
Olivina 26	54,2	42,1	3,40	0,30
Olivina 27	53,3	41,9	4,47	0,34
Olivina 28	54,6	42,2	3,19	
Olivina 29	54,4	41,9	3,42	0,20
Olivina 30	52,0	41,4	6,07	0,49
Média	53,8	42,0	3,90	
Mínimo	52,0	41,4	3,06	
Máximo	54,6	42,5	6,07	0,49
Desvio padrão	0,80	0,29	0,93	

FORSTERITA (continuação)

Grão	Teores (% em peso, normalizados)			
	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO
Jacupiranguito AF -0,25+0,50 A				
Olivina 31	53,8	42,0	3,95	0,32
Olivina 32	49,8	40,7	9,04	0,46
Olivina 33	53,1	41,7	5,05	0,22
Olivina 34	53,1	41,7	4,86	0,37
Olivina 35	52,2	41,4	5,80	0,54
Olivina 36	52,8	41,5	5,38	0,35
Olivina 37	50,0	40,4	8,87	0,74
Olivina 38	53,4	42,0	4,28	0,32
Olivina 39	54,3	42,1	3,34	0,28
Olivina 40	50,0	40,5	8,87	0,59
Olivina 41	49,3	40,6	9,41	0,68
Olivina 42	53,7	42,0	4,00	0,30
Olivina 43	49,2	40,8	9,16	0,78
Olivina 44	49,9	41,0	8,59	0,52
Olivina 45	51,5	41,4	6,53	0,49
Média	51,7	41,3	6,48	0,46
Mínimo	49,2	40,4	3,34	0,22
Máximo	54,3	42,1	9,41	0,78
Desvio padrão	1,85	0,59	2,26	0,18
Jacupiranguito AF -0,50+0,75 A				
Olivina 46	54,4	42,0	3,30	0,30
Olivina 47	54,3	42,2	3,54	
Olivina 48	53,3	41,8	4,62	0,29
Olivina 49	54,2	42,0	3,61	0,25
Olivina 50	54,5	41,8	3,54	0,23
Olivina 51	54,2	42,1	3,40	0,31
Olivina 52	54,7	41,9	3,20	0,22
Olivina 53	53,9	42,4	3,36	0,33
Olivina 54	52,8	41,9	4,96	0,36
Olivina 55	54,4	41,8	3,43	0,33
Olivina 56	54,7	42,2	2,84	0,26
Olivina 57	54,4	42,0	3,27	0,35
Olivina 58	54,8	42,0	2,91	0,35
Olivina 59	54,3	42,5	3,19	
Olivina 60	53,1	41,8	4,86	0,29
Média	54,1	42,0	3,60	
Mínimo	52,8	41,8	2,84	
Máximo	54,8	42,5	4,96	0,36
Desvio padrão	0,61	0,22	0,67	

TREMOLITA

Grão	Teores (% em peso, normalizados)							
	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
Zona de reação AF -0,25+0,50 A								
Anfibólio 1	5,33	22,8	52,2	5,29	5,39	2,87	1,10	4,99
Anfibólio 2	5,02	23,9	52,2	4,78	4,33	3,60	1,07	5,13
Anfibólio 3	4,38	22,8	49,0	6,17	7,11	4,48	1,06	5,02
Anfibólio 4	6,98	21,1	50,6	6,55	5,54	1,62	1,97	5,59
Anfibólio 5	5,58	22,5	51,8	5,12	5,27	2,79	1,59	5,34
Anfibólio 6	5,09	22,3	49,5	6,25	7,13	3,45	1,39	4,94
Anfibólio 7	3,93	24,0	49,1	5,48	7,56	5,44	0,99	3,46
Anfibólio 8	2,97	25,6	47,9	5,77	7,51	6,45	0,80	2,92
Anfibólio 9	5,53	21,9	51,4	5,38	5,94	2,17	1,67	5,97
Anfibólio 10	4,59	22,4	51,1	5,40	6,07	3,27	1,85	5,35
Anfibólio 11	5,75	20,8	49,8	6,90	6,67	2,18	2,06	5,94
Anfibólio 12	8,66	21,0	52,2	5,29	4,19	1,41	1,18	6,09
Anfibólio 13	6,70	21,4	51,4	5,63	5,70	2,12	1,77	5,28
Anfibólio 14	5,29	23,7	52,1	4,42	5,32	3,50	1,02	4,68
Anfibólio 15	6,30	19,5	51,5	8,03	5,29	0,89	1,89	6,64
Média	5,47	22,4	50,8	5,76	5,93	3,08	1,43	5,16
Mínimo	2,97	19,5	47,9	4,42	4,19	0,89	0,80	2,92
Máximo	8,66	25,6	52,2	8,03	7,56	6,45	2,06	6,64
Desvio padrão	1,36	1,55	1,39	0,90	1,06	1,51	0,42	0,96
Zona de reação AF -0,50+0,75 A								
Anfibólio 16	7,77	22,9	56,3	3,42	1,46	0,95	0,42	6,72
Anfibólio 17	6,79	22,6	57,6	3,45	1,28	0,61	0,66	6,99
Anfibólio 18	6,79	22,5	58,1	3,38	1,45	0,62	0,50	6,68
Anfibólio 19	5,43	23,3	53,0	4,20	4,66	2,10	1,10	6,15
Anfibólio 20	6,29	22,9	57,0	3,55	1,86	1,39	0,52	6,49
Anfibólio 21	6,70	22,1	56,9	4,52	1,53	0,77	0,73	6,78
Anfibólio 22	5,34	23,0	52,9	4,73	4,55	2,28	1,33	5,85
Anfibólio 23	7,32	22,5	57,8	3,69	0,80	0,73	0,42	6,75
Anfibólio 24	3,08	24,6	48,9	5,55	7,52	5,64	0,86	3,89
Anfibólio 25	5,36	23,7	51,5	4,73	5,73	3,66	0,83	4,47
Anfibólio 26	4,30	24,7	49,2	4,94	7,96	5,20	0,50	3,26
Anfibólio 27	6,96	22,7	58,1	3,07	1,02	0,66	0,59	6,98
Anfibólio 28	3,76	24,0	49,4	5,35	7,15	5,47	1,13	3,77
Anfibólio 29	6,48	21,7	51,8	5,98	5,05	2,17	1,75	5,07
Anfibólio 30	5,85	24,1	59,1	2,96		1,11		6,91
Média	5,88	23,1	54,5	4,23		2,22		5,78
Mínimo	3,08	21,7	48,9	2,96		0,61		3,26
Máximo	7,77	24,7	59,1	5,98	7,96	5,64	1,75	6,99
Desvio padrão	1,34	0,89	3,68	0,96		1,86		1,33