

ESTUDOS DE ROTAS DE BENEFICIAMENTO DA NEFELINA - SIENITO  
PARA APLICAÇÃO COMO FUNDENTE NA MASSA CERÂMICA DO  
PORCELANATO

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais-PPGEM

**ESTUDOS DE ROTAS DE BENEFICIAMENTO DA NEFELINA-  
SIENITO PARA APLICAÇÃO COMO FUNDENTE NA MASSA  
CERÂMICA DO PORCELANATO**

Alexandre Ritter Volkmann  
Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

PORTO ALEGRE  
2004

ALEXANDRE RITTER VOLKMANN

ESTUDOS DE ROTAS DE BENEFICIAMENTO DA NEFELINA-SIENITO PARA APLICAÇÃO COMO FUNDENTE NA MASSA CERÂMICA DO PORCELANATO

ESTA DISSERTAÇÃO DE CONCLUSÃO DO CURSO FOI JULGADA “APTA” PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE “MESTRE EM ENGENHARIA”, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO “METALURGIA EXTRATIVA E TECNOLOGIA MINERAL”, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO ORIENTADOR E PELA BANCA EXAMINADORA DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS E DOS MATERIAIS – PPGEM, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS.

Orientador

---

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter

---

Prof. Dr. Washington Aliaga Pizarro

---

Geol. Msc. Sydney Sabedot

## AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Dr. Carlos Hoffmann Sampaio, pelo apoio, sugestões e incentivo durante a execução do trabalho.

Ao Grupo Empresarial Rio Deserto, da qual pertence a Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda., não só por disponibilizar meu tempo e recursos para este trabalho como pelo incentivo ao desenvolvimento profissional de seus colaboradores, que é uma das principais políticas da Empresa.

Desejo expressar o meu agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para sua realização:

- Aos colegas do LAPROM nas pessoas de Edison Thaddeu Pacheco, Sydney Sabedot e Edison Petter Filho pelas sugestões e troca de idéias e colaboração para a execução deste trabalho.
- Ao CNPq pelo auxílio financeiro, a UFRGS e ao LAPROM, pela utilização de seus recursos.
- A Diretoria das Empresas Rio Deserto por ter viabilizado a minha participação neste curso de pós-graduação.
- Ao colega de trabalho Giovani Bon pela colaboração e troca de idéias na elaboração deste trabalho.
- Aos funcionários da Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda., pela efetiva colaboração nos ensaios.
- A minha esposa Ângela pelo apoio e incentivo e a meus filhos Telmo e Maria Eduarda pelo carinho e compreensão.
- Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade do Estado de Santa Catarina.
- A todas as pessoas que não foram nominalmente mencionadas, mas que de alguma forma tornaram possível a elaboração deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1. ASPECTOS DA EMPRESA EM ESTUDO .....</b>	<b>19</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	19
1.2 ASPECTOS GERAIS .....	19
1.3 MERCADO.....	20
1.4 GEOLOGIA.....	23
1.5 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO .....	24
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>26</b>
2.1 GEOLOGIA E MINERALOGIA.....	26
2.1.1 Classificação dos Depósitos de Nefelina-sienito .....	26
2.1.2 Mineralogia .....	27
2.2 OCORRÊNCIAS .....	29
2.3 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO.....	31
2.4 PROPRIEDADES .....	35
2.4.1 Mineralógicas .....	36
2.4.1.1 Feldspatos e Feldspatóides .....	36
2.4.1.2 Piroxênios .....	39
2.4.2 Susceptibilidade Magnética.....	39
2.5 INDÚSTRIA CERÂMICA .....	42
2.5.1 Matérias Primas.....	43
2.5.1.1 Argilas .....	44
2.5.1.2 Caulim .....	44
2.5.1.3 Quartzo .....	45
2.5.1.4 Talco.....	45
2.5.1.5 Feldspatos e Feldspatóides .....	45
2.5.2 Processo de Fabricação de Revestimento Cerâmico .....	46
2.5.2.1 Moagem.....	46
2.5.2.2 Atomização .....	46
2.5.2.3 Conformação .....	47
2.5.2.4 Secagem.....	47
2.5.2.5 Esmaltação.....	47
2.5.2.6 Queima .....	48
2.5.2.7 Classificação e Embalagem .....	48
<b>3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>49</b>
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS .....	50
3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	50
3.2.1 Análise Macroscópica .....	51
3.2.2 Microscopia Ótica .....	51
3.2.3 Difração de Raios X .....	51

3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	52
3.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA .....	52
3.4 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO .....	53
3.4.1 Separação Magnética a Seco .....	53
3.4.2 Flotação .....	55
3.4.3 Separação Magnética a Úmido .....	58
3.5 COLORIMETRIA .....	59
3.6 ANÁLISES QUÍMICAS .....	59
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	60
4.1.1 Análise Macroscópica .....	60
4.1.2 Microscopia Ótica .....	61
4.1.3 Considerações Texturais.....	61
4.1.4 Composição Mineralógica.....	61
4.1.5 Composição Mineralógica (Estimativa Visual).....	65
4.1.6 Classificação Petrográfica .....	65
4.1.7 Difração de Raios X .....	66
4.1.8 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	68
4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA .....	70
4.3 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO.....	70
4.3.1 Separação Magnética a Seco .....	70
4.3.2 Flotação .....	72
4.3.3 Separação Magnética a Úmido .....	73
4.4 COLORIMETRIA .....	73
4.4.1 Separação Magnética a Seco .....	73
4.4.2 Flotação .....	77
4.4.3 Separação Magnética a Úmido .....	78
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....	80
5.1.1 Análise Microscópica .....	80
5.1.2 Difração de Raios X .....	81
5.1.3 Microscopia eletrônica de Varredura .....	81
5.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA .....	81
5.3 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO.....	83
5.3.1 Separação Magnética a Seco .....	83
5.3.2 Flotação .....	85
5.3.3 Separação Magnética a Úmido .....	86
5.4 COLORIMETRIA .....	87
5.4.1 Separação Magnética à Seco .....	87
5.4.2 Flotação .....	88
5.4.3 Separação Magnética a Úmido .....	89
<b>6. PROJETO INDUSTRIAL.....</b>	<b>91</b>
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA A ELABORAÇÃO DO PROJETO .....	91
6.2 PROCESSO PRODUTIVO DA NEFELINA-SIENITO.....	92
6.3 PROCESSO PRODUTIVO MODIFICADO DA NEFELINA-SIENITO .....	93
<b>7. AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....</b>	<b>97</b>
7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	97
7.2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA PARA O CURTO PRAZO.....	97
7.2.1 Regimes Operacionais e Parâmetros de Lavra .....	98
7.2.2 Custos .....	99
7.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA PARA O MÉDIO PRAZO .....	99
7.3.1 Regimes Operacionais e Parâmetros de Lavra .....	99

7.3.2 Custos .....	100
7.3.3 Preço de Venda.....	100
7.4 INVESTIMENTOS.....	101
7.4.1 Equipamentos de Lavra .....	101
7.4.2 Investimentos em Beneficiamento .....	102
7.4.3 Depreciação dos Investimentos .....	105
7.5 FLUXO DE CAIXA E AVALIAÇÃO DA RENTABILIDADE.....	105
7.5.1 Avaliação da Rentabilidade.....	106
7.5.2 Comentários sobre os Resultados .....	106
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DIAGRAMA DE BENEFICIAMENTO DA NEFELINA SIENITO DE BLUE MOUNTAIN, ONTÁRIO (MINNES ET AL., 1983).....	34
FIGURA 2.2- COMPOSIÇÃO DO FELDSPATO, SEGUNDO HURLBUT E KLEIN (1995).....	37
FIGURA 2.3 – CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO PARA MINERAIS PARAMAGNÉTICOS, DIAMAGNÉTICOS E FERROMAGNÉTICOS (DELBONI, 1992).....	40
FIGURA 3.1- FLUXOGRAMA DA CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA. ....	51
FIGURA 3.2 - FLUXOGRAMA DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA .....	53
FIGURA 3.3 - FLUXOGRAMA DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A SECO.....	54
FIGURA 3.4 - FLUXOGRAMA DA FLOTAÇÃO E SEPARAÇÃO MAGNÉT. A ÚMIDO – ALÍQUOTA 0,25 MM.....	56
FIGURA 3.5-FLUXOGRAMA DA FLOTAÇÃO E DA SEPARAÇÃO MAGNÉT. A ÚMIDO – ALÍQUOTA 0,15 MM.....	57
FIGURA 4.1- FOTO MACROSCÓPICA DA ROCHA NEFELINA-SIENITO. ....	60
FIGURA 4.2 - FOTOMICROGRAFIAS DA AMOSTRA.....	63
FIGURA 4.3 - DIFRATOGRAMA DA ROCHA NEFELINA-SIENITO.....	66
FIGURA 4.4 - DIFRATOGRAMA DO CONCENTRADO DE MINERAIS PESADOS DA ROCHA NEFELINA-SIENITO. ....	67
FIGURA 4.5 - DIFRATOGRAMA DA NEFELINA-SIENITO REALIZADO EM AGOSTO/99. ....	67
FIGURA 4.6 - IMAGEM MEV DE UM FELDSPATÓIDE DA ROCHA NEFELINA-SIENITO.....	68
FIGURA 4.7 - ANÁLISE EDS DE UM PONTO DO FELDSPATÓIDE DA IMAGEM MOSTRADA NA FIG 4.5.....	68
FIGURA 4.8- IMAGEM MEV DE UM PIROXÊNIO DA ROCHA NEFELINA-SIENITO.....	69
FIGURA 4.9 - ANÁLISE EDS EM UM PONTO DO PIROXÊNIO MOSTRADO NA IMAGEM DA FIG. 4.8. ....	69
FIGURA 4.10 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DA FRAÇÃO NÃO MAGNÉTICA DO PASSE E DO REPASSE DA SMS, DA FRAÇÃO -2,0 +1,4 MM.....	74
FIGURA 4.11 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DA FRAÇÃO NÃO MAGNÉTICA DO PASSE E DO REPASSE DA SMS, DA FRAÇÃO -1,4 +1,0 MM.....	75
FIGURA 4.12- ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DA FRAÇÃO NÃO MAGNÉTICA DO PASSE E DO REPASSE DA SMS, DA FRAÇÃO -1,0 +0,6 MM.....	75
FIGURA 4.13 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DA FRAÇÃO NÃO MAGNÉTICA DO PASSE E DO REPASSE DA SMS, DA FRAÇÃO -0,6 +0,25 MM.....	76
FIGURA 4.14 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DA FRAÇÃO NÃO MAGNÉTICA DO PASSE E DO REPASSE DA SMS, DA FRAÇÃO -0,25 +0,15 MM.....	76
FIGURA 4.15 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DO MATERIAL COMINÚIDO COM GRANULOMETRIA INFERIOR A 0,25 MM, SUBMETIDOS A ESTÁGIOS DE FLOTAÇÃO....	77
FIGURA 4.16 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DO MATERIAL COMINÚIDO COM GRANULOMETRIA INFERIOR A 0,15 MM, SUBMETIDOS A ESTÁGIOS DE FLOTAÇÃO....	78
FIGURA 4.17 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DE AMOSTRAS SUBMETIDAS À SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO, PASSANTES NA MALHA 0,25 MM, SEM E COM PROCESSO DE FLOTAÇÃO.....	79

FIGURA 4.18 - ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DE AMOSTRAS SUBMETIDAS À SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO, PASSANTES NA MALHA 0,15 MM, SEM E COM PROCESSO DE FLOTAÇÃO.....	79
FIGURA 5.1- HISTOGRAMAS DAS MASSAS DE $Fe_2O_3$ , DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA ROCHA NEFELINA-SIENITO COMINÚIDA NO MOINHO DE ROLOS. ....	82
FIGURA 5.2 - HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE LEVES E PESADOS EM CADA FAIXA GRANULOMÉTRICA E PERCENTUAL DE $Fe_2O_3$ EM CADA FRAÇÃO. ....	83
FIGURA 5.3 - HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DA MASSA DO PRODUTO NÃO MAGNÉTICO DO PASSE E REPASSE POR FAIXA GRANULOMÉTRICA E SUA DIFERENÇA. ....	84
FIGURA 5.4 - HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE $Fe_2O_3$ DO PRODUTO NÃO MAGNÉTICO DO PASSE E REPASSE POR FAIXA GRANULOMÉTRICA E SUA DIFERENÇA. ....	84
FIGURA 5.5 - HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO DA MASSA DO PRODUTO DA FLOTAÇÃO E DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA COM E SEM FLOTAÇÃO PRÉVIA. ....	87
FIGURA 5.6 - HISTOGRAMA DE ALVURA DO PASSE E REPASSE DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A SECO. ....	88
FIGURA 5.7 - HISTOGRAMAS DAS ALVURAS DA AMOSTRA ORIGINAL E DOS PRODUTOS DA FLOTAÇÃO ROUGHER E SCAVENGER. ....	89
FIGURA 5.8 - HISTOGRAMAS DOS ÍNDICES DE ALVURA DA AMOSTRA ORIGINAL E DO CONCENTRADO SCAVENGER DA FLOTAÇÃO DOS PRODUTOS DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO. ....	90
FIGURA 6.1 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO PRODUTIVO DA NEFELINA CS100.....	96

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FONÓLITO E DA NEFELINA-SIENITO .....	25
TABELA 2.1- COMPOSIÇÃO TEÓRICA DOS PRINCIPAIS FELDSPATOS .....	29
TABELA 2.2- COMPOSIÇÃO TÍPICA DA NEFELINA-SIENITO DE BLUE MOUNTAIN .....	33
TABELA 2.3 – PRINCIPAIS INSUMOS MINERAIS USADOS NA PRODUÇÃO DA MASSA CERÂMICA.....	43
TABELA 3.1- PARÂMETROS OPERACIONAIS NOS CIRCUITOS DE FLOTAÇÃO. ....	58
TABELA 4.1 – BALANÇO DE MASSAS E ANÁLISES QUÍMICAS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO PRODUTO COMINÚDO NO MOINHO DE ROLOS .....	70
TABELA 4.2 – BALANÇO DE MASSAS E ANÁLISES QUÍMICAS DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A SECO .....	71
TABELA 4.3 – BALANÇO DE MASSAS E ANÁLISES QUÍMICAS DA FLOTAÇÃO NA FRAÇÃO – 0,25 MM.....	72
TABELA 4.4 - BALANÇO DE MASSAS E ANÁLISES QUÍMICAS DA FLOTAÇÃO NA FRAÇÃO – 0,15 MM.....	72
TABELA 4.5 - BALANÇOS DE MASSAS E ANÁLISES QUÍMICAS RESULTANTES DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO. ....	73
TABELA 4.6 - PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DOS MATERIAIS NÃO MAGNÉTICOS DO PASSE E DO REPASSE DA SEPARAÇÃO MAGNÉTICA À SECO.....	74
TABELA 4.7 - PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DOS CONCENTRADOS DA FLOTAÇÃO. ....	77
TABELA 4.8 - PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DE AMOSTRAS SUBMETIDAS À SEPARAÇÃO MAGNÉTICA A ÚMIDO, SEM E COM FLOTAÇÃO.....	78
TABELA 5.1- MASSAS DE $Fe_2O_3$ OBTIDAS NOS ENSAIOS DE AFUNDA-FLUTUA, DO MATERIAL COMINÚDO NO MOINHO DE ROLOS. ....	82
TABELA 6.1 – NOVA DISPONIBILIDADE DIÁRIA POR UNIDADE PRODUTIVA AJUSTADA A DEMANDA DO PRODUTO NO MERCADO. ....	95
TABELA 7.1 - ESCALA DE PRODUÇÃO DE 250 T/ MÊS DE NEFELINA CS100 - REGIMES OPERACIONAIS, PARTIÇÃO DOS PRODUTOS.....	98
TABELA 7.2 - PARÂMETROS DE LAVRA PARA PRODUÇÃO DE 250 T/ MÊS DE NEFELINA CS100.....	98
TABELA 7.3 – RESUMO DOS CUSTOS DE LAVRA E BENEFICIAMENTO PARA PRODUÇÃO DE 250 T/ MÊS DE NEFELINA CS100 ,CURTO PRAZO. ....	99
TABELA 7.4 - ESCALA DE PRODUÇÃO DE 1.000 T/MÊS DE NEFELINA CS100 - REGIMES OPERACIONAIS, PARTIÇÃO DOS PRODUTOS.....	100
TABELA 7.5 – PARÂMETROS DE LAVRA PARA PRODUÇÃO DE 1.000 T/ MÊS DE NEFELINA CS100.....	100
TABELA 7.6 – RESUMO DOS CUSTOS DE LAVRA E BENEFICIAMENTO PARA PRODUÇÃO DE 1000 T/ MÊS DE NEFELINA CS100, MÉDIO PRAZO.....	101
TABELA 7.7 – INVESTIMENTOS EM LAVRA.....	102
TABELA 7.8 – INVESTIMENTOS EM BENEFICIAMENTO PARA PRODUÇÃO DE 1.000T / MÊS. .....	103
TABELA 7.9 – DEPRECIÇÃO DOS INVESTIMENTOS.....	105
TABELA 7.10 – RESUMO DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE CAIXA PARA 20 ANOS DE PRODUÇÃO DE NEFELINA CS100. ....	107

## LISTA DE SÍMBOLOS

Å	ângstrons
ηm	nanômetro
μm	micrômetro
mm	milímetro
cm	centímetro
m	metro
km	quilômetro
m <sup>2</sup>	metro quadrado
m <sup>2</sup> / mês	metro quadrado por mês
kg	quilograma
t	tonelada
t/ h	tonelada por hora
t/ dia	tonelada por dia
t/ mês	tonelada por mês
g/ t	gramas por tonelada
ml/ t	mililitros por tonelada
gauss	campo magnético
pH	potencial de hidrogênio
rpm	rotações por minuto
%	percentagem
hs/ dia	horas por dia
dias/ mês	dias por mês
R\$	reais
R\$/ t	reais por tonelada
Tt mês	total mensal
Tt ano	total anual

**LISTA DE SIGLAS**

LAPROM	Laboratório de Processamento Mineral
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
MPB	Mineração e Pesquisa Brasileira
IG	Instituto de Geociências
ROM	“Run of Mine”
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
S.M.S	Separação Magnética a Seco
S.M.U	Separação Magnética a Úmido
M.O	Mão de Obra
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.
COFINS	Contribuição Financeira
PIS	Plano de Intergração Social
CPMF	Contribuição Provisória Sobre Movimentação Financeira
IRPJ	Imposto de Renda Pessoa Jurídica
VP	Valor Presente

## RESUMO

Este trabalho consiste em um estudo de caracterização e viabilidade econômica, para implantação de uma linha de processo, para beneficiar uma jazida de nefelina-sienito. Esta jazida pertence à Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda e está localizada no Domo Alcalino do Planalto Lageano, no Estado de Santa Catarina.

Nefelina-sienito é uma rocha ígnea de origem plutônica, com ausência de quartzo livre, constituída por minerais félsicos que são os feldspatos e feldspatóides e máficos, que são o piroxênio e anfibólio, associados a minerais acessórios como zircão, apatita, titanita e minerais opacos. Sua principal utilização é como fundente para a indústria cerâmica e vidreira.

Este insumo concorre com o Feldspato neste segmento, com vantagens intrínsecas, como teor mais elevado de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ), homogeneidade da jazida, além da proximidade do centro consumidor. Por outro lado, apresenta uma grande desvantagem que limita sua utilização na indústria cerâmica, e praticamente exclui seu emprego para o porcelanato e esmalte, que é a interferência na cor do produto final, reflexo do elevado teor de ferro.

O objetivo deste trabalho é obter um produto que sirva de insumo (matéria-prima) fundente à indústria cerâmica, especificamente na linha de revestimentos nobres, para a fabricação de um piso cerâmico de alto valor agregado, denominado grês-porcelanato. Para atingir este objetivo, definiu-se as etapas e ensaios a serem realizados para extrair os minerais máficos (cromóforos), ou seja, aqueles com ferro presente em sua estrutura, e com isto enquadrar o produto dentro dos padrões exigidos pela indústria cerâmica.

Inicialmente realizou-se uma caracterização mineralógica da nefelina-sienito, identificando suas características estruturais e texturais e seus minerais constituintes, diferenciando os máficos dos félsicos, estudando suas características físicas, químicas e morfológicas. Posteriormente, efetuou-se a caracterização tecnológica avaliando o grau de liberação destes minerais e, por fim, ensaios de beneficiamento, utilizando-se as técnicas de flotação e separação magnética a seco e a úmido, avaliando suas performances e definindo a rota de processo mais indicada.

Elaborou-se um fluxograma de processo específico para esta linha de produção considerando os equipamentos que a empresa já possui, buscando reduzir o custo de implantação.

Definida a linha de processo e os equipamentos necessários para sua implantação, avaliou-se os investimentos e custos envolvidos para duas escalas de produção.

Por fim elaborou-se um fluxo de caixa para avaliar a viabilidade econômica do projeto.

Os resultados encontrados confirmaram a viabilidade técnica e econômica para implantação desta nova linha de processo.

## ABSTRACT

This work consists in a study of characterization and economic viability of implementing a mineral process line to exploit a nepheline syenite. The deposit belongs to Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda and it is located in Alkaline Dome of the Santa Catarina Lageano Plateau.

Nepheline syenite is a plutonic igneous rock, absent of free silica, as quartz, comprising of felsic minerals like alkaline feldspars and feldspathoids, and mafic minerals like pyroxenes and amphibolites, associated with accessories minerals like zircon, apatite, titanite and opaque minerals. Its main application is to be a fluxing agent for glass and ceramic industries.

Nepheline syenite behaves like feldspar as fluxing agent showing advantages over the latter, as its high alkali content ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ), deposit homogeneity and proximity of reserves from consumption centers. On the other hand, presents a great disadvantage with limit its use in the ceramic industry and practically exclude its use to the porcelanato and glaze. The disadvantage is the color interference in the final product, belong from the iron high grade.

The purpose of this work is to get a product that can be used as a fluxing agent raw material to the ceramic industry, especially in the manufacture of a high quality coating for ceramic tiles, called *grês-porcelanato*. To reach this purpose defined the testing steps to be carried out to eliminate the mafic minerals (with iron in its structure), to reach the ceramic industry required standard.

The first step is the mineralogical characterization of the nepheline syenite, identifying its structural and textural characteristics and its composition elements. The aim was to differentiate the mafic from the felsics, studying its morphologic, chemical and physical characteristics. After that, a technological characterization, evaluating purification processes using dry and wet magnetic separation and flotation techniques, was carried out.

A mineral processing flow sheet was proposed for this production line, considering the equipment available in house, sourcing for a better implantation cost.

After the process was defined, the investments and costs for two production scales were evaluated.

Finally, a cash flow was made to evaluate economic feasibility of the project.

The results confirm the technical and economic availability to the implantation of the new line process.

## INTRODUÇÃO

No processo de elaboração de revestimentos cerâmicos, as matérias-primas, até algum tempo atrás eram legadas a segundo plano dentro de sua importância no contexto de elaboração e controle de processos de fabricação. Hoje adquirem uma nova dimensão dentro de um novo conceito de estratégia competitiva, podendo em muitos casos ser o diferencial que irá garantir sua vantagem estratégica sobre os demais concorrentes.

Neste aspecto os processos de lavra e beneficiamento de matérias primas devem seguir esta tendência e estarem preparados para sua modernização, possibilitando, assim, garantir constante qualidade de seus produtos e redução dos custos operacionais com a introdução de avanços tecnológico em seus processos produtivos. Outro aspecto importante é a necessidade de que os fabricantes de matérias primas possuam um rigoroso controle de processo, garantindo qualidade e homogeneidade de seus produtos ao longo do tempo.

Neste contexto, as matérias primas fundentes adquirem especial importância por refletirem diretamente nos custos e qualidade final dos produtos cerâmicos. Seu emprego irá interferir em características como porosidade, resistência mecânica e temperatura de queima dos fornos. Portanto, quanto maior a proporção e melhor a qualidade do fundente, melhor a qualidade do produto e menor o consumo energético nos fornos.

No Brasil os fundentes mais utilizados neste segmento cerâmico são os filitos ou argilas fundentes, no caso de revestimentos cerâmicos de baixa qualidade e resistência, e os feldspatos, em revestimentos de maior qualidade que vão do semi-grês ao grês-porcelanato. No estado de Santa Catarina empresas como Eliane e Portobello, que produzem revestimentos cerâmicos de excelente qualidade, utilizam como fundente no piso cerâmico o fonólito, que é o correspondente vulcânico da nefelina-sienito. Na Europa e Estados Unidos é comum utilizar como fundente a nefelina-sienito, que apresenta em alguns aspectos qualidades superiores ao feldspato e semelhantes ao fonólito, porém com a vantagem de possibilitar a extração dos contaminantes ferrosos mediante beneficiamento, devido a sua textura porfirítica, permitindo a liberação dos minerais contaminantes por cominuição.

O presente trabalho tem por objetivo geral, desenvolver uma rota de processo economicamente viável para obtenção de uma matéria prima fundente, a partir da nefelina-sienito, através da retirada de seus elementos contaminantes, a níveis adequados para sua utilização na indústria cerâmica em revestimentos nobres, tipo porcelanato.

Constituem objetivos específicos deste trabalho:

- Investigar, através da caracterização mineralógica, aspectos que permitam identificar os minerais contaminantes (cromóforos) e suas características estruturais, texturais, mineralógicas e químicas;
- Estudar a liberação dos minerais contaminantes através de ensaios de afunda-flutua;
- Avaliar, através de ensaios de beneficiamento, os processos mais indicados para extrair os minerais contaminantes;
- Estabelecer a rota de processo para beneficiar a nefelina-sienito;
- Definir os equipamentos e infra-estrutura necessária para implantação da nova linha de produção;
- Levantar o investimento necessário e custos envolvidos para implantação considerando duas escalas de produção;
- Elaborar um fluxo de caixa para avaliação econômica do processo;
- Analisar os resultados e definir através dos fatores econômicos, como lucratividade, taxa interna e *pay-back*, a lucratividade e viabilidade do processo.

## 1. ASPECTOS DA EMPRESA EM ESTUDO

### 1.1 INTRODUÇÃO

A Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda, pertencente ao Grupo Empresarial Rio Deserto, que atua na área de mineração há mais de 80 anos, possui extensas reservas de minério de fonólito e nefelina-sienito (estimadas em 27 milhões de toneladas), localizadas no Planalto Serrano em Santa Catarina, onde vem atuando há seis anos no fornecimento de matéria-prima fundente para os mais variados segmentos industriais, principalmente no cerâmico, vidro, siderúrgico e químico.

Seus produtos se diferenciam essencialmente por suas características granulométricas e químicas quantitativas. Basicamente, o beneficiamento do minério se restringe a cominuição e classificação do material a seco, predominantemente do fonólito em função de seu menor custo de extração. Especificamente no caso de produtos que exigem concentrações menores de minerais de ferro, em vista da interferência na cor das peças cerâmicas, beneficia-se a nefelina-sienito, que por características morfológicas diferenciadas apresenta teores de óxido de ferro de 2% em média, contra 3% do fonólito e possibilita a retirada parcial destes minerais através de processos de beneficiamento, reduzindo o teor de ferro no produto final.

### 1.2 ASPECTOS GERAIS

A finalidade da empresa é desenvolver produtos com características fundentes, através da extração e beneficiamento de dois tipos de minério (fonólito e nefelina-sienito), e fornecê-los ao mercado (cerâmico, siderúrgico, químico, vidro, etc.), onde atuam como agentes fluidificantes (fundentes) na fase de fusão da matéria-prima que irá compor o produto final.

Conceitualmente o fundente é uma substância que baixa a temperatura de sinterização do material ou composto ao qual é adicionado. No caso em estudo que se refere ao setor cerâmico, o fundente irá atuar diretamente na matéria-prima, permitindo sua fusão dentro do forno, principalmente da sílica, a temperaturas menores, promovendo a sinterização e impermeabilização das peças.

As matérias-primas normalmente empregadas na formulação das massas para revestimentos cerâmicos são as argilas para dar plasticidade, areia quartzosa (fonte de sílica) e fundentes, como os carbonatos (talco), filitos, feldspatos, fonólitos e nefelina-sienitos.

A utilização de rochas ricas em álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) em massas cerâmicas tem sido largamente estudada por fabricantes de revestimentos cerâmicos com o objetivo de economizar energia, por meio de uma temperatura de queima mais baixa. Estas rochas ou minerais, denominados fundentes, estão comumente associadas a grupos de minerais que contêm ferro em suas estruturas, o qual é um elemento conhecido como importante contaminante de massas cerâmicas.

Os teores de ferro contidos nas matérias-primas, quando em excesso, inviabilizam a sua utilização no estado natural, tornando necessário uma ou mais etapas de beneficiamento prévias ao processamento cerâmico, com o objetivo de minimizar o ferro contaminante. Os métodos de separação de minerais estão baseados nas diferentes propriedades mineralógicas que eles possuem. Entre vários processos considerados para a separação do ferro de rochas feldspáticas, a separação magnética é o mais frequentemente empregado (Williamson 1980).

No caso dos produtos cerâmicos como o porcelanato e o esmalte, o teor de ferro contido na massa irá interferir diretamente na cor do produto final. Em vista disto, a Nefelina Sienito, sem um tratamento adequado para reduzir seu teor de óxido de ferro, não pode ser comercializada.

### 1.3 MERCADO

Dentre os diversos tipos de placas cerâmicas para revestimento produzidas mundialmente, a tipologia porcelanato tem se destacado, devido a suas ótimas propriedades técnicas (baixa absorção de água, alta resistência mecânica e à abrasão, ótima resistência química e ao gelo) e sua semelhança com as rochas naturais.

O porcelanato, placa cerâmica esmaltada ou não esmaltada, surgiu na Itália no final dos anos 70, desenvolveu-se na década seguinte e atingiu seu veloz crescimento na década de 90, quando passou a ser fabricado em ciclo rápido de queima (Motta, 2000).

A produção de porcelanato mundial tem aumentado progressivamente nos últimos dois anos. Atualmente, o volume de produção de porcelanatos na Itália já ultrapassou 50% da produção total de revestimentos cerâmicos deste país. No ano de 1997, a Itália, pioneira na produção de porcelanato, produziu 127 milhões de m<sup>2</sup> deste produto. Em 1999, a produção italiana de porcelanato atingiu o valor de 219 milhões de m<sup>2</sup> e no ano de 2000 atingiu aproximadamente 269 milhões de m<sup>2</sup>.

No Brasil, após o desenvolvimento da queima rápida (monoqueima) que caracterizou o final dos anos 70 e boa parte dos anos 80, a segunda grande revolução no setor cerâmico deu-se com a concepção do porcelanato, produto este que se difere dos demais tipos de revestimentos cerâmicos devido ao seu processo de produção altamente tecnológico, o qual envolve uma queima em ciclos rápidos à temperatura em torno de 1200 a 1250° C. Devido ao alto nível de qualidade de suas matérias-primas, elevado grau de moagem, alto teor de fundentes e alta força de compactação, o processo de fabricação resulta em produtos com baixa absorção de água (inferior a 0,5%) e elevada performance técnica (resistência mecânica, química e ao gelo).

A produção nacional de placas cerâmicas para revestimento apresentou crescimento de 4,6% em relação ao ano anterior, atingindo um valor de 473 milhões de m<sup>2</sup> em 2001. O mercado cerâmico brasileiro, a exemplo do europeu, vem apresentando um crescente aumento nos últimos quatro anos na linha de revestimentos cerâmicos nobres e de maior valor agregado, como o porcelanato, exigindo maior demanda de matérias-primas de melhor qualidade e homogêneas em suas características físicas e químicas. Neste aspecto, a nefelina-sienito beneficiada agregaria todas estas vantagens, sendo um fundente responsável pela densificação e resistência mecânica do produto, além de possibilitar ganhos pela redução da temperatura de queima dos fornos.

No Brasil, no ano de 2001, a capacidade produtiva de porcelanato passou de 4,0 milhões de m<sup>2</sup>/mês para 4,9 milhões m<sup>2</sup>/mês, o que evidencia o interesse mercadológico neste produto, principalmente para a exportação.

Atualmente as empresas fabricantes de porcelanato no Brasil são: Cecrisa (MG), Eliane (SC), Elizabeth (PB), Porto Bello (SC), Ceusa (SC) e Itagrês (SC). A empresa Eliane (SC) foi a pioneira na fabricação de porcelanato não esmaltado em 1996, com uma capacidade de produção de 90 mil m<sup>2</sup>/mês, sendo que atualmente sua capacidade instalada é de 350 mil m<sup>2</sup>/mês de porcelanato não esmaltado, sendo que sua produção média atual está na faixa de 300 mil m<sup>2</sup>/mês. Além da Eliane, a Cecrisa (MG)

iniciou a produção de porcelanato esmaltado em 1998, e em 1999 produziu 50 mil m<sup>2</sup>/mês. Atualmente sua produção média está na faixa de 170 mil m<sup>2</sup>/mês, sendo 70 mil m<sup>2</sup> referentes a produtos esmaltados e 100 mil m<sup>2</sup> referentes a produtos não esmaltados. A capacidade instalada da Cerâmica Elizabeth para produção de porcelanato é de 150 mil m<sup>2</sup>/mês, sendo sua produção atual de 150 mil m<sup>2</sup>/mês. A empresa Cerâmica Portobello inaugurou no final de 2000, uma moderna fábrica neste segmento com uma capacidade instalada de 300 mil m<sup>2</sup>/mês de produtos não esmaltados e de 200 mil m<sup>2</sup>/mês de produtos esmaltados, sendo que atualmente vem produzindo um total de 250 mil m<sup>2</sup>/mês. A Ceusa está iniciando a produção de porcelanato com capacidade de 100 mil m<sup>3</sup>/mês, devendo duplicar a capacidade quando concluir a nova fábrica. A Itagrês também está produzindo o porcelanato esmaltado e polido numa capacidade de 50 mil m<sup>2</sup>/mês. Conseqüentemente, somente na região de Criciúma/Tubarão/Tijucas a produção mensal de porcelanato alcança um valor de 900 mil metros quadrados. Considerando em média 30% em peso na massa de porcelanato, o consumo mensal de um fundente ultrapassa a 3.000 toneladas/mês.

Atualmente, a Mineração e Pesquisa Brasileira dispõe de uma capacidade de produção ociosa, em função de restrições de mercado, sendo que no setor cerâmico um dos fatores restritivos é o preço, considerando-se que sua atuação neste mercado se restringe a composição da massa cerâmica para revestimento de pisos cerâmicos, concorrendo com matérias primas de menor custo como as argilas fundentes e filitos, produtos de eficiência bem inferior, porém de baixo custo de extração e beneficiamento. O outro fator restritivo mencionado anteriormente se refere a presença de minerais ferrosos, que interferem na cor do produto final.

Como o fator preço está diretamente relacionado ao custo de produção, que por sua vez é reflexo, entre outros aspectos, da maior dificuldade de extração e beneficiamento em comparação às argilas, a utilização da nefelina-sienito é mais indicada em produtos de maior valor agregado, cujas exigências de qualidade são mais apuradas, necessitando inclusive a qualificação para exportação, que se por um lado exige um maior aporte tecnológico, por outro possibilita atingir preços maiores que compensem seus custos.

Neste aspecto, além do piso cerâmico atualmente comercializado, produtos como o porcelanato e o esmalte cerâmico seriam os mais indicados para o desenvolvimento de uma matéria prima fundente a partir da nefelina-sienito. Para

realizar este intento é necessário superar o problema dos minerais contaminantes que interferem na cor do produto final, através da adoção de um processo industrial que possibilitasse sua retirada.

O aumento esperado do consumo de fundente no Brasil irá exigir uma reestruturação da indústria de mineração cujos traços marcantes serão a regionalização da produção, visando diminuir os custos do frete, maior escala de produção e a internacionalização de tecnologia que permita um ganho maior na qualidade e domínio setorial. Como consequência, a estrutura setorial ficará concentrada, com a saída de várias empresas do mercado, principalmente as de menor porte. Diante destas perspectivas, a redução da vulnerabilidade das atuais empresas produtoras, constituídas na sua maioria de pequenas e médias empresas, requer a formulação de estratégias e a construção de diferenciais competitivos fundamentados em; vantagens de localização, alta qualidade e reprodutibilidade do produto, feldspatos com elevado teor de sódio (albita e nefelina-sienito), baixa concentração de contaminantes, prestação de assistência técnica, reaproveitamento dos resíduos de moagem e beneficiamento, controle de processo e beneficiamento diferenciado.

#### 1.4 GEOLOGIA

A substância mineral requerida pela Mineração e Pesquisa Brasileira é caracterizada como nefelina-sienito, pertencente a família das rochas alcalinas contidas no denominado “Domo Alcalino de Lages”.

O “Complexo Alcalino de Lages” constitui uma série de intrusões alcalinas irregulares, formando uma região dômica com cerca de 30 km de diâmetro, que afetou as unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná. A interpretação de aspectos morfoestruturais, associados ao sistema anelar de falhamentos, permite concluir por um levantamento dômico pré-botucatu e fase de atividade vulcânica principal certamente pós-botucatu.

A Jazida do Tributo constitui parte da borda sul do “Domo Alcalino de Lages” constituindo-se de uma jazida de rochas alcalinas, na forma de seixos rolados e matacões imersos em solo areno-argiloso, amarelo, oriundo da própria alteração das alcalinas, não havendo sido encontrado rocha sã (matriz), podendo a mesma se

encontrar em áreas limítrofes ou estar totalmente alterada. Em amostra de mão, são rochas cinza-clara, textura porfírica, formada por fenocristais em matriz fina, podendo ser distinguidos macroscopicamente os feldspatos em ripas brilhantes, os feldspatóides, além dos ferromagnesianos. Uma capa de alteração clara recobre a rocha.

## 1.5 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO

Em se tratando de uma empresa de mineração, a matéria prima empregada na obtenção de um produto final diferencia-se das demais por se tratar de minério extraído da natureza, tornando-se de vital importância para a empresa o porte e a localização em que este minério se encontra, bem como sua qualidade, homogeneidade e composição mineralógica.

A Mineração e Pesquisa Brasileira dispõe de reservas de fonólito e nefelina-sienito, que são rochas da mesma “família” com propriedades físicas e químicas equivalentes. Porém, se diferenciam pelo ambiente de formação, que apesar da mesma origem magmática, a cristalização do fonólito se deu em superfície através de derrames vulcânicos enquanto a nefelina-sienito se ocorreu em profundidade. Com isto, devido ao resfriamento mais lento da Nefelina, formaram-se minerais maiores e proporções menores de minerais ferrosos refletindo em um menor percentual de ferro nesta rocha, do que o fonólito, conforme podemos observar na tabela 1.1.

A formação de minerais maiores, incluindo os minerais ferrosos, possibilita a sua extração por processos físicos ou físico-químicos associados à liberação de seus grãos.

Basicamente, o processo de beneficiamento de minério tem por objetivo modificar as características físicas, através da fragmentação, e as características físico-químicas da rocha, através da concentração ou retirada de minerais presentes na sua composição mineralógica.

Tanto o beneficiamento do fonólito como da nefelina-sienito tem como objetivo a sua fragmentação. Esta se dá através dos processos de detonação, britagem e moagem, buscando-se atingir a faixa granulométrica definida para um determinado tipo de produto ou processo. Este tipo de processo envolve materiais e equipamentos que têm como finalidade a desagregação da rocha, como os explosivos, escavadeiras,

britadores de mandíbulas, britadores cônicos, moinhos de rolos, moinhos de anéis e moinhos de bolas, bem como de equipamentos que executam a classificação granulométrica dos produtos de cada processo, denominados grelhas, peneiras vibratórias e ciclones, além dos equipamentos que realizam o transporte do minério de um processo para outro, como os caminhões e a carregadeira, as correias transportadoras e os elevadores de canecos.

Quando há a necessidade de modificação da composição química característica da rocha, o processo normalmente é mais complexo e exige um profundo estudo de suas propriedades visando buscar a rota economicamente mais adequada àquele tipo de tratamento.

No caso do desenvolvimento de produto para o porcelanato, além da especificação granulométrica definida para o fornecimento, é necessário que este produto não interfira na cor do produto cerâmico.

Tabela 1.1- Composição química do fonólito e da nefelina-sienito

ELEMENTOS (%)		FONÓLITO	NEFELINA-SIENITO
% ÓXIDO DE SÍLICA	SiO <sub>2</sub>	47,0 - 52,0	52,0 - 58,0
% ÓXIDO DE ALUMÍNIO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,0 - 24,0	20,0 - 22,0
% ÓXIDO DE CÁLCIO	CaO	1,3 - 1,6	0,9 - 1,3
% ÓXIDO DE MAGNÉSIO	MgO	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7
% ÓXIDO DE SÓDIO	Na <sub>2</sub> O	11,5 - 13,0	11,5 - 13,0
% ÓXIDO DE POTÁSSIO	K <sub>2</sub> O	4,5 - 6,5	5,5 - 7,5
% ÓXIDO DE FERRO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5 - 3,5	1,8 - 2,5
% ÓXIDO DE TITÂNIO	TiO <sub>2</sub>	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3
% PERDA AO FOGO	P.F	5,5 - 7,0	1,0 - 2,0

Fonte: Empresas Rio Deserto - Laboratório CIRDE

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos que servem de base para a elaboração do trabalho.

### 2.1 GEOLOGIA E MINERALOGIA

#### 2.1.1 Classificação dos Depósitos de Nefelina-sienito

As nefelina-sienitos têm uma grande variedade de texturas que podem ser genericamente classificadas de acordo com a origem da rocha; nefelina-sienitos plutônicos ou hipabissais, nefelina-sienitos pegmatitos, e rochas nefelina-migmáticas ou “gnaisses nefelinizados”.

Vários métodos podem ser utilizados para classificar os depósitos de nefelina sienito; pela percentagem dos principais minerais presentes no depósito, pela sua origem e também pela sua cor. Apesar da grande variedade de nomes que têm sido dado, as rochas contendo nefelina e o termo “nefelina-sienito” tem sido empregado a qualquer depósito contendo 5% ou mais de nefelina, normalmente só terá interesse comercial uma rocha que contenha pelo menos 20% de nefelina.

Apesar destas rochas serem denominadas preferencialmente de nefelina-sienitos, como praticamente todos sienitos felspatóidicos possuem nefelina, considerou-se conveniente sub-dividir as nefelina-sienitos com base em sua associação com os feldspatos alcalinos e com outros minerais presentes, conforme segue abaixo:

- Litchfildito: nefelina-sienito composta essencialmente de nefelina, albita e feldspato potássico, com biotita, cancrinita e sodalita em menor proporção.
- Juvita: nefelina-sienito composta de nefelina e feldspato potássico sendo que normalmente a nefelina é substituída pela cancrinita e mica branca.
- Foialita: nefelina-sienito de cor cinza, verde ou avermelhada, contendo quase a mesma proporção de nefelina e feldspato potássico perítico, e menor quantidade de máficos como o piroxênio a hornblenda e a biotita.

- Teralita: uma nefelina-gabro, composta essencialmente de andesita, nefelina e piroxênio.
- Urtita: uma rocha contendo mais de 70% de nefelina e sem feldspato, com menor proporção de aegirina e apatita.
- Ijolita: uma rocha contendo menos de 70% de nefelina com aegirina e menos apatita.
- Jacupiranguita: uma nefelina-gabro contendo augita titanífera, biotita magnetita e ilmenita, com nefelina subordinada.
- Fonólito: equivalente vulcânico da nefelina-sienito.

Considerando-se a utilização comercial dos tipos de rocha classificados acima, somente as variedades mais leucocráticas podem ser consideradas as mais relevantes.

### 2.1.2 Mineralogia

Nefelina-sienitos são rochas ígneas alcalinas plutônicas, provenientes de magma rico em álcali e deficiente em sílica, formando aluminosilicatos contendo sódio e/ou potássio e nunca associadas com quartzo livre, formando preferencialmente o feldspatóide nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ) ao invés do feldspato albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), caracterizadas pela ausência de quartzo livre e presença do mineral nefelina. A principal diferença em relação às rochas feldspáticas diz respeito à composição química, deficiente em sílica, porém com um maior teor de álcalis (sódio e potássio) e alumina.

Feldspatóides, na qual a nefelina é o mais comum, e feldspatos alcalinos são, por definição, os componentes essenciais das nefelina-sienitos e fonólitos e, devido a natureza e cor clara são denominados constituintes félsicos ou leucocráticos. Outros silicatos também bastante presentes incluem piroxênios, micas e uma variedade de anfibólios. Estes minerais usualmente são escuros e denominados melanocráticos ou, em referência a seu conteúdo de ferro e magnésio, ferro-magnesianos ou máficos. Outros minerais como o zircão, apatita, granada, normalmente ocorrem em pequenas quantidades e são denominados minerais acessórios.

As nefelina-sienitos pertencem à categoria das rochas de composição feldspatóidica, constituídas essencialmente de feldspatos e feldspatóides na proporção de 80 a 95% do total, sendo os feldspatos potássicos (ortoclásio e microclínio),

feldspatóides (nefelina e sodalita) e plagioclásios sódicos (normalmente albita ou oligoclásio), podendo a proporção destes minerais variar amplamente. Tipicamente a nefelina compõe 20 a 30% da rocha. Biotita, hornblenda, magnetita e piroxênio são os minerais acessórios mais comuns. Outros minerais que podem ocorrer em pequenas quantidades são a muscovita, sodalita, cancrinita, zircão, apatita, coríndon, titanita, ilmenita, escapolita, calcita, turmalina, pirita, vesuvianita, clorita e zeolitas (Hewitt, 1980).

Dentre estes, os minerais ricos em ferro e titânio podem interferir na cor do produto final quando estiverem em determinadas proporções, desqualificando a jazida para utilização em alguns segmentos da indústria.

Nefelina é o mais comum dos minerais feldspatóides, que pertencem ao grupo que também inclui a leucita ( $\text{KAlSiO}_4$ ), sodalita ( $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$ ) e cancrinita ( $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6(\text{HCO}_3)_2$ ). Ela cristaliza no sistema hexagonal com dureza na escala Mohs de 6 e peso específico de 2,6. Formam cristais de aparência holoédrica e hábito prismático por efeito das maclas miméticas. Como elemento das rochas apresenta-se em cristais ou agregados irregulares; clivagem imperfeita, fratura concóide e desigual, brilho vítreo nas faces. Pode ser incolor, porém quase sempre branco ou cinzento claro, também cinzento esverdeado, amarelado, rosado, verde azulado. As variedades são a eleolita; massas turvas, de cor cinzenta, rosada ou azul envoltas às vezes por uma casca aporcelanada de meteorização, e a nefelina; que são minerais bem desenvolvidos em todo seu contorno, incolores, esbranquiçados ou cinzentos. (Leprevost, 1975).

O termo genérico Feldspato é utilizado para denominar um grupo de minerais da família dos tectosilicatos (tetraedros de  $\text{SiO}_2$  polimerizados no espaço tridimensional), onde ocorreu substituição parcial do silício pelo alumínio, contendo predominantemente sódio, potássio ou cálcio, sendo estes considerados soluções sólidas dos minerais albita, anortita e ortoclásio (tabela 2.1), constituindo o grupo de minerais mais abundantes na crosta terrestre.

Os piroxênios mais comuns presentes neste tipo de rocha são os membros da aegirina, cuja composição teórica é 52,0%  $\text{SiO}_2$ ; 34,6%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 13,4%  $\text{Na}_2\text{O}$  e o diopsídio com 55,6%  $\text{SiO}_2$ ; 25,9%  $\text{CaO}$  e 18,5%  $\text{MgO}$ .

Também se faz presente nas nefelina-sienitos uma ampla variedade de anfibólios, incluindo hornblenda, hastingsita, arfvedsonita e ribekita. Estes são aluminosilicatos de cálcio, magnésio, sódio e ferro, de várias composições. Outro

mineral comum de se encontrar em rochas felspatóidicas é a biotita na variedade ouro-marrom, porém mais freqüentemente a variedade de alto ferro denominado lepidomelano que é um aluminossilicato hidratado de potássio, ferro e magnésio.

Os minerais acessórios mais freqüentemente encontrados são a sodalita, noselita, escapolita, cancrinita, calcita, apatita, magnetita, ilmenita, hematita, pirita, zircão, esfeno, pirocloro e coríndon.

Tabela 2.1- Composição teórica dos principais feldspatos

FELDSPATOS	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
Microclínio	16,9			18,4	64,7
Ortoclásio	16,9			18,4	64,7
Albita		11,8		19,4	68,8
Anortita			20,1	36,6	43,3

Fonte: Industrial Minerals and Rocks 1995.

## 2.2 OCORRÊNCIAS

Rochas que contenham feldspatos de importância comercial ocorrem geralmente em pegmatitos e outras intrusões ígneas maciças como os alaskitos e aplitos, no granito gráfico, pertita, nas areias feldspáticas de praias, dunas e rios como também em nefelina-sienitos (Rogers & Neal, 1983). O pegmatito é uma rocha que ocorre às margens de intrusões graníticas, variando em composição de granitos para granodioritos. O alaskito é uma rocha granítica de granulação grossa com composição mineralógica relativamente uniforme, com 45% de oligoclásio, 20% microclínio, 10% muscovita, 20% quartzo e muito poucos minerais escuros. O aplito, no contexto de feldspato comercial pode ocorrer de várias formas, entre elas a rocha granítica de granulação fina com textura adular, com abundância de oligoclásio e com alto teor de cálcio e alumínio. Como também as areias feldspáticas (Castle, J.E. 1960)

Nefelina-sienito é uma rocha ígnea intrusiva constituída de nefelina, feldspatos sódicos e potássicos e minerais acessórios, ocorrendo em pequenas estruturas plutônicas ou anelares concêntricas. Algumas massas alongadas gnáissicas podem resultar da alteração de gnaisses por nefelinização. As jazidas provenientes de plutonismos normalmente apresentam estruturas mais abertas e livres de intercrescimentos máficos

do que as provenientes de estruturas anelares. Os materiais com este tipo de estrutura apresentam maior facilidade de beneficiamento, sendo portanto o tipo preferido.

Nefelina-sienitos são rochas relativamente raras. Na Europa existem várias ocorrências na Noruega, Suécia e Finlândia, uma ocorrência na Inglaterra, uma na França e outra em Portugal. Na América do Norte são encontradas ocorrências no Texas, Arkansas e Massachussetts, nos Estados Unidos, e em Ontário e Columbia Britânica, no Canadá. Na América do Sul ocorrem basicamente no Brasil, nos estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina. Também existem ocorrências na África do Sul, Madagascar, Índia, Tasmânia, Timor e Turkestão.

As regiões no mundo que possuem depósitos de nefelina-sienitos de importância comercial são o Canadá e a Noruega, que produzem para a indústria cerâmica e vidreira, e a Rússia, para a produção de alumina e cimento. No Canadá a Unimin Corporation explora e produz o minério em Blue Mountain, próximo a Peterborough, Ontário. Na Noruega, a exploração e beneficiamento do minério é realizada pela Elkem Nefelin S.A em sua mina subterrânea em Island of Stjernoy, Alta Fjord.

As rochas pré-cambrianas do sudoeste de Ontário contem uma variedade de ocorrências e foram tema de numerosos estudos. O depósito de “Blue Mountain” em Ontário é o mais importante deles, composto de uma intrusão irregular constituindo de 22% de nefelina, 54% albita, 20% microclínio e 4% magnetita e biotita e outros minerais máficos. Se trata de uma rocha leucocrática na qual a biotita e magnetita tendem a ocorrer nas franjas do depósito e a hastinsita e magnetita (com menor proporção de aegirina e zircão) nas partes internas da intrusão. A rocha é tipicamente branca, granulação média, com textura granítica aberta. Os minerais escuros são normalmente liberados cominuindo-se abaixo de 20 mesh, o que torna possível o beneficiamento efetivo por separação magnética a seco (Guillet, 1994).

Em French River, também na região de Ontário, a 60 km ao sul de Sudbury, encontram-se dois corpos lenticulares, ambos inclusos em um sienito alcalino rosa. Sua composição mineral é aproximadamente 40% de albita, 30% de microclínio, 20% de nefelina e 10% de biotita, com menor proporção de grafita, zircão, pirita, magnetita e hornblenda (Guillet, 1994).

Na Noruega o depósito de nefelina-sienito está localizado na província da Caledônia, que contém rochas básicas e ultrabásicas em uma extensão de 30 km<sup>2</sup>.

Existem dois tipos de Nefelina sienitos, o que possui biotita e o que possui hornblenda. Ambos consistem essencialmente de feldspato perítico (56%) e nefelina (34%). Juntos em menor proporção ocorrem o plagioclásio, calcita, clinopiroxênio, hornblenda, biotita, esfero e magnetita. No tipo que possui biotita, o mineral máfico predominante é a biotita (2,5 a 6,0%) e no outro é a hornblenda (0,3 a 3,8%) e aegirina (1,3 a 3,8%), junto com uma pequena quantidade de biotita. O depósito situa-se próximo a costa meridional da ilha de Stejrnøy elevando-se a uma altitude de 250 a 700 m acima do nível do mar.

### 2.3 EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO

Uma vez que é bastante incomum encontrar rochas nefelínicas que podem ser comercializadas diretamente para utilização nas indústrias cerâmicas e de vidro, sem a necessidade de beneficiamento, faz-se necessário testar sua susceptibilidade a uma ou mais técnicas de beneficiamento.

O material amostrado para ser caracterizado, deve ser representativo da jazida e testado, inicialmente em escala de laboratório, à separação magnética. É possível proceder ao ajuste da intensidade do campo e dos *splitters* da máquina baseado na avaliação visual da fração não magnética. Minerais escuros, como a magnetita, biotita, hornblenda, aegirina, pirita e turmalina, são prontamente removidos. Se o resultado da separação magnética a seco estiver próxima do aceitável, algum melhoramento adicional pode ser possível pela adição de outro separador a seco ou usando processo de separação a úmido ou por flotação. É desnecessário comentar que o processamento a seco é preferível do ponto de vista de custos. Em geral, os produtos flotados são de alguma forma melhores que aqueles produzidos por separação magnética a seco, mas as custas de maiores perdas e custo adicional.

Para aplicações cerâmicas a nefelina-sienito proporciona uma importante propriedade fluxante nas misturas, o produto é normalmente moído abaixo de 200 ou 325 “mesh” em moinho de seixos. É importante checar o ponto de fusão (PCE, pyrometric cone equivalent) e a alvura do produto fundido.

A nefelina-sienito é normalmente processada via seca sofrendo britagem, moagem, secagem para retirada de umidade residual, e redução dos minerais que contêm ferro. Após uma suficiente redução da granulometria, geralmente abaixo de 25

“mesh”, é empregada a separação magnética para extrair os minerais ferrosos, para que o produto beneficiado contenha menos do que 0,1 % de ferro, expresso em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Durante este processo, aproximadamente um quarto da rocha é perdida por descarte, sendo então moída para afinar o produto. O controle de qualidade deve ser mantido ao longo de todo o processo para garantir uma composição química e granulométrica consistente e ao mesmo tempo salvaguardar o produto final de contaminação subsequente. Como o processo é via seca, é necessário um controle de poeira que, além de causar problemas de saúde, incorre em obstrução no peneiramento, interfere no controle granulométrico e reduz a eficiência da separação magnética devido ao recobrimento superficial das partículas minerais.

O desenvolvimento da separação magnética via úmida em processo contínuo, possibilita sua utilização no beneficiamento da nefelina-sienito. Entretanto, em lugares de clima frio o tratamento requer consideráveis modificações pelo congelamento durante o inverno, refletindo em um significativo aumento dos custos operacionais e um aumento do consumo energético para secagem do produto, tornando sua implantação proibitiva.

O fonólito, devido a necessidade de ser moído muito fino para ser beneficiado por separação magnética, somente é beneficiado em sua condição natural, devendo possuir em sua estrutura um percentual de ferro bastante baixo para ser considerado comercializável. É processado em uma mina à céu aberto na Alemanha Oriental, República Tcheca e República Eslovaca. Na Rússia, os concentrados de nefelina são obtidos por flotação como sub-produto do tratamento de apatita, e são empregados como fonte de alumina. O uso da flotação na separação de nefelina foi estudado no Canadá, porém não foi utilizada, provavelmente devido aos custos.

Os principais países que beneficiam a nefelina sienito são o Canadá e a Noruega, onde possuem grandes depósitos, para a indústria cerâmica e vidreira. Na Rússia são usadas para produção de alumina e cimento.

A nefelina-sienito de Blue Mountain, no Canadá, é um notável pacote rochoso uniforme de granulação média a fina (0,5 – 1,0 mm), leucocrática, composta essencialmente por nefelina, albita e microclínio com quantidades variadas de magnetita, biotita, hastingsita e aegirina, enquanto a muscovita, granada, coríndon, zircão, calcita, apatita e esfeno são minerais acessórios. Consistindo em 54% de albita, 20% de microclínio, 22% de nefelina, 2% de muscovita e 2% de minerais máficos (Mac

Gregor, 1983). Uma análise química típica pode ser visualizada na tabela 2.2. Os minerais máficos são liberados normalmente cominuindo-se a 20 mesh, tornando possível um beneficiamento efetivo por separação magnética a seco.

Tabela 2.2- Composição típica da nefelina-sienito de Blue Mountain

SUBSTÂNCIA	%
SiO <sub>2</sub>	59,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,15
Na <sub>2</sub> O	10,48
K <sub>2</sub> O	3,94
CaO	0,76
MgO	0,17
TiO <sub>2</sub>	0,064
ZrO <sub>2</sub>	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,021
Perda ao Fogo	0,40
	100,28

Fonte: Derry and Phipps, 1957

A Unimin opera duas plantas de beneficiamento, a Indusmin e a IMC (*International Minerals and Chemical Corporation*) que são bastante similares e ambas são baseadas em processo de separação magnética via seca. A capacidade de operação da planta da IMC é de 1.000 t/dia. Um fluxograma típico do processo pode ser visto na figura 2.1. O minério ROM extraído é descarregado diretamente em um britador de mandíbulas Allis-Chalmers com abertura de alimentação entre 1 e 1,2 m e descarga de 180 mm. A britagem secundária é executada por intermédio de um britador cônico com abertura de descarga de 50 mm. Após a britagem secundária o material é depositado em um silo de estocagem com capacidade para 4.000 t. A britagem primária e secundária é operada em um único turno por dia enquanto o resto do processo de moagem é contínuo.

O material britado é retomado através de correia subterrânea e conduzido a um secador rotativo de 15 m e transportado para um silo de 207 toneladas de capacidade.

Deste silo é passado sobre uma série de peneiras vibratórias de duplo deck em circuito fechado com dois britadores cônicos Symons, cabeça curta e um moinho impactor.

O produto acima de 30 mesh é rebitado no britador de cone ou de impacto e o produto abaixo de 30 mesh (0,6 mm) é passado em circuito de separadores magnéticos de baixa intensidade para remover a magnetita e qualquer outro mineral fortemente magnético. O produto não magnético é passado em outras peneiras para remover o *oversize*, antes de ser direcionado ao banco de separadores magnéticos dotados de um rolo de baixa intensidade e dois rolos de alta intensidade, tipo Exolon, para que todo mineral que contenha ferro, mesmo que fracamente magnético, seja removido. Os produtos magnéticos são depositados em uma piscina de rejeitos. O diagrama em blocos da figura 2.1 mostra o processo de beneficiamento empregado na Unimin Canada Limited.

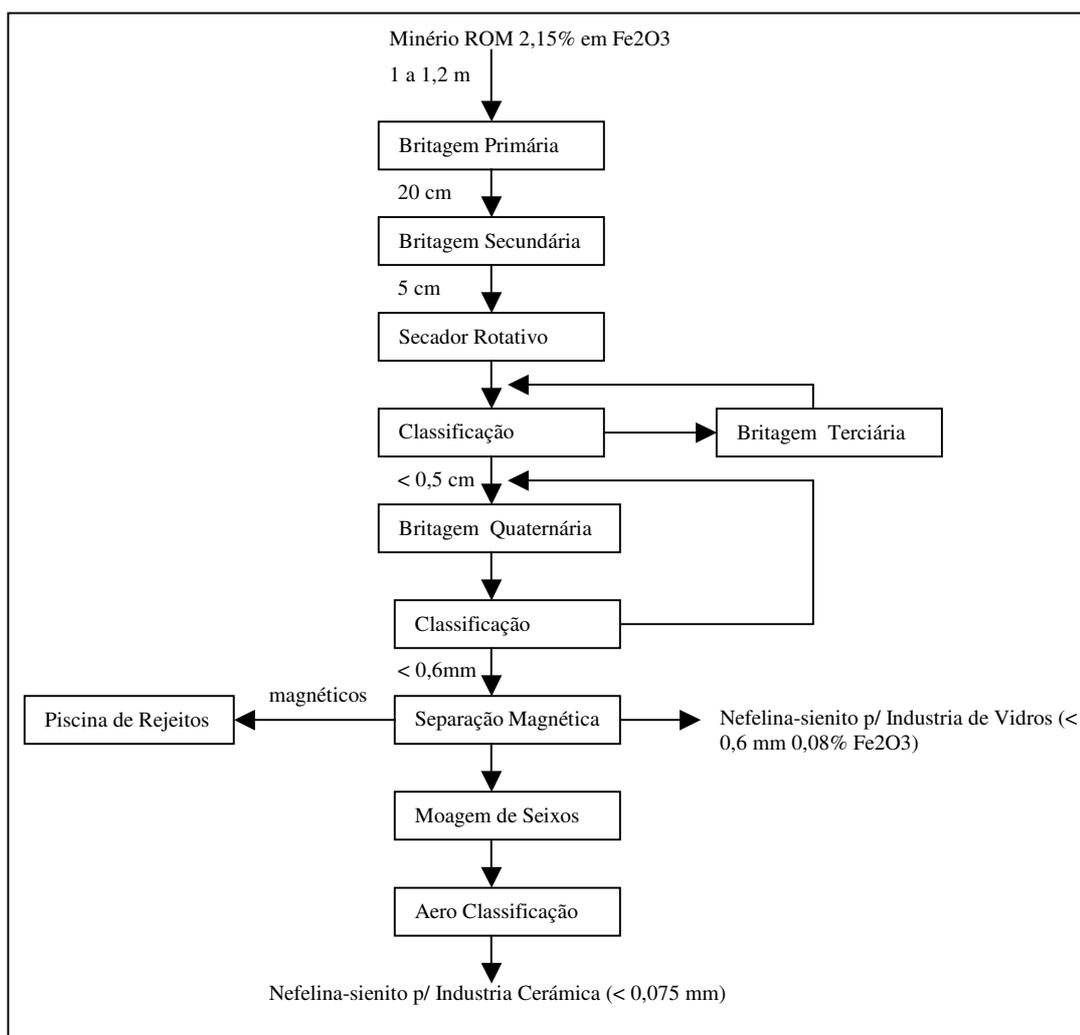


Figura 2.1 – Diagrama de Beneficiamento da Nefelina Sienito de Blue Mountain, Ontário (Minnes et al., 1983).

Durante este processo o teor de ferro da nefelina-sienito é reduzido de aproximadamente 2% para 0,08%, e em torno de 25% da rocha que alimentou a planta é removida como rejeito, com exceção da magnetita, que é vendida como minério de ferro. O produto não magnético é uma nefelina-sienito de granulometria menor que 0,6 mm. O produto padrão areia branca é vendido ao mercado vidreiro, tendo um conteúdo residual de ferro não superior a 0,08% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Uma parte do produto *glass-grade*, é transformado em grau cerâmico (*ceramic-grade*) ou em *fillers* através de moagem em moinho de seixos operado em circuito fechado com um aero-classificador (Guillet, 1994).

## 2.4 PROPRIEDADES

A nefelina-sienito não é diferente de qualquer outro *commodity* quando se avalia o seu potencial de desenvolvimento. Um produto consistente e uniforme é indispensável e, devido ao custo de transporte, a acessibilidade ao mercado consumidor deve ser avaliada com muito cuidado.

Um dos primeiros requisitos para que a nefelina-sienito possa ser potencialmente comercializada é que a jazida seja uniforme, ou seja, apresente constância em suas propriedades físicas e químicas apresentando coloração clara, granulação grossa, sem alterações significativas e textura aberta com um mínimo de intercrescimento mineralógico. Estes depósitos devem ser suficientemente grandes para vários anos de exploração e preferencialmente massivos ou moderadamente gnáissicos. Diques e veios de nefelina-sienito são normalmente muito pequenos, e fonólitos têm granulação muito fina para um beneficiamento efetivo. A experiência tem demonstrado que rochas massivas claras de depósitos gnáissicos, em que a biotita e a magnetita são os principais minerais escuros, constituem juntas não mais que 5% da rocha, tendo boas chances de resultarem em produtos com baixos teores de ferro, possibilitando beneficiamento por separação magnética a seco. Indispensável dizer que, quanto maior o conteúdo de nefelina melhor, uma vez que a nefelina contribui consideravelmente com alumina e álcalis; porém, no que diz respeito ao ferro presente nos minerais máficos se dá o inverso, ou seja, quanto mais ferro presente pior. Mesmo qualquer quantidade de ferro irá contribuir na cor do produto final. O fato é que muitos íons

metálicos, particularmente o ferro, titânio, cromo, magnésio, cobre e cobalto, são agentes colorantes muito fortes e o ideal é que estivessem virtualmente ausentes nos produtos. Minerais refratários como o coríndon, zircão e grafita também são indesejáveis uma vez que não fundem nas temperaturas normais de processo, gerando inclusões e fragilizando o produto. Igualmente, um mineral escuro não removido pelo beneficiamento pode causar uma mancha indesejável na louça cerâmica. Um alto índice de alvura é particularmente importante para utilização como carga na indústria.

## 2.4.1 Mineralógicas

### 2.4.1.1 Feldspatos e Feldspatóides

Os feldspatos formam um dos grupos mais importantes e são minerais encontrados em 60% da crosta terrestre. São silicatos de alumínio com potássio, sódio e cálcio e, raramente, bário, com diferentes tipos de soluções sólidas e diversos graus de ordenamento, cujos termos extremos são: albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), ortoclásio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ).

Os feldspatos raramente se apresentam puros, estando geralmente sob a forma de cristais mistos. São divididos nos grupos de alcalinos (grupo A), ricos em  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , e plagioclásios (grupo B), ricos em  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{+2}$ . Atualmente engloba-se em um terceiro grupo, os feldspatos que contêm  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{+2}$  (grupo C). Deste modo, os feldspatos podem ser considerados como soluções sólidas de ortoclásio (Or), albita (Ab) e anortita (An), cujas composições podem ser expressas em função do sistema por eles formado, figura 2.2.

A série compreendida entre o feldspato potássico ortoclásio e o feldspato sódico albita, reflete as relações de miscibilidade no estado sólido, cujos termos são: microclínio ( $\text{Or}_{100-95}\text{Ab}_{0-5}$ ), ortoclásio ( $\text{Or}_{100-85}\text{Ab}_{0-15}$ ), sanidina ( $\text{Or}_{100-40}\text{Ab}_{0-60}$ ) e anortoclásio ( $\text{Or}_{40-10}\text{Ab}_{60-90}$ ). Já a série compreendida entre feldspato sódico albita e o feldspato cálcico anortita é denominada série dos plagioclásios ou calco-sódicos. Formam uma série isomórfica cujos termos são: albita ( $\text{Ab}_{100-80}\text{Ab}_{0-10}$ ), oligoclásio ( $\text{Ab}_{90-70}\text{Ab}_{10-30}$ ), andesina ( $\text{Ab}_{70-50}\text{Ab}_{30-50}$ ), labradorita ( $\text{Ab}_{50-30}\text{Ab}_{50-70}$ ), bitownita ( $\text{Ab}_{30-10}\text{Ab}_{70-90}$ ), anortita ( $\text{Ab}_{10-0}\text{Ab}_{90-100}$ ).

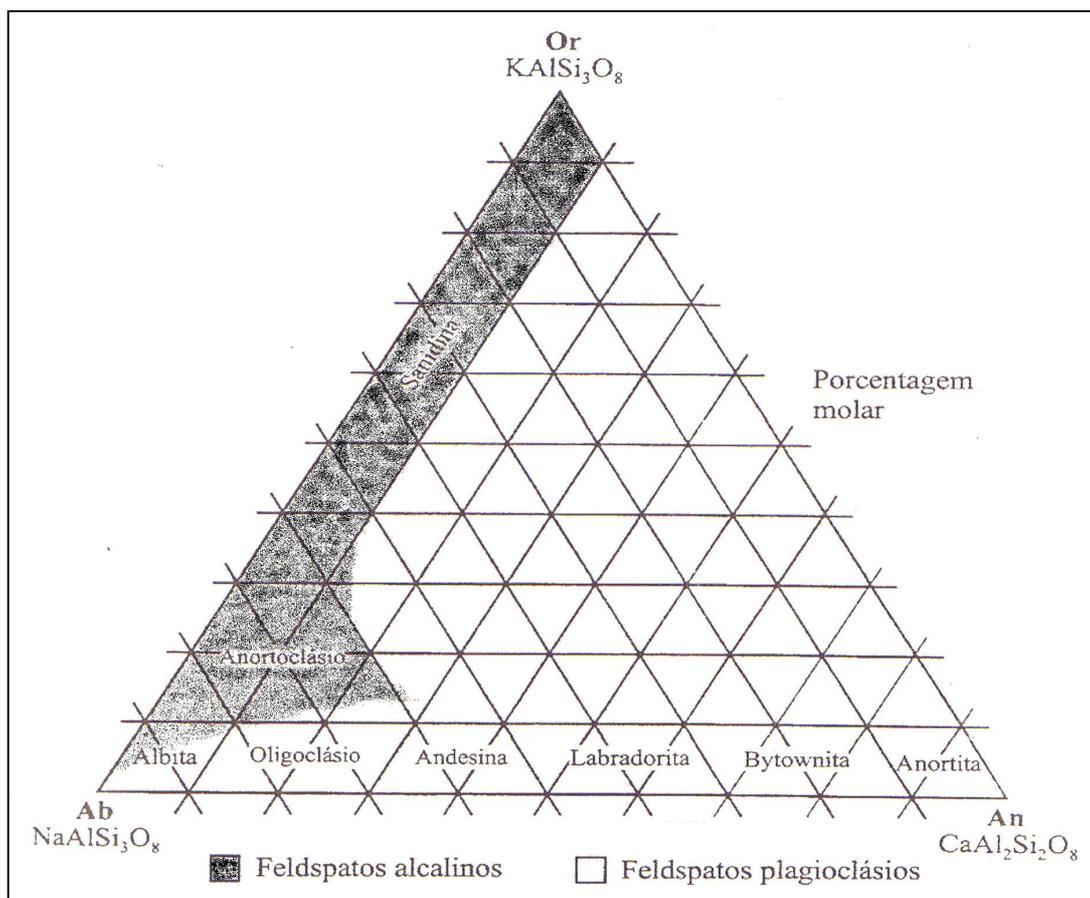


Figura 2.2- Composição do Feldspato, segundo Hurlbut e Klein (1995).

Os feldspatos pertencem à classe dos tectossilicatos, cuja característica principal é a estrutura formada pelo enlace de tetraedros  $\text{AlO}_4$  com tetraedros  $\text{SiO}_4$ , compartilhando oxigênios para formar uma armação tridimensional. São representados pela fórmula  $\text{W}(\text{ZO}_2)_4$ , onde W é um cátion de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{+2}$ , os quais possuem raio iônico grande o suficiente para preencher os sítios octaédricos e neutralizar as cargas negativas do máximo de oxigênios, e Z-O são os sítios tetraédricos, onde Z é  $\text{Si}^{+4}$  ou  $\text{Al}^{+3}$ . Para haver o balanceamento das cargas, um ou dois dos quatro sítios tetraédricos podem estar preenchidos com um  $\text{Al}^{+3}$ ; logo, os outros dois ou três sítios tetraédricos, respectivamente, têm que estar preenchidos com Si.

No caso dos alcalinos,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , que são monovalentes, ocorre apenas a presença de um sítio com  $\text{Al}^{+3}$ , formando uma unidade  $\text{K}(\text{AlO}_2)(\text{SiO}_2)_3$  – ortoclásio e  $\text{Na}(\text{AlO}_2)(\text{SiO}_2)_3$  – albita. Enquanto que, para o  $\text{Ca}^{+2}$ , que é bivalente, ocorre duas substituições, formando  $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_2$  – anortita.

O tamanho do cátion W influencia a estrutura do ponto de vista de simetria e balanceamento de carga elétrica. No caso do feldspato do grupo A, onde  $K^+$  tem raio iônico grande ( $r = 1,4 \text{ \AA}$ ), ocorre uma assimetria com relação ao sítio de  $Al^{+3}$ , além deste cátion poder ser substituído por outros cátions menores. No caso de feldspatos do grupo B, onde  $Na^+$  é um pouco menor ( $r = 1 \text{ \AA}$ ) e não distorce o interstício dos tetraedros, a simetria é mantida com mais facilidade. O cátion  $Ca^{+2}$  ( $r = 1 \text{ \AA}$ ), por ser bivalente, aceita duas substituições de  $Si^{+4}$ , formando a anortita. Entre a albita e a anortita existe uma solução sólida ao longo de toda a linha do diagrama binário, formando os plagioclásios, enquanto que entre o ortoclásio e a anortita a solubilidade é limitada a baixas concentrações (Worral, 1982).

Os feldspatos são caracterizados por não apresentarem um ponto definido de temperatura de fusão, mas sim um intervalo de temperatura, normalmente compreendido entre  $1140^\circ \text{ C}$  e  $1280^\circ \text{ C}$ . Suas propriedades físicas são influenciadas diretamente pelo teor de  $Na_2O$ ,  $K_2O$  e  $CaO$ . Esses teores não são constantes, pois em várias jazidas encontra-se valores diferentes de alcalinos e alcalinos terrosos, além de solução sólida entre vários feldspatos (Worral, 1982).

Como produto da dissociação do feldspato tem-se a caolinita, sílica e carbonatos. A caolinita transforma-se em meta-kaolinita, que por sua vez, pode formar mulita e sílica. Durante o processo de sinterização a matriz silicática, rica em óxidos fundentes, forma um líquido viscoso que preenche a porosidade inerente ao processo de fabricação, provocando uma densificação com diminuição do volume total do produto cerâmico. Durante o resfriamento, este líquido não recristaliza completamente, dando origem à fase vítrea. A quantidade de fase vítrea formada depende de parâmetros de processo, tais como a taxa de resfriamento e propriedades do líquido, como por exemplo a viscosidade (Taylor, 1986).

Os feldspatóides são quimicamente semelhantes aos feldspatos. Têm aluminossilicatos de potássio e sódio como constituintes principais, com quantidades menores de outros íons. A principal diferença química entre os feldspatóides e os feldspatos reside na quantidade de sílica. Os feldspatóides contêm cerca de dois terços da sílica existente nos feldspatos alcalinos e, por isso, tendem a formar soluções ricas em álcalis (sódio e potássio) e pobres em sílica. Suas estruturas são de aluminossilicatos tridimensionais em cujos interstícios situam-se os cátions (Dana, 1995). Os feldspatóides são minerais com fórmula  $W(SiAlO_4)$ , onde W é um cátion  $Na^+$  ou  $K^+$ .

Observa-se que o feldspatóide possui uma relação Si:Al de 1:1, enquanto no feldspato esta relação é 3:1. esta carência de  $\text{Si}^{+4}$  na estrutura é responsável pela sua característica fortemente fundente durante o processo de sinterização.

#### 2.4.1.2 Piroxênios

Os piroxênios são grupos minerais que contêm ferro e/ou magnésio em suas estruturas, e suas ocorrências estão comumente associadas aos feldspatos plagioclásios. Os piroxênios possuem uma estrutura rígida, representada pela fórmula  $\text{W1W2Z}_2\text{O}_6$ , onde Z é o sítio tetraédrico, ocupado principalmente pelo Si.

W1 é o sítio octaédrico mais regular ocupado por cátions menores como o  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  e Ti. Este sítio está situado entre duas cadeias de modo que seus extremos estejam ligados com os oxigênios não-ponte. W2 é o sítio octaédrico menos regular que hospeda cátions maiores como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ .

A coordenação do sítio octaédrico depende do tamanho do cátion de modo que a estrutura se aproxima de um octaedro quando a ocupação é feita por  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$ , e distancia-se desta forma quando a ocupação é feita por  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Na}^+$ ; sendo que, neste último caso, os cátions podem-se ligar aos oxigênios ponte e causar distorção na estrutura.

Os piroxênios podem ser divididos em vários grupos, dependendo da substituição existente nos sítios W1 e W2. A augita é um piroxênio com  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{Fe}^{+2}$  em W1 e  $\text{Ca}^{+2}$  em W2, enquanto a aegirina é rica em  $\text{Na}^+$  -  $\text{Na Fe}^{+3}\text{Si}_2\text{O}_6$  – e entre as duas existe uma série completa de solução sólida, representada por membros de composição intermediária. A ocorrência de piroxênios é comumente associada aos feldspatos plagioclásios (Mussolin, 1996).

#### 2.4.2 Susceptibilidade Magnética

A separação magnética está baseada nos diferentes graus de magnetização que os minerais adquirem quando submetidos à ação de um campo magnético (Delboni, 1992). A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética. Com base nesta propriedade os minerais são

classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso tem-se os minerais ferromagnéticos e os paramagnéticos, e no segundo os diamagnéticos.

Os minerais diamagnéticos são aqueles que apresentam repulsão ao campo magnético aplicado, tendendo a se movimentar para posições de baixa intensidade de campo, como por exemplo o quartzo, cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, etc. Os minerais paramagnéticos são aqueles que apresentam atração ao campo magnético, ou seja, tendem a se movimentar para as posições de mais alta intensidade de campo. Dentro dessa classe, encontram-se os minerais ferromagnéticos, como o exemplo clássico da magnetita, que se diferenciam por possuírem susceptibilidade variável em função do campo aplicado e grau de magnetização muito maior, se comparados aos diamagnéticos e demais paramagnéticos (figura 2.3)

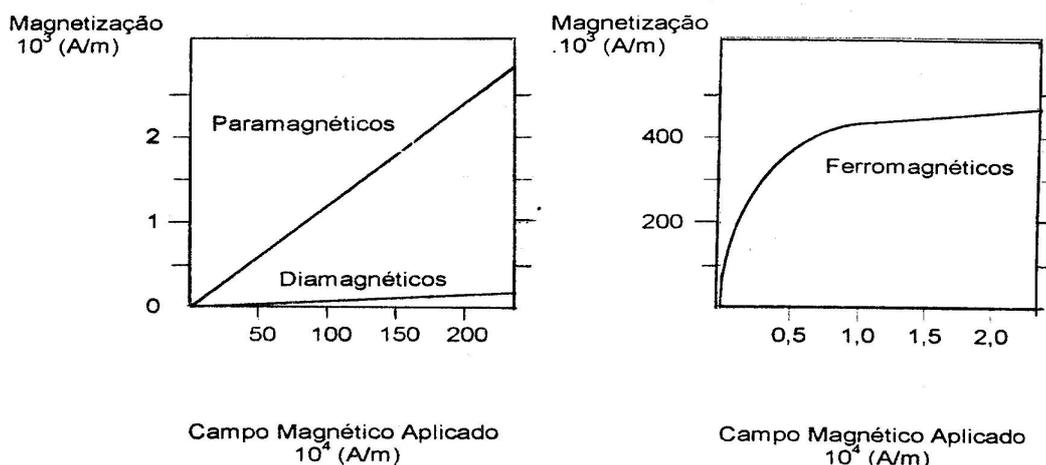


Figura 2.3 – Curvas de Magnetização para Minerais Paramagnéticos, Diamagnéticos e Ferromagnéticos (Delboni, 1992).

A separação magnética, como qualquer método de beneficiamento, é essencialmente técnica em suas aplicações práticas, mas não pode desprezar o fator econômico (Luz et al, 1995).

É impossível, na prática, obter uma separação completa dos constituintes minerais. Sabe-se, como regra geral, que, quanto maior o teor de concentrados, maiores são as perdas; ou seja, mais baixas são as recuperações. Como a obtenção de teores mais altos e melhores recuperações normalmente implicam em um aumento de custo no tratamento, esses itens devem ser devidamente balanceados para a obtenção de maiores lucros.

Há uma grande variedade de separadores magnéticos que podem ser classificados, de acordo com o uso, em dois grandes grupos, separadores a seco e a úmido. Estes também podem ser subdivididos de acordo com as características do campo de indução, como de baixa e alta intensidade. Assim são denominados separadores de tambor, de rolos induzidos ou de terras raras, de correias cruzadas, de carrossel, etc.

Um dos tipos de separadores magnéticos a úmido consiste na utilização de matrizes entre os pólos do eletroímã. Tais matrizes têm o objetivo de aumentar o gradiente produzindo sítios dentro das mesmas com campo de alta intensidade. Dentre os modelos utilizados destacam-se os de placas sulcadas, grades e lâ de aço. A matriz deve ser escolhida de forma que se ajuste às características do minério devendo para isto ser feitas algumas considerações, tais como o gradiente máximo de campo, área superficial de captação por unidade de volume da zona da matriz, capacidade de limpeza da matriz (retirada das partículas magnéticas), porosidade da matriz, para permitir a vazão da polpa, e material usado na fabricação das matrizes, que deve reter o mínimo de magnetização quando removidos do campo. Um exemplo clássico deste tipo são os separadores magnéticos tipo Jones para laboratório. Outro separador a úmido de alta intensidade para circuito contínuo é o separador tipo carrossel, por possuir um anel rotativo que atravessa um campo magnético, onde são instaladas as matrizes, sendo que a alimentação na forma de polpa atravessa uma região com campo de alta intensidade e o material magnético é captado pela matriz, ou pelo menos é retardado o suficiente para ser carregado pelo movimento do anel rotativo a uma região de campo com baixa intensidade, onde as partículas magnéticas, remanescentes na matriz, são descarregadas por meio de um jato d'água, sendo o material magnético recolhido num determinado ponto da calha coletora.

No separador magnético de rolos o material é conduzido à uma esteira dotada de um rolo magnético induzido por campo elétrico ou com imã permanente usando terras raras formando ligas de samário-cobalto (Sm-Co) e de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B). O mineral conduzido à esteira deve ser introduzido sob a forma de uma camada fina para garantir o contato direto da partícula com o rolo magnetizado. Na descarga da esteira a fração não magnética é projetada à frente, uma vez que não adere ao rolo, enquanto a magnética, devido a atração do rolo projeta-se mais atrás, separando-se ambas as frações por um defletor denominado *splitter*. Os parâmetros que podem ser

controlados neste tipo de equipamento são a taxa de alimentação da esteira, a velocidade da correia e a inclinação do *splitter*. O excesso de alimentação acarreta a formação de oclusões de minerais não magnéticos, dentro dos flocos magnéticos, prejudicando a separação a seco, principalmente quando se trabalha com material fino e de elevada susceptibilidade. Este tipo de equipamento pode ser fabricado desde modelos mais simples, dotados de um rolo até modelos mais sofisticados com rolos em série (Lawer et al, 1985).

## 2.5 INDÚSTRIA CERÂMICA

A cerâmica é produzida a partir de uma variedade de produtos minerais que compõem a massa cerâmica e o esmalte, denominados de biscoito e frita, respectivamente. A empresa Eliane, por exemplo, utiliza para composição da massa, matéria prima de diversas procedências: feldspato potássico (Campina Grande-PB e Governador Valadares-MG); feldspato sódico (Ponta Grossa-PR e Nova Trento-SC); calcário dolomítico (Rio Branco do Sul-PR); calcário calcítico (Almirante Tamandaré-PR); argilas regionais (Criciúma, Içara, Ermo e Lauro Müller); argilas de fora do estado (Pântano Grande-RS, Tijucas do Sul-PR e Campo Largo-PR); caulim (Campo Alegre-SC e Pântano Grande-PR); filito/talco (Castro e Ponta Grossa-PR); areia quatzosa (Urussanga-SC); rocha alcalina-fonólito (Lages-SC). A tabela 2.3 apresenta as principais especificações dos insumos minerais usados na produção da massa cerâmica.

Nos processos cerâmicos, os feldspatos o fonólito e a nefelina-sienito atuam como fundentes, auxiliando na formação da fase vítrea, tanto na massa cerâmica (biscoito), como no acabamento (vitrificação superficial). Também auxiliam na formação do biscoito através de uma fusão parcial e posterior vitrificação, cimentando, assim, os componentes mais refratários e os constituintes maiores parcialmente fundidos, numa massa cerâmica única endurecida (Moreira, 1984).

A frita para o esmalte compõe-se basicamente de: quartzo (sílica), carbonatos, feldspato K e Na, boratos, silicato e zircônio, óxidos (de zinco, chumbo, estanho, etc.) e wollastonita (silicato de cálcio).

Tabela 2.3 – Principais insumos minerais usados na produção da massa cerâmica.

Insumos	Especificação Química (%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
Feldspato Potássico	64,0	19,0	0,2	0,1	0,3	0,1	12,0	4,0	0,3
Feldspato Sódico	67,0	18,5	0,1	0,2	0,5	0,3	2,0	11,0	0,4
Calcário Dolomítico	4,0	1,0	0,1	0,4	30,0	21,0	0,2	0,1	40,0
Calcário Calcítico	8,0	1,7	0,1	0,4	45,0	4,5	0,2	0,1	40,0
Caulim	48,0	34	0,1	1,0	3,0	0,2	0,8	0,9	12
Filito	72,0	15,0	0,7	0,7	0,1	2,0	5,0	0,5	4,0
Talco	65,0	4,0	0,1	1,5	0,4	25,0	0,3	0,2	3,5
Areia Quartzosa	86,0	9,0	0,1	0,7	0,03	0,23	0,9	0,04	3,0
Argilas Regionais	64,0	21,0	0,7	2,5	0,5	1,0	3,0	0,3	7,0
Argila (RS)	56,0	29,0	0,9	1,8	0,5	0,6	0,8	0,4	10,0
Argila (PR)	76,0	15,0	0,6	1,5	0,6	0,6	1,2	0,5	4,0
Fonólito	50,0	23,0	0,1	3,0	0,4	0,5	12,0	5,0	6,0
Siltito	70,0	13,5	0,5	3,0	1,0	2,0	5,0	2,0	3,0
Argilito	68,0	17,5	0,6	4,0	0,3	1,1	4,0	0,5	4,0

Fonte: Sampaio et al, 2001

Na indústria cerâmica, o enxofre, o carbono e o ferro são elementos indesejáveis (contaminantes). O ferro presente nos feldspatos é eliminado através de vários processos, entre outros, separação magnética, flotação, lixiviação ácida etc. Calcário para uso tanto em esmaltes como em massas cerâmicas tem que conter o mínimo de ferro possível (inferior a 0,5% para a massa e 0,1% para esmaltes).

Os sulfetos, pirita e calcopirita presentes nas matérias primas podem provocar defeitos nas peças cerâmicas. Além disso, a eliminação do anidrido sulfuroso provoca muitas vezes pintas sobre os esmaltes; isto ocorre quando o resíduo de Fe encontra-se na presença de partículas de carbono ou CO, sendo reduzido, comportando-se, então, como um fundente enérgico a uma temperatura em torno de 1.050 °C.

### 2.5.1 Matérias Primas

As matérias primas para a produção de revestimentos cerâmicos são basicamente compostas por materiais naturais. Estas deverão ser selecionadas em função das propriedades do produto que se deseja fabricar, do que decorrerão as características do processo de fabricação. De modo geral, as matérias primas se dividem em dois grandes grupos: materiais plásticos e materiais não plásticos. As matérias-

primas plásticas são introduzidas na massa cerâmica com o objetivo de auxiliar no processo de conformação do corpo cerâmico, ou seja, na prensagem do substrato, pois a plasticidade é a propriedade que capacita um material a modificar permanentemente sua forma sem que haja ruptura, quando aplicada uma força externa, proporcionando a resistência necessária à sua manipulação. Já as matérias primas não plásticas são introduzidas visando a formação de fase vítrea durante o processo de sinterização, obtendo assim maior densificação do substrato cerâmico.

O corpo do revestimento é formado a partir de uma mistura de argilas, para dar plasticidade, areia quartzosa (fração não-plástica), para dar resistência estrutural, e carbonatos ou feldspatos, fonólitos e nefelina sienitos, para agirem como fundentes. Os vidrados cerâmicos são formados por areia, argila caulínica, fritas (compostos fundentes) e pigmentos à base de óxidos. As matérias-primas para a fabricação de revestimento cerâmico são freqüentemente misturadas e moídas, para obter um material homogêneo para o processo de conformação.

#### 2.5.1.1 Argilas

Entende-se por argila um produto inorgânico natural de aspecto terroso, formado por uma mistura de minerais argilosos, como caulinita, ilita, montmorilonita e clorita, com outros minerais não argilosos, como o quartzo, carbonatos, feldspatos, micas, sais solúveis, matéria orgânica e outros. Em essência, são silicatos aluminícos hidratados sendo, em alguns casos, o alumínio substituído por magnésio ou ferro.

#### 2.5.1.2 Caulim

Os caulins são argilas de alto conteúdo de caulinita, tendo como características baixa plasticidade, coloração branca após a sinterização e alta refratariedade.

Esse material recém extraído da jazida possui um alto conteúdo de sílica e uma granulometria grossa. Quando lavado, sua composição mineralógica é alterada, apresentando a caulinita como mineral argiloso predominante.

### 2.5.1.3 Quartzo

O quartzo é a forma cristalina da sílica ( $\text{SiO}_2$ ), sendo adicionada como matéria prima na forma de areia quartzítica com fina granulometria, tendo sua adição influência na diminuição da plasticidade da composição e no aumento do coeficiente de dilatação.

As argilas utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos possuem um elevado teor de sílica livre (aproximadamente 20%), tornando-se desnecessária a adição de quartzo em grandes proporções.

### 2.5.1.4 Talco

O talco é um silicato de magnésio que se apresenta com frequência associado a impurezas, como ferro, cálcio e óxidos alcalinos, sendo seu principal constituinte o silício.

O talco é adicionado à massa cerâmica com o objetivo de aumentar a resistência aos ácidos e diminuir a expansão por umidade do substrato cerâmico.

### 2.5.1.5 Feldspatos e Feldspatóides

Os feldspatos ocorrem normalmente em pegmatitos, rochas graníticas, alaskito, aplito, granito gráfico, areias de rio, de dunas e de praia, além de fonólitos e nefelina-sienitos. Já os feldspatóides ocorrem somente em rochas provenientes de magmas ricos em álcali e deficientes em sílica, como fonólitos e nefelina sienitos.

Os feldspatos e feldspatóides, devido ao elevado teor de álcalis, têm como principal característica sua atuação como fundente para auxiliar na formação da fase vítrea, tanto na massa cerâmica (biscoito), como no acabamento (vitrificação superficial), além de melhorar a compactação a verde e diminuir a retração de queima.

## 2.5.2 Processo de Fabricação de Revestimento Cerâmico

O processo de fabricação cerâmica consta, basicamente, das seguintes etapas: moagem, atomização, conformação, secagem, esmaltação, queima, classificação e embalagem. As variações no processo ocorrem em função do produto desejado.

### 2.5.2.1 Moagem

A operação é realizada em moinhos, intermitentes ou contínuos, resultando na homogeneização e na redução de tamanho das partículas. A fim de evitar a contaminação da matéria-prima, costuma-se usar, como carga moedora, esferas de alta alumina ou seixos de rochas (quartzo ou riolitos). O produto da moagem é uma suspensão de partículas finas em água, denominada barbotina, com 60-70% de sólidos. O controle granulométrico da moagem em função da granulometria 44  $\mu\text{m}$  permite obter os produtos com as seguintes especificações granulométricas:

Massa de biqueima 4,5 a 5,5 % (retido na malha 44  $\mu\text{m}$ );

Massa de monoqueima 4,5 a 5,5 % (retido na malha 44  $\mu\text{m}$ );

Massa de monoporosa 4,5 a 5,5 % (retido na malha 44  $\mu\text{m}$ );

Massa de porcelanato 1,0 a 1,5 % (retido na malha 44  $\mu\text{m}$ ).

### 2.5.2.2 Atomização

É realizada num equipamento denominado atomizador (*spray dryer*). A atomização tem por objetivo a produção de um pó com características de fluidez e umidade adequadas ao enchimento das cavidades da prensa, para formação do biscoito, ou seja da peça cerâmica sem esmalte.

A operação consiste na injeção da barbotina sob alta pressão (25 a 30 bar) dentro de uma câmara de secagem, onde entra em contato com ar a uma temperatura entre 500 a 600 °C. A evaporação da água é quase instantânea, e o contato das partículas com o ar quente promove a forma arredondada dos grânulos no atomizador.

### 2.5.2.3 Conformação

A conformação do pó atomizado resulta na formação das peças cerâmicas, as quais são obtidas através da utilização de prensas hidráulicas. As prensas possuem uma superfície móvel (punção) e outra fixa (estampo). A operação consiste em comprimir o pó atomizado (umidade entre 4 e 7%) entre as superfícies do equipamento, sob uma pressão que pode variar entre 200 e 400 kg/cm<sup>2</sup>, dependendo do tamanho da peça e tipo do produto desejado. A pressão promove o rearranjo e a deformação parcial dos grãos, de modo a permitir uma elevada compactação do corpo cerâmico.

### 2.5.2.4 Secagem

A operação tem por objetivo a redução da umidade da peça cerâmica, de modo a diminuir o tempo da operação de queima. Usualmente, a umidade de peça é de 0,1%. No processo de monoqueima, a secagem também tem a função de proporcionar um aumento da resistência do suporte cru, necessário para que a peça possa resistir aos choques durante o seu manuseio até o forno.

O secador pode ser do tipo túnel (secagem lenta) ou a rolo (secagem rápida). No primeiro, geralmente utilizado no processo de biqueima, as peças são empilhadas sobre carrinhos de base refratária. Esse tipo de secador utiliza o calor recuperado do ar de resfriamento dos fornos. A operação ocorre em temperaturas relativamente baixas e com elevados volumes. Por sua vez, no processo de monoqueima costuma-se usar secadores a rolo, de operação rápida, que podem ter concepção horizontal ou vertical. Nesses secadores, os corpos cerâmicos formam uma única camada sobre transportadores de correia ou sobre balancins (de grade ou de rolo). Os secadores a rolo são dotados de um gerador autônomo de calor, que permite variar as condições térmicas e higrométricas do ar.

### 2.5.2.5 Esmaltação

Inicia-se com a moagem das fritas e demais matérias-primas (caulim, quartzo, feldspato, corantes, etc.). O produto moído, com granulometria predominantemente

abaixo de 44  $\mu\text{m}$ , tem 50 a 60% de sólidos em peso e está pronto para a aplicação. A moagem é realizada em moinhos intermitentes, com carga moedora formada por bolas de alta alumina e revestimento também de alta alumina.

A operação de esmaltação consiste na aplicação de esmalte sobre o suporte queimado (biqueima) ou sobre o suporte cru (monoqueima). A aplicação pode ser realizada pelo sistema de cortina, por pulverização (*spray*) ou por cabine de discos giratórios. A técnica de véu fileira é a mais utilizada na biqueima tradicional; a de véu campana é mais utilizada na monoporosa, e a técnica onde se utiliza cabine de discos giratórios é mais aplicada na monoqueima. Após a aplicação de esmaltes é efetuada a decoração por técnicas de serigrafia, que pode ser plana ou em rolo giratório.

#### 2.5.2.6 Queima

A queima é responsável pelas características mecânicas e propriedades de inércia físico-química do produto. A operação é programada de acordo com o uso a que se destina a cerâmica.

Assim como os secadores, os fornos podem ser do tipo túnel (fornos lentos, usados na biqueima) ou do tipo rolo (fornos rápidos, usados na monoqueima). Atualmente, há uma grande predominância dos fornos a rolo. Nesses fornos, as peças cerâmicas são dispostas em uma única camada (monoestrato), o que permite com considerável aumento da superfície de contato quando esse processo é comparado à disposição em pilhas, usada nos fornos tipo túnel. Os fornos a rolo são dotados de queimadores de alta velocidade, que criam grande turbulência no canal de queima. Esses dois fatores possibilitam a redução do tempo de queima.

#### 2.5.2.7 Classificação e Embalagem

A etapa de classificação e embalagem consta de transporte das peças em correia, classificação visual e por sistema de leitura óptica (Sampaio et al, 2001).

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento deste trabalho na busca de uma matéria prima fundente para emprego no porcelanato cerâmico, teve como meta definir uma rota de processo que se mostrasse eficiente e ao mesmo tempo econômica, permitindo extrair os minerais contaminantes (com ferro em sua estrutura) a níveis aceitáveis, ou seja, a níveis que não interferissem no padrão de cor do produto final.

A rocha, de origem magmática, foi estudada na forma original (fragmento rochoso) e na forma moída (operação realizada pela empresa), indicando tratar-se de uma aegirina-nefelina-microsienito.

Os procedimentos de caracterização tecnológica realizados contemplaram ensaios tanto por via úmida como por via seca.

No tratamento via úmida realizou-se ensaios exploratórios de flotação e separação magnética a úmido. Já no tratamento via seca, utilizou-se somente o processo de separação magnética a seco em um separador industrial tipo ReRoll (terras raras).

Além das diversas técnicas empregadas, os ensaios foram realizados em diferentes escalas, ou seja, desde nível de bancada em laboratório até em regime industrial, buscando confirmar os resultados obtidos e a economicidade do processo.

Os ensaios de beneficiamento (separação magnética a seco, flotação e separação magnética a úmido) indicaram os parâmetros operacionais otimizados em cada processo, bem como os resultados analíticos decorrentes dos processos realizados em cinco faixas granulométricas. Amostras de todos os ensaios foram submetidas a análises químicas por fluorescência de raios X e, quando foi oportuno, utilizou-se as análises colorimétricas que comprovaram a eficácia dos procedimentos aplicados nas amostras.

Os resultados foram comentados de forma resumida no capítulo seguinte, considerando-se os aspectos mais evidentes em uma análise crítica dos dados, considerando os três principais conteúdos estabelecidos neste estudo: caracterização mineralógica, caracterização tecnológica e ensaios de beneficiamento.

### 3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a *caracterização mineralógica* foram utilizados quatro fragmentos de rocha sã retirados das frentes de lavra da jazida de nefelina-sienito, buscando-se representar da melhor forma possível o minério, considerando as variações estruturais e mineralógicas presentes na jazida.

Para a *caracterização tecnológica* e os ensaios de separação magnética a seco do *beneficiamento*, a Mineração e Pesquisa Brasileira forneceu uma amostra, com cerca de 20 kg correspondente aos produtos da cominuição realizada na empresa, em moinho industrial de rolos.

O objetivo de utilizar-se moagem em moinhos de rolos, ao invés de moinho de anéis que a empresa possui, se deve a dois fatores: o primeiro é a capacidade do moinho de rolos gerar menos finos, aumentando a proporção do material passível de ser submetido à separação magnética a seco; a outra vantagem é forma de quebra do minério, predominando o efeito de compressão ao invés de atrito, resultando em uma liberação mais eficiente das partículas minerais e favorecendo o fraturamento nas zonas de fraqueza que são justamente no contato entre as partículas minerais. O moinho de anéis por outro lado, apesar de sofrer também o efeito de compressão, concorre também com ele a força de cisalhamento provocado pelo atrito entre as partículas, resultando em uma liberação menos eficiente, principalmente em granulometrias mais grossas, além de resultar em maior geração de finos.

Para aos ensaios de flotação e separação magnética a úmido, utilizou-se uma amostra de nefelina sienito cominuída em moinho de rolos e passante na malha 0,3 mm.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A figura 3.1 mostra o fluxograma dos procedimentos de caracterização mineralógica.

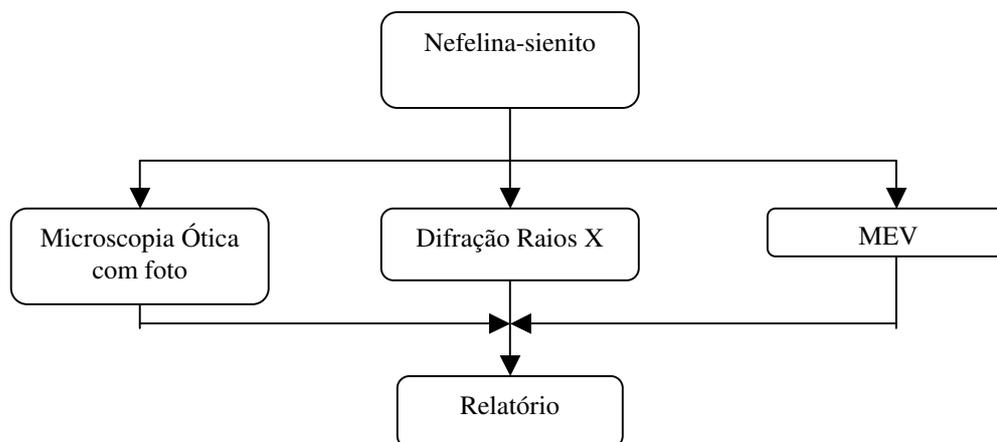


Figura 3.1- Fluxograma da caracterização mineralógica.

### 3.2.1 Análise Macroscópica

Os fragmentos de rocha são visualmente observados. Descreveu-se as características estruturais, texturais e mineralógicas correspondentes.

### 3.2.2 Microscopia Ótica

Fragmentos de rocha são laminados para a microscopia ótica. As lâminas, analisadas em microscópio de luz transmitida, indicaram os minerais presentes e suas relações texturais. Foram fotografadas as principais características observadas nas lâminas.

Este estudo foi realizado no laboratório de microscopia ótica do Instituto de Geociências (IG) da UFRGS.

Também realizou-se estudo no Laboratório de Materiais e Corrosão do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

### 3.2.3 Difração de Raios X

Duas amostras foram enviadas ao Instituto de Geociências da UFRGS e submetidas a este método analítico em um difratômetro de raios X Phillips: uma na

rocha sã e outra nos minerais pesados, concentrados em bromofórmio. A princípio, estava previsto uma análise na rocha semi-alterada. A capa de alteração do nefelina sienito é muito fina, pouco representativa em termos de massa rochosa, e praticamente composta por caulinita. Por isso, decidiu-se analisar os minerais pesados que, concentrados, tornaram-se mais susceptíveis de identificação, considerando que o equipamento de raios x dificilmente detecta fases minerais com concentrações inferiores a 3% na amostra.

Também, para efeito comparativo, incluiu-se a análise realizada em uma amostra retirada da fração fina (-150 +200 mesh) no IG da UFRGS em agosto/99.

### 3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As lâminas descritas na microscopia ótica foram metalizadas com ouro e submetidas ao MEV. Campos foram selecionados para a análise de minerais ferrosos que pudessem indicar características peculiares, não identificadas nos métodos analíticos anteriormente citados. As imagens mais significativas foram selecionadas e gravadas em arquivos para uso em computação gráfica.

## 3.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A figura 3.2 é um fluxograma dos procedimentos de caracterização tecnológica submetidos à amostra cominuída no moinho de rolos, da rocha nefelina sienito.

Inicialmente, procedeu-se ao quarteamento da amostra original, que foi dividida em duas alíquotas, sendo uma para servir de contra-amostra e outra para a caracterização tecnológica.

Da alíquota para a caracterização, foi retirada uma sub-alíquota para a análise química. O material restante foi peneirado nas malhas 2,0 mm, 1,4 mm, 1,0 mm, 0,6 mm, 0,25 mm e 0,15 mm. As frações +2,0 mm e -0,15 mm foram arquivadas. As demais foram passadas no bromofórmio para os ensaios de afunda-flutua, obtendo-se, de cada fração, uma sub-fração de minerais leves e outra de minerais pesados, ambas para as análises químicas.

Todas as alíquotas originais e as frações delas obtidas, desta e das demais etapas deste trabalho, foram pesadas para os balanços de massas correspondentes.

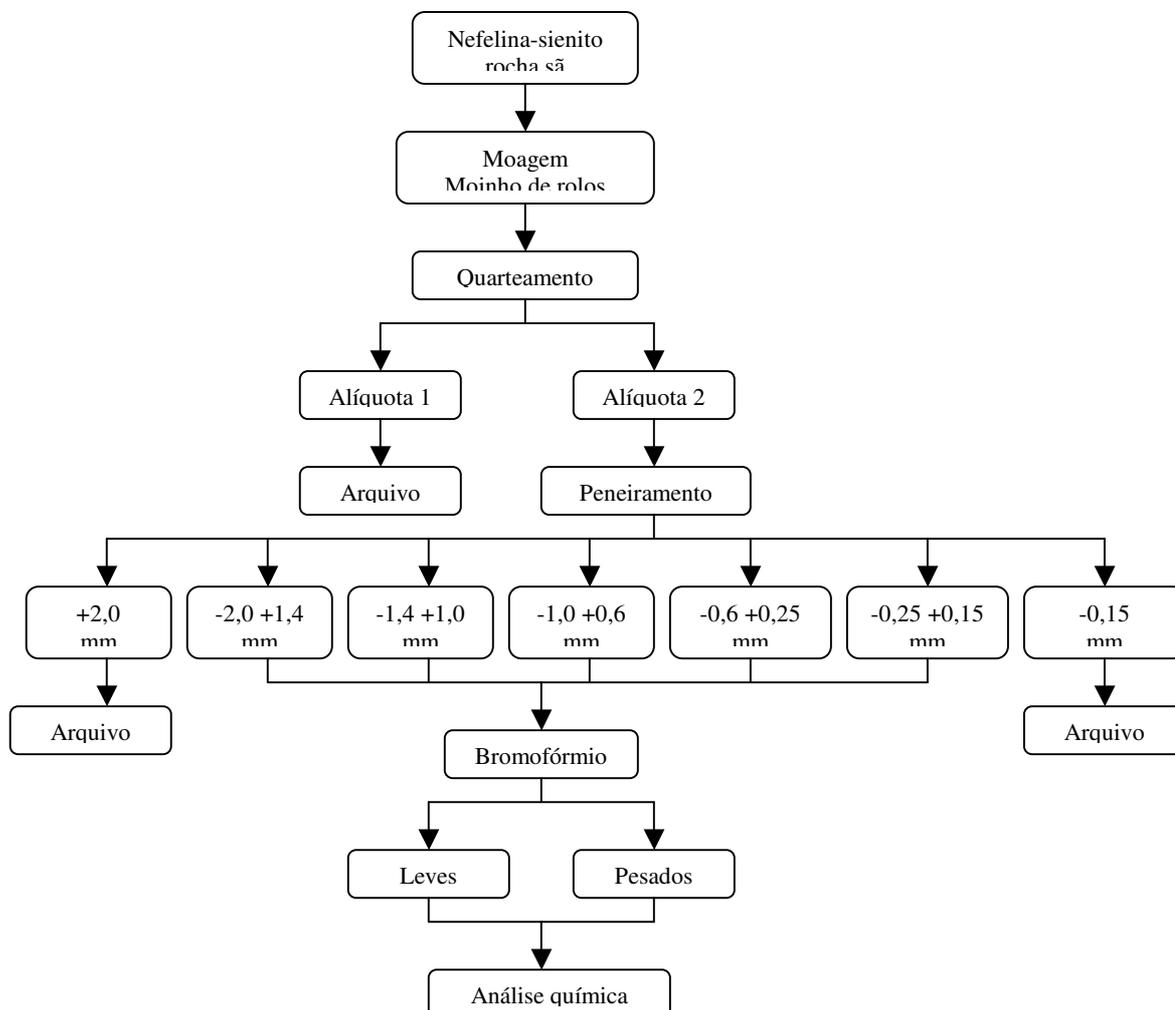


Figura 3.2 - Fluxograma da caracterização tecnológica

### 3.4 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

#### 3.4.1 Separação Magnética a Seco

A figura 3.3 mostra o fluxograma dos procedimentos na separação magnética a seco.

A amostra cominuída no moinho de rolos foi inicialmente peneirada nas malhas 2,0 mm, 1,4 mm, 1,0 mm, 0,6 mm, 0,25 mm e 0,15 mm. As frações +2,0 mm e -0,15 mm foram arquivadas e as demais foram beneficiadas em um separador

magnético ReRoll (terras raras) de rolo simples com capacidade de indução de um campo magnético próximo de 20.000 Gauss, marca Improsys, pertencente à empresa.

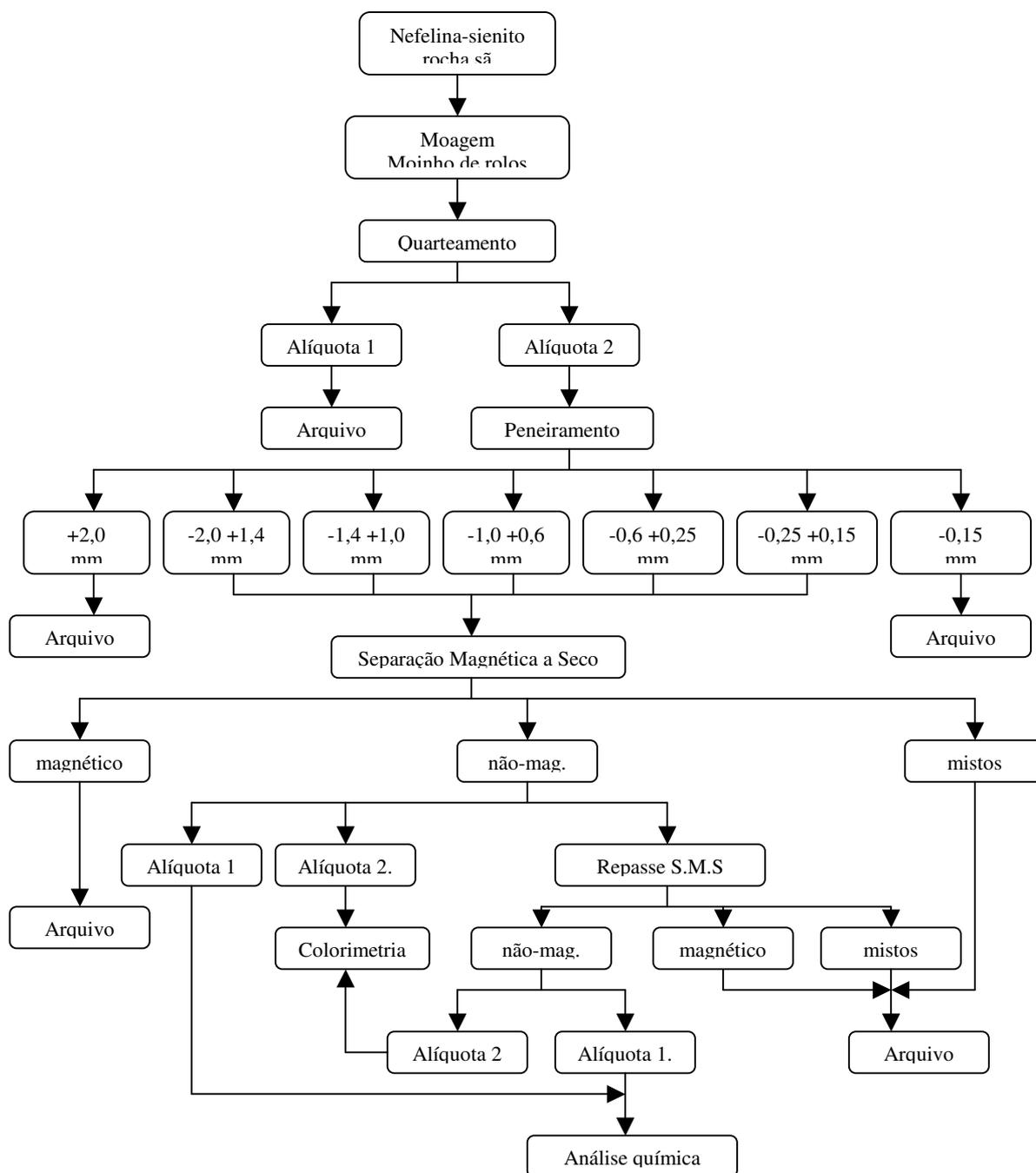


Figura 3.3 - Fluxograma da separação magnética a seco.

O separador magnético ReRoll permite ajustes na taxa de alimentação e na velocidade da esteira através de sistema dotado de variador de velocidade, onde se define um *set point* de operação para a alimentação *feeder* e outro para a velocidade da esteira *drive*. Outro parâmetro de ajuste é o de corte da nuvem de descarga da esteira

através de um defletor de aço inoxidável denominado *splitter*, que tem a função de dividir a descarga em dois produtos, um magnético e outro não magnético. Porém, quando o equipamento é dotado de dois *splitters*, que é o presente caso, tem-se então a inclusão de um produto intermediário, denominado misto.

O equipamento utilizado, apesar de dispor de dois *splitters*, possui somente um rolo de terras raras, o que impede de se efetuar simultaneamente o passe e repasse do material. Atualmente os equipamentos mais modernos dispõem de dois ou até três rolos. Porém com isto o preço do equipamento tende quase a dobrar.

Os produtos não magnéticos dos passes foram repassados no separador. Os produtos mistos dos passes e dos repasses foram arquivados.

Alíquotas das frações não magnéticas e magnéticas (exceto dos repasses) foram retiradas para as análises químicas.

Alíquotas não magnéticas dos passes e dos repasses foram retiradas para as análises de colorimetria.

### 3.4.2 Flotação

Em uma primeira etapa buscou-se definir a melhor condição de flotação e tipo de reagente para processar o minério. Inicialmente, foram realizados ensaios na fração granulométrica  $-0,25$  mm utilizando-se os reagentes Fongopal OS SR, sulfonato de petróleo a um pH 3 de polpa e flotação reversa. Como os resultados obtidos nesta etapa foram insignificantes, no que diz respeito a retirada dos minerais ferrosos contaminantes, após estudos, optou-se por outro procedimento, utilizando-se um coletor específico para o mineral aegirina, principal responsável pelo elevado teor de ferro presente, o oleato de sódio.

O oleato de sódio tem como princípio ativo o ácido oléico. Ele é muito empregado na flotação e forma sabões altamente insolúveis com metais pesados (Ca, Mg, Sr, Ba, Fe, etc.). Sendo o ácido carboxílico um ácido fraco, sua dissociação ocorre em pH alcalino, logo é mais utilizado nesta faixa de pH (Beraldo, 1987). O mecanismo de coleta (ácido oléico/mineral) é feito por adsorção química entre o íon carboxilato e o metal na superfície do mineral.



A flotação abrangeu os circuitos *rougher* e *scavenger*. No *rougher*, o concentrado foi dividido em três sub-alíquotas, sendo uma para a colorimetria, uma para a análise química e uma para o circuito *scavenger*. Neste, o concentrado também foi dividido em três sub-alíquotas, sendo uma para a colorimetria, uma para a análise química e uma para os ensaios de separação magnética a úmido. Alíquotas dos flotados de ambos circuitos foram retiradas para as análises químicas.

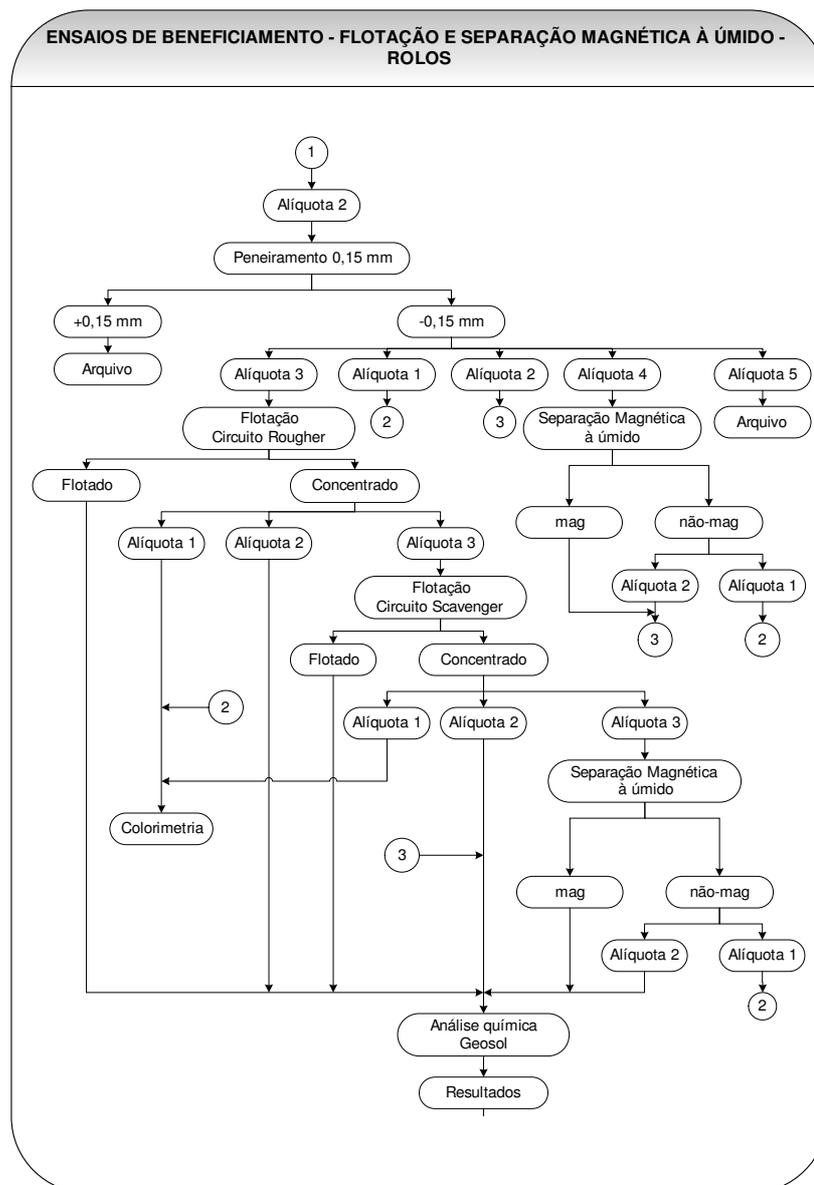


Figura 3.5-Fluxograma da flotação e da separação magnét. a úmido – alíquota 0,15 mm.

Os parâmetros operacionais, nos dois circuitos, estão descritos na tabela 3.1.

Tabela 3.1- Parâmetros operacionais nos circuitos de flotação.

PARÂMETRO	UNIDADE	CIRCUITO	
		ROUGHER	SCAVENGER
Sólidos em polpa	%		25
pH	-	8,1 – 8,3	8,1 – 8,4
Agitação	rpm		1200
Coletor	-		oleato de sódio
Dosagem de coletor	g/t	400	200
Espumante	-	-	óleo de pinho
Dosagem de espumante	ml/t	-	40
Tempo de condicionamento	minuto	6	3
Tempo de flotação	minuto	1 + 4 (2 amostras p/circuito)	

### 3.4.3 Separação Magnética a Úmido

A separação magnética a úmido consiste na passagem da polpa, por gravidade, através de um amostrador (cânister) preenchido com tela expandida de aço inox, inserido em um selenóide que gera um campo magnético sendo que, ao passar a polpa através do cânister os minerais ferromagnéticos ficam aderidos a tela expandida, devido à indução magnética gerada pelo campo, e os diamagnéticos fluem livremente através do amostrador e são coletados na parte inferior do cânister.

Os ensaios de separação magnética a úmido foram realizados em quatro amostras do produto cominuída no moinho de rolos, geradas nos procedimentos de flotação, conforme figuras 3.4 e 3.5. São elas:

- 0,25 mm sem flotação;
- 0,25 mm com flotação;
- 0,15 mm sem flotação;
- 0,15 mm com flotação.

As amostras “com flotação” referem-se aos concentrados do circuito *scavenger*.

O equipamento utilizado foi um separador eletromagnético de alta intensidade, marca Imbrás-Eriez, operando com intensidade magnética de 20.000 Gauss, de cânister fixo e preenchido com tela expandida de dimensões 1 x 1 mm.

Este processo gerou produtos magnéticos e não magnéticos. Os magnéticos foram submetidos a análises químicas. Os não magnéticos foram submetidos a análises químicas e colorimétricas.

### 3.5 COLORIMETRIA

As análises colorimétricas foram realizadas em um colorímetro da marca Minolta, onde são avaliados os parâmetros colorimétricos Lab, alvura, amarelamento e os índices de reflectância na faixa de comprimento de onda 400 a 700 nm. Os parâmetros foram lidos em duas pastilhas de cada material de interesse, pulverizado.

Foram analisados os seguintes materiais:

- produtos não magnéticos do passe e do repasse da separação magnética a seco, correspondentes aos materiais cominuídos no moinho de rolos;
- produtos concentrados da flotação nos circuitos *rougher* e *scavenger*, do produto cominuído no moinho de rolos e passante 0,3 mm;
- produtos não magnéticos da separação magnética a úmido, flotados e não flotados, da mesma amostra anteriormente citada.

### 3.6 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas foram realizadas no laboratório da empresa Lakefield Geosol Ltda., de Belo Horizonte e no laboratório das Empresas Rio Deserto a qual pertence à Mineração e Pesquisa Brasileira Ltda, sendo preferencialmente analisado na Geosol as amostra com baixo teor de ferro.

O método analítico foi por fluorescência de raios x no caso da Geosol e absorção atômica no caso da Rio Deserto, com análise dos principais óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), mais perda ao fogo (PF).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### 4.1.1 Análise Macroscópica

As amostras de mão da rocha apresentam duas diferentes massas de minerais, uma matriz fina de cor variando de cinza-esverdeado claro a tons escuros, com aproximadamente 90%, e outra, com fenocristais, com 10% da rocha, de coloração cinza-esverdeado escuro a preto, com tamanhos entre 0,25 a 0,5 cm de largura e 0,5 a 1,0 cm de comprimento, com brilho vítreo e clivagem micácea.

Possuem texturas holocristalinas, sendo a matriz castanho-clara fanerítica fina a afanítica que envolve megacristais (cristais maiores tardios) definindo uma textura porfirítica. A matriz é constituída por minerais félsicos, feldspatos e feldspatóides, observando-se, localizadamente, manchas irregulares, superficiais com tons castanho-avermelhados típicas de alterações do feldspatóide para cancrinita. Nas amostras analisadas não foram observados padrões de orientação dos minerais. Localizadamente ocorrem pequenas cavidades miarolíticas (1-4 mm), sugerindo uma intrusão próxima à superfície. A figura 4.1 mostra o aspecto textural da rocha.



Figura 4.1- Foto macroscópica da rocha nefelina-sienito.

#### 4.1.2 Microscopia Ótica

As quatro lâminas da rocha analisadas são muito semelhantes entre si, razão pela qual apenas uma caracterização deste material será abordada, evitando-se descrições repetitivas.

#### 4.1.3 Considerações Texturais

A avaliação de lâmina delgada permite reconhecer ao microscópio uma condição predominantemente inequigranular, decorrente de variações abruptas nas dimensões dos grãos da matriz e dos megacristais de minerais máficos. A textura poiquilítica é também frequente e caracteriza-se por inclusões de feldspatóide e de feldspato alcalino nas fases máficas. Subordinadamente observa-se o agrupamento de fenocristais de feldspato e feldspatóides definindo uma textura glomeroporfirítica. Localizadamente observa-se a orientação incipiente dos feldspatos potássicos da matriz definindo uma textura traquitóide.

#### 4.1.4 Composição Mineralógica

A mineralogia essencial da amostra analisada no Instituto de Geociências da UFRGS é constituída por feldspato alcalino, feldspatóide, sendo os varietais máficos piroxênio alcalino, anfibólio alcalino e biotita, associados a uma mineralogia acessória com zircão, apatita, titanita e minerais opacos.

A investigação dos aspectos microscópicos de cada fase mineral indica que o feldspato alcalino (fotomicrografias a,d da figura 4.2) é subédrico a euédrico com um hábito tabular alongado e dimensões da ordem de 0,2 a 0,6 mm, e caracteriza-se oticamente pela presença comum de geminação do tipo Carlsbad e pelo desenvolvimento de micropertita (associação K-feldspato + albita). É comum, à luz natural, a presença de uma película acinzentada típica de argilização das micropertitas. Feições de reequilíbrio e manteamento ocorrem em alguns cristais, principalmente com o material feldspático da matriz.

O feldspatóide representa o segundo tipo de mineral essencial em lâmina delgada. Foram identificados como fases félsicas subsaturadas nefelina e mais raramente noseana. A nefelina (fotomicrografias a,b,d da figura 4.2) forma prismas hexagonais, nas suas seções basais, e seções alongadas, que por vezes atingem 0,5 mm de comprimento maior. É identificada pela baixa birrefringência, extinção reta e caráter uniaxial negativo. A presença de cancrinita (fotomicrografias e,f da figura 4.2) atesta a alteração desta fase ao longo de clivagens e fraturas. A noseana é uma fase tardia e caracteriza-se por cristais onde se concentram diminutos agregados de material opaco.

O clinopiroxênio (fotomicrografias a,b,c,d da figura 4.2) tem como características óticas um relevo moderado a alto, aliado a um pleocroísmo com  $n_p$ =verde-esmeralda,  $n_m$ =verde e  $n_g$ =castanho-amarelado. Tais propriedades, aliadas a um ângulo de extinção de  $4^\circ:Z$  e um  $2V$  médio a grande negativo, permite identificá-lo como do grupo dos piroxênios alcalinos, provavelmente aegirina. Os grãos são subédricos a euédricos, com hábitos de prismas alongados com dimensões da ordem de 0,3 mm até 4,5 mm. Podem ser identificadas duas formas de ocorrência: uma onde os grãos são bem formados e desenvolvidos e outra, subordinada, onde o hábito é menos desenvolvido e as dimensões mais reduzidas. Esta variação sugere a cristalização desta fase até os estágios mais evoluídos.

O anfibólio (fotomicrografias a,d da figura 4.2), embora percentualmente inferior ao clinopiroxênio, ocorre ao longo das clivagens e das bordas dos grãos de clinopiroxênio. O pleocroísmo possui tonalidades azuis a verde-azuladas, típicas de arfvedsonita. Outro tipo de anfibólio identificado foi a astrofilita, que difere do anterior pelo pleocroísmo com tons vermelho-amarelados. Esta fase ocorre principalmente como agregados de prismas subédricos alongados.

A biotita é um mineral varietal percentualmente raro com um pleocroísmo castanho-avermelhado e extinção mosqueada, sendo as palhetas com dimensões muito reduzidas  $\ll 0,2$  mm.

Os minerais metálicos ocorrem em baixíssimas percentagens como microgrãos e em geral são produtos de transformação das fases máficas.

A apatita ocorre como grãos muito pequenos, euédricos, com seções basais hexagonais típicas e laterais tabulares alongadas, em geral inclusa em clinopiroxênio.

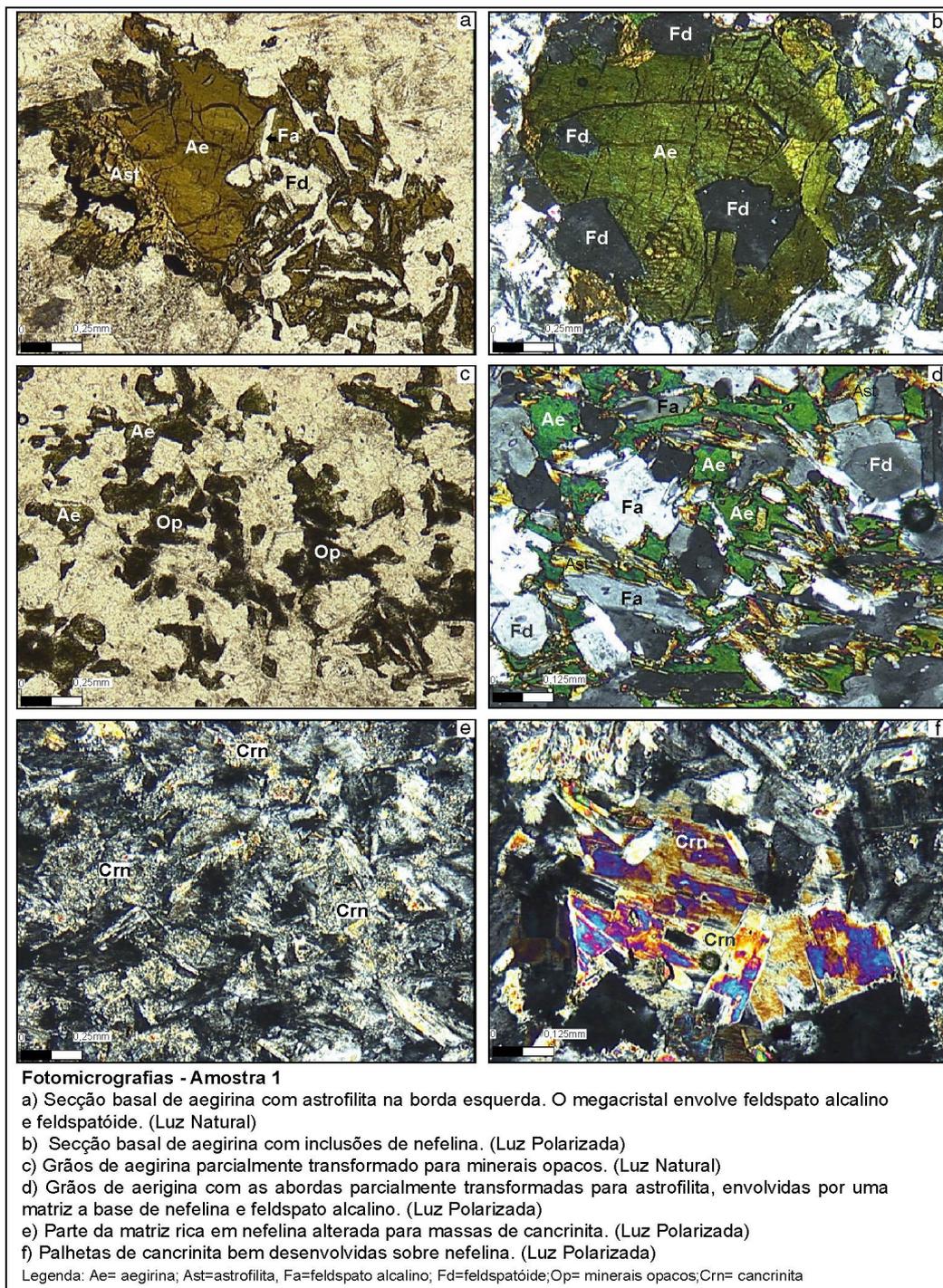


Figura 4.2 - Fotomicrografias da amostra.

O zircão é uma fase tardia e ocorre como grãos anédricos ou com hábito prismático alongado, sendo comum irregularidades internas decorrentes provavelmente da metamitização.

A titanita ocorre como prismas muito pequenos junto às bordas e clivagens dos piroxênios alcalinos.

O material de baixa temperatura está representado por zeolitas em pequenas e raras cavidades miarolíticas. Esta fase possui uma geminação polissintética sugestiva de estilbita.

A composição mineralógica observada através de lâmina delgada no Laboratório de Materiais de Corrosão do Departamento de Engenharia Química da UFSC é: ortoclásio, nefelina, sodalita, aegerina e aegerina-augita, sericita, carbonatos (cancrinita), titanita, anfibólio sódico e material argiloso. Caracteriza-se como um nefelina-sienito-microfanerítico com textura porfirítica bem definida, formada por abundantes fenocristais em matriz sensivelmente traquitóide. É constituído por feldspato potássico tanto em enormes fenocristais como na matriz, muitas vezes com geminação de Carlsbad; feldspatóides muito abundantes, representados pela nefelina e pela sodalita; aegerina ou aegerina augita de cor verde intensa por vezes passando para augita titanífera violácea em cristais prismáticos ou grãos isolados ou em aglomerados de cristais por vezes com desenvolvimento apreciável; anfibólio sódico pardacento; acessórios freqüentes tais como titanita, zircão, opacos e apatita e, finalmente, minerais secundários tais como sericita e material argiloso.

A microscopia realizada pelo Instituto de Geociências em agosto/1999 em duas amostras fornecidas pela empresa indicaram a presença dos seguintes minerais:

- Anfibólio sódico: apresenta uma coloração castanha-amarelada a nicóis cruzados e de cor esverdeada sem os nicóis cruzados, uma clivagem perfeita em algumas seções e em outras, pouco notada devido a face mostrada. Este mineral com estas características é a **astrofilita**  $[(K,Na)_3(Fe,Mn)_7TiSi_8O_{24}(O,OH,F)_7]$ , com aproximadamente 8%. Ela ocorre em sienitos nefelina em granitos alcalinos e em pegmatitos.
- Piroxênio: ocorre em cristais prismáticos alongados, veiculares, com brilho vítreo com coloração verde-amarelada ou verde-pálida, relevo muito forte e nas bordas deste mineral ocorre a substituição pelo anfibólio descrito acima. Este piroxênio é a **aegerina**  $[Na,Fe^{+3}(Si_2O_6)]$  encontrado, principalmente, em rochas com deficiência em sílica associado com a nefelina, anfibólios e microclínio, com aproximadamente 2%.
- Feldspatóide: **nefelina**  $[(Na,K)(AlSiO_4)]$  apresentando-se com pequenos grânulos, sob a forma de meio hexágono, de baixa birrefringência e fraca clivagem, com aproximadamente 15%. Este mineral é característico de

rochas alcalinas, ocorrendo na fase primária em rochas plutônicas. As nefelinas das nefelina-sienitos não variam grandemente de composição. Em tais rochas a nefelina está associada com o feldspato de baixa temperatura da série albita-microclínio. A alteração deste mineral com aproximadamente 1%, é a **cancrinita**  $[(Na,K)_{6-8}Al_6Si_6O_{24}(CO_3)_{1-2} \cdot 2-3H_2O]$ , sendo distinguida da nefelina pela birrefringência mais intensa.

- Feldspato potássico: **ortoclásio-pertítico**  $[(K,Na)AlSi_3O_8]$  apresenta com birrefringência média a baixa, vizinha ao quartzo, relevo baixo, clivagens visíveis, incolores com maclas do tipo carlsbad e perclínio. Aproveitando-se das zonas de fraqueza induzidas no cristal de feldspato pela contração diferencial durante o resfriamento ocorre o intercrescimento do feldspato sódico no feldspato alcalino, este processo é chamado de exsolução pertítica, apresentando-se em torno de 75%.
- Mineral acessório determinado: **zircão**  $[Zr(SiO_4)]$  pela sua coloração castanha pálida a incolor, a birrefringência alta, a forma varia de euédrico a redonda, é um mineral muito comum na nefelina-sienito.

#### 4.1.5 Composição Mineralógica (Estimativa Visual)

A estimativa visual da composição mineralógica realizada no IG da UFRGS foi a seguinte:

Feldspato alcalino	48%
Feldspatóide	31%
Piroxênio	11%
Anfibólio	1%
Zircão+apatita+titanita+minerais opacos	1%
Cancrinita	5%
Argilo-minerais	3%
Zeolitas	<1%

#### 4.1.6 Classificação Petrográfica

A amostra é uma **aegirina-nefelina-microsienito**, texturalmente compatível com uma condição hipabissal.

A amostra originou-se a partir de um sistema subsaturado em sílica, com conteúdos molares de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inferiores a  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ , que determinaram uma condição peralcalina e a estabilização de minerais máficos alcalinos. Magmas com estas características são comuns em ambientes continentais anorogênicos.

#### 4.1.7 Difração de Raios X

A figura 4.3 é o difratograma da rocha nefelina-sienito. A figura 4.4 é o difratograma do concentrado de minerais pesados da rocha nefelina-sienito, obtidos por moagem e concentração em bromofórmio. A figura 4.5 é o difratograma de outra amostra da mesma rocha, analisado pelo IG em agosto/99.

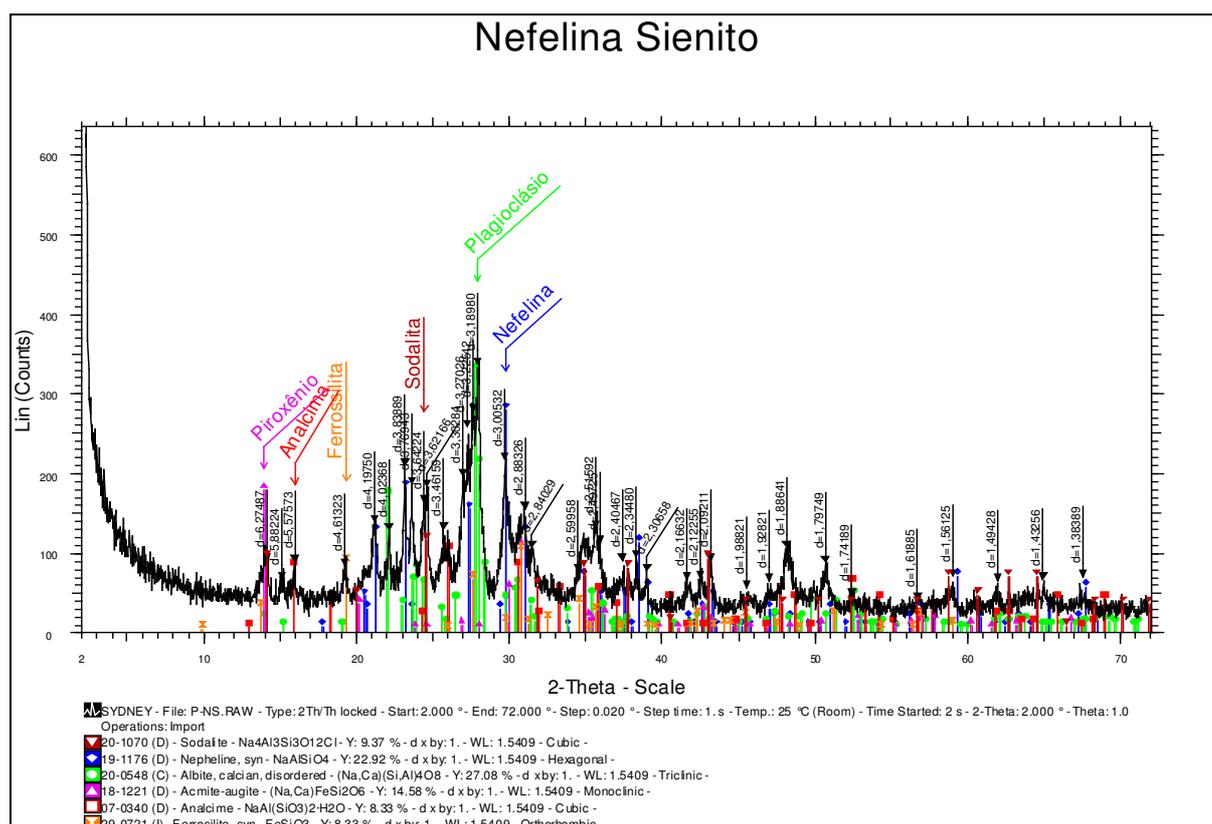


Figura 4.3 - Difratograma da rocha nefelina-sienito.

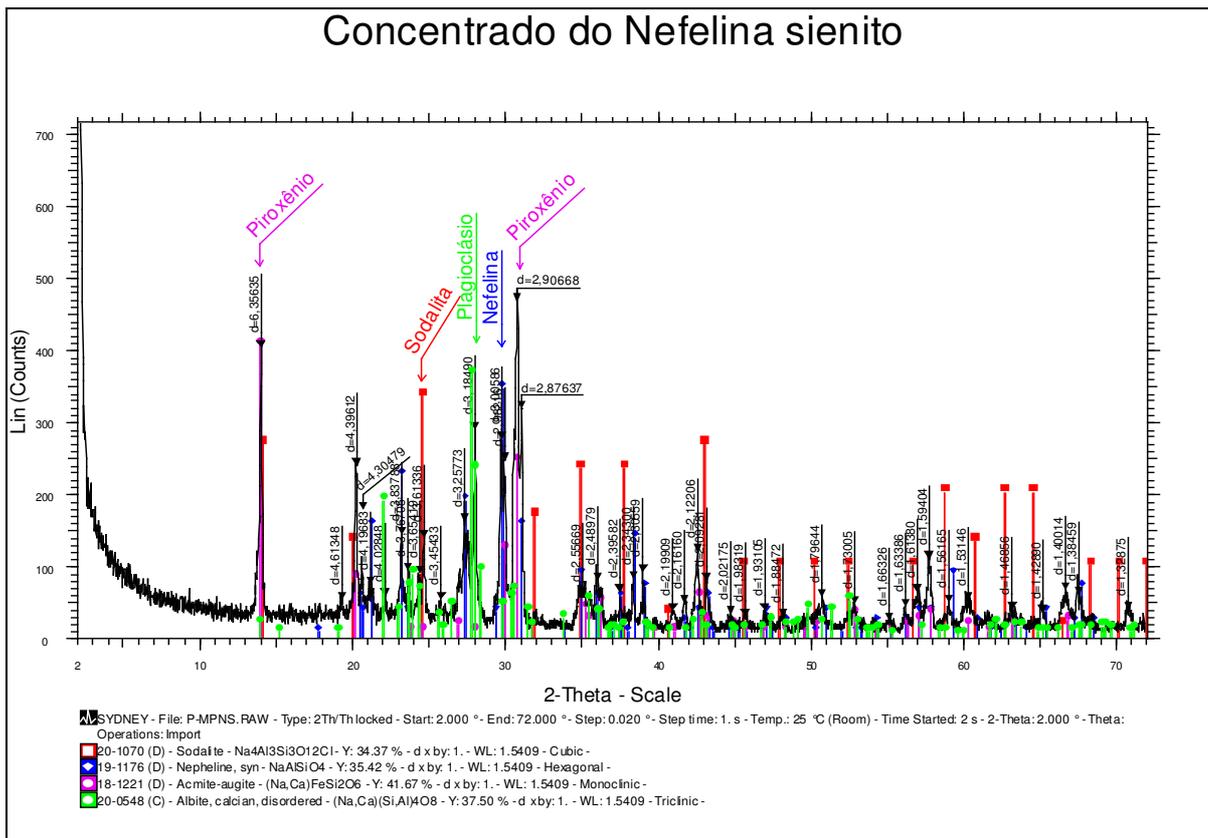


Figura 4.4 - Difratoograma do concentrado de minerais pesados da rocha nefelina-sienito.

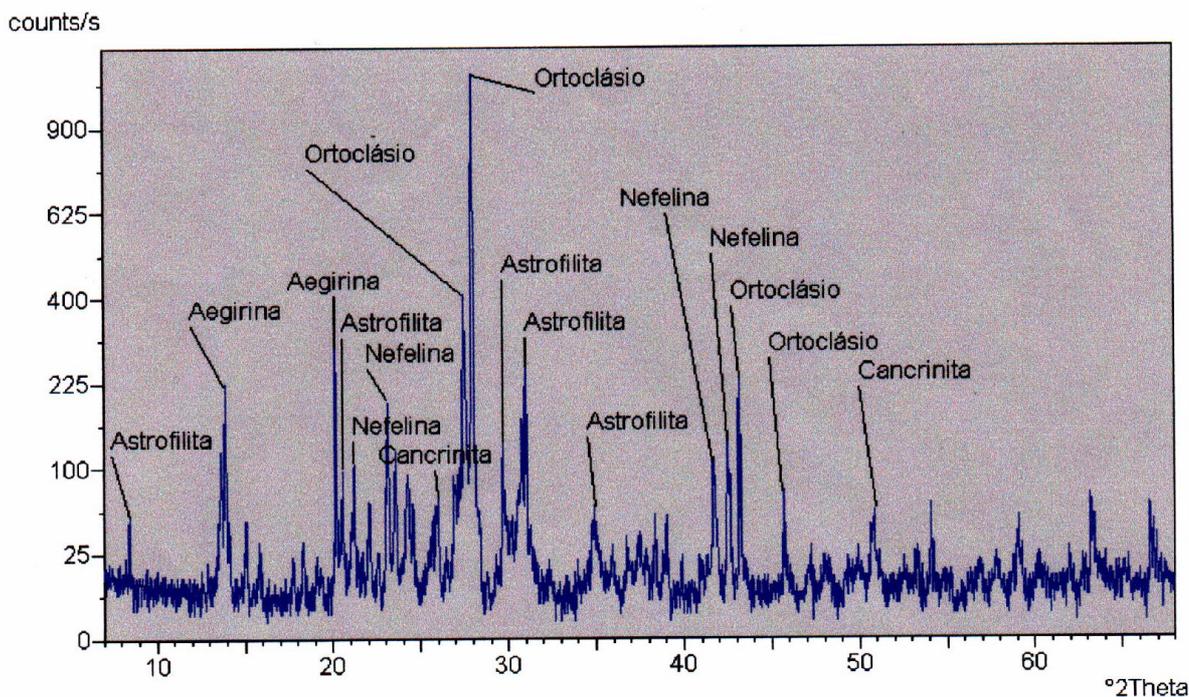


Figura 4.5 - Difratoograma da nefelina-sienito realizado em agosto/99.

#### 4.1.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

A varredura feita nas lâminas, com o MEV, não revelou informações significativas que pudessem ser destacadas. A figura 4.6 mostra uma imagem de um feldspatóide. A figura 4.7 mostra a análise EDS de um ponto no campo do mineral.

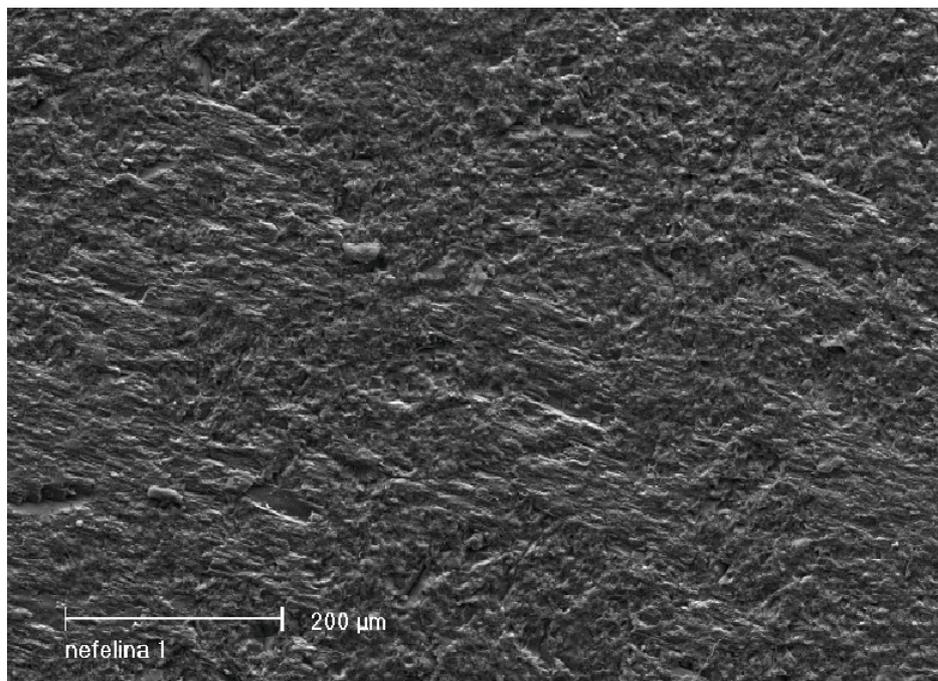


Figura 4.6 - Imagem MEV de um feldspatóide da rocha nefelina-sienito.

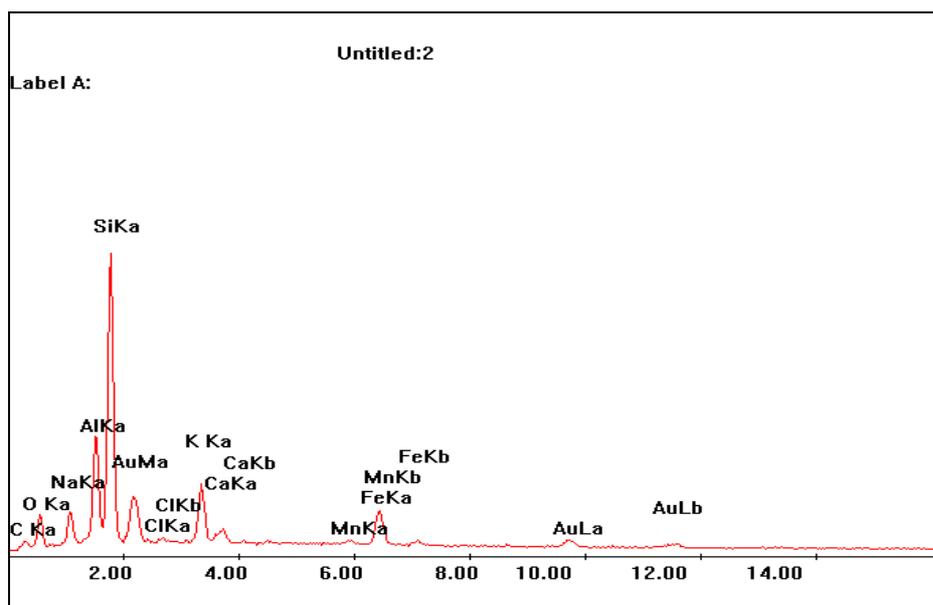


Figura 4.7 - Análise EDS de um ponto do feldspatóide da imagem mostrada na fig 4.5.

A figura 4.8 é uma das poucas imagens obtidas de um piroxênio, devido a pouca diferença de contraste entre o mineral e a matriz envolvente. A figura 4.9 é a análise EDS de um ponto no campo do piroxênio.

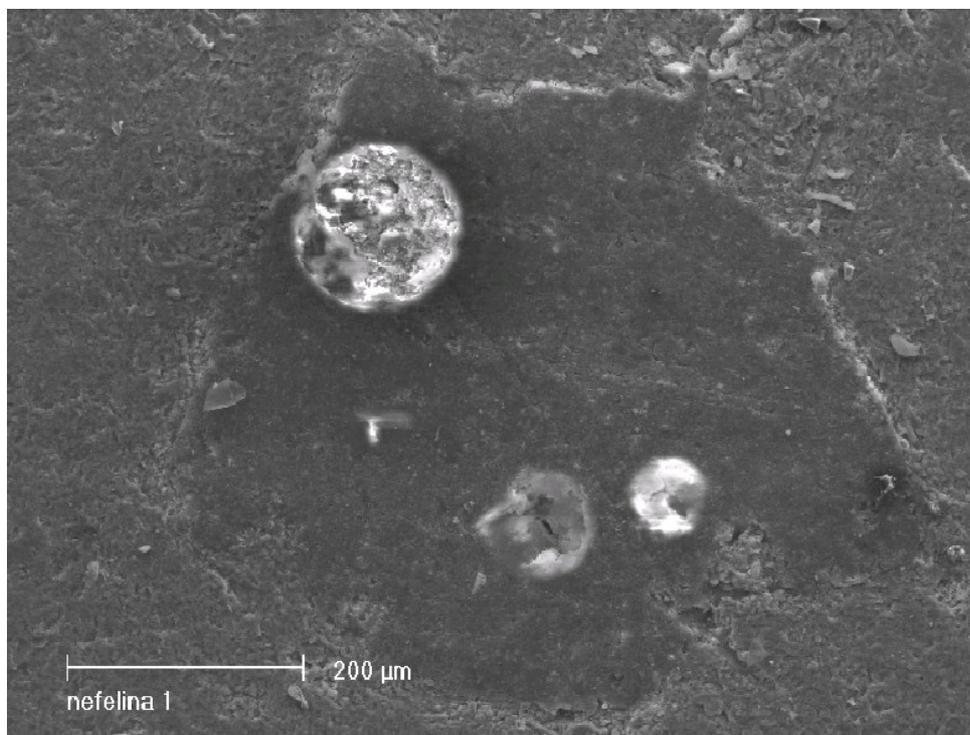


Figura 4.8- Imagem MEV de um piroxênio da rocha nefelina-sienito.

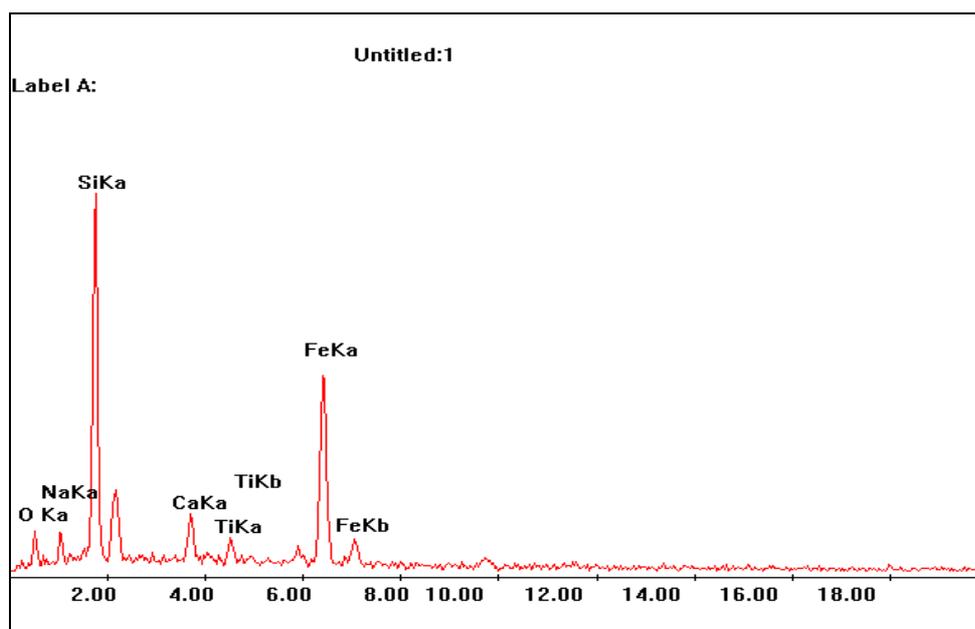


Figura 4.9 - Análise EDS em um ponto do piroxênio mostrado na imagem da fig. 4.8.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A tabela 4.1 mostra o balanço de massas do peneiramento do produto da moagem, em moinho de rolos, com os ensaios de afunda-flutua, e os resultados das análises químicas correspondentes.

Tabela 4.1 – Balanço de massas e análises químicas de caracterização tecnológica do produto cominuído no moinho de rolos

Amostra	Massa (%) na		Análise Química (%)										PF (%)
	Malha	Fração (*)	Óxidos										
			Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P	
Original	100	100	57,1	22,9	2,1	0,2	<0,1	0,29	10,1	5,1	0,47	<0,01	1,44
+2,0 mm	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-2,0 +1,4 mm	12,4	L 12,36 P 0,04	58,2	22,9	1,9	0,2	<0,1	0,29	10,8	5,4	0,54	0,037	1,09
-1,4 +1,0 mm	18,0	L 17,67	56,6	22,4	1,7	0,19	<0,1	0,29	10,0	5,4	0,48	0,04	1,0
		P 0,33	51,6	14,8	13,0	0,84	0,16	0,84	10,7	3,3	2,1	<0,01	0,28
-1,0 +0,6 mm	19,1	L 18,55	57,7	23,0	1,6	0,18	<0,1	0,29	10,6	5,4	0,47	0,038	1,08
		P 0,55	52,5	14,3	14,4	0,9	<0,1	0,85	10,4	3,1	1,9	0,014	0,33
-0,6 +0,25 mm	20,7	L 19,79	56,0	22,8	1,4	0,16	<0,1	0,28	11,9	5,6	0,46	0,011	1,24
		P 0,91	51,3	13,0	15,2	1,1	0,27	0,97	12,5	2,9	2,0	<0,01	0,24
-0,25 +0,15 mm	9,4	L 8,92	56,0	23,0	1,4	0,15	<0,1	0,26	11,6	5,5	0,42	0,022	1,4
		P 0,48	50,3	11,0	17,3	1,3	0,34	1,2	12,0	2,6	2,2	0,021	0,13
-0,15 mm	20,3	20,3											

(\*) L: fração leve; P: fração pesada.

(\*\*) A quantidade de massa gerada foi insuficiente para a análise química.

## 4.3 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

### 4.3.1 Separação Magnética a Seco

A tabela 4.2 mostra o balanço de massas e as análises químicas da separação magnética à seco, nas frações do produto cominuído da nefelina-sienito, no moinho de rolos. Os dados consideram o “passe” e o “repasse” por faixa.

Tabela 4.2 – Balanço de massas e análises químicas da separação magnética a seco

Amostra	Massa (g)				%	Análise química (%)										PF (%)						
	p	a	s	e		Óxidos																
-2,0 +1,4 mm					23,8	p	a	s	e	mag	2,5		10,5									
	misto	1,8		7,5						Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P			
	não- mag	19,5		81,9						56,6	22,8	0,85	0,15	<0,1	0,24	12,0	5,5	0,34	0,032	0,97		
		re-	mag	0,1																	10,9	
		pas-	misto	0,5																	9,7	
se	n-mag	18,9	79,4	56,9	22,7	0,75	0,14	<0,1	0,25	11,9	5,5	0,33	0,021	1,0								
-1,4 +1,0 mm	25,7	p	a	s	e	mag	3,9		15,2												PF (%)	
						misto	2,1		8,2		Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P		
						não- mag	19,7		76,6		56,1	22,8	0,75	0,12	<0,1	0,22	11,6	5,6	0,32	0,011		1,07
							re-	mag	0,2	16,0												
							pas-	misto	0,6	10,5												
se	n-mag	18,9	73,5	56,5	23,0	0,69	0,13	<0,1	0,23	11,6	5,6	0,3	0,013	1,05								
-1,0 +0,6 mm	23,2	p	a	s	e	mag	4,0		17,2												PF (%)	
						misto	1,6		6,9		Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P		
						não- mag	17,6		75,9		57,0	23,1	0,64	0,11	<0,1	0,2	11,7	5,6	0,28	0,037		1,16
							re-	mag	0,1	17,7												
							pas-	misto	0,5	9,0												
se	n-mag	17,0	73,3	57,5	22,8	0,6	0,11	<0,1	0,2	11,5	5,7	0,27	0,01	1,12								
-0,6 +0,25 mm	5,0	p	a	s	e	mag	1,1		22,0												PF (%)	
						misto	0,7		14,0		Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P		
						não- mag	3,2		64,0		56,7	23,7	0,57	0,1	<0,1	0,16	11,4	5,6	0,25	0,028		1,31
							re-	mag	0,1	24,0												
							pas-	misto	0,2	18,0												
se	n-mag	2,9	58,0	56,8	23,6	0,54	0,09	<0,1	0,15	12,3	5,7	0,22	0,016	1,34								
-0,25 +0,15 mm	11,9	p	a	s	e	mag	3,1		26,0												PF (%)	
						misto	2,4		20,2		Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P		
						não- mag	6,4		53,8		57,5	22,9	0,62	0,09	<0,1	0,15	12,1	5,7	0,28	0,017		1,29
							re-	mag	0,1	26,9												
							pas-	misto	0,5	24,4												
se	n-mag	5,8	48,7	56,0	23,4	0,55	0,07	<0,1	0,13	12,4	5,6	0,23	0,039	1,3								
-0,15 mm	10,4																					
SOMA	100																					



### 4.3.3 Separação Magnética a Úmido

Os balanços de massas e análises químicas referentes a este processo encontram-se na tabela 4.5

Tabela 4.5 - Balanços de massas e análises químicas resultantes da separação magnética a úmido.

Amostra	Flotação	Massa (%)			Análise Química (%) - Óxidos										PF (%)
		Original	Pós-SMU		Si	Al	Fe	Ti	Mg	Mn	Na	K	Ca	P	
-0,25 mm	sim	58,1 <sup>(1)</sup>	mag	25,3	56,0	23,3	1,0	0,12	<0,1	0,28	10,5	5,4	0,42	<0,01	1,07
			n-mag	32,8	57,8	23,1	0,51	0,04	<0,1	0,06	10,0	5,8	0,14	<0,01	1,1
	não	80,4 <sup>(2)</sup>	mag	34,7	55,2	20,9	4,0	0,4	0,11	0,49	10,5	4,8	0,83	0,017	1,32
			n-mag	45,7	56,2	23,5	0,86	0,08	<0,1	0,12	10,1	5,6	0,21	<0,01	1,28
-0,15 mm	sim	41,4 <sup>(3)</sup>	mag	18,6	56,0	23,7	1,0	0,11	<0,1	0,31	10,9	5,4	0,46	<0,01	0,99
			n-mag	22,8	57,3	23,4	0,43	0,03	<0,1	0,05	9,9	5,7	0,09	<0,01	0,89
	não	51,6 <sup>(4)</sup>	mag	22,2	55,2	21,6	3,5	0,36	0,17	0,47	10,7	5,1	0,78	0,019	1,49
			n-mag	29,4	57,6	24,0	1,0	0,11	<0,1	0,13	8,6	5,4	0,42	0,019	1,4

<sup>(1)</sup> Referente ao concentrado do circuito *scavenger* da flotação (tabela 4.3).

<sup>(2)</sup> Referente ao material passante na peneira 0,25 mm (tabela 4.3).

<sup>(3)</sup> Referente ao concentrado do circuito *scavenger* da flotação (tabela 4.4).

<sup>(4)</sup> Referente ao material passante na peneira 0,15 mm (tabela 4.4).

## 4.4 COLORIMETRIA

### 4.4.1 Separação Magnética a Seco

A tabela 4.6 mostra os parâmetros colorimétricos dos produtos não magnéticos do passe e do repasse da separação magnética a seco, dos materiais cominuídos nos moinhos de rolos. Os valores correspondem à média aritmética dos valores de duas pastilhas.

As figuras 4.10 a 4.13 mostram os espectros de reflectância do passe e do repasse das amostras do moinho de rolos.

Tabela 4.6 - Parâmetros colorimétricos dos materiais não magnéticos do passe e do repasse da separação magnética à seco.

Amostra	Produto (*)	L	a	b	Alvura	Amarelamento
-2,0 +1,4 mm	P	84,07	-0,38	2,19	61,89	4,38
	R	86,48	-0,36	1,52	67,28	2,91
-1,4 +1,0 mm	P	83,31	-0,28	2,23	60,43	4,59
	R	86,28	-0,30	1,38	67,04	2,66
-1,0 +0,6 mm	P	78,45	-0,09	5,80	48,63	12,72
	R	79,54	-0,14	4,98	51,16	10,79
-0,6 +0,25 mm	P	78,60	-0,15	6,49	48,25	14,12
	R	79,34	-0,21	6,40	49,52	13,76
-0,25 +0,15 mm	P	78,99	-0,20	6,45	48,92	13,93
	R	80,29	-0,27	6,81	50,70	14,42

(\*) P: Passe; R: Repasse.

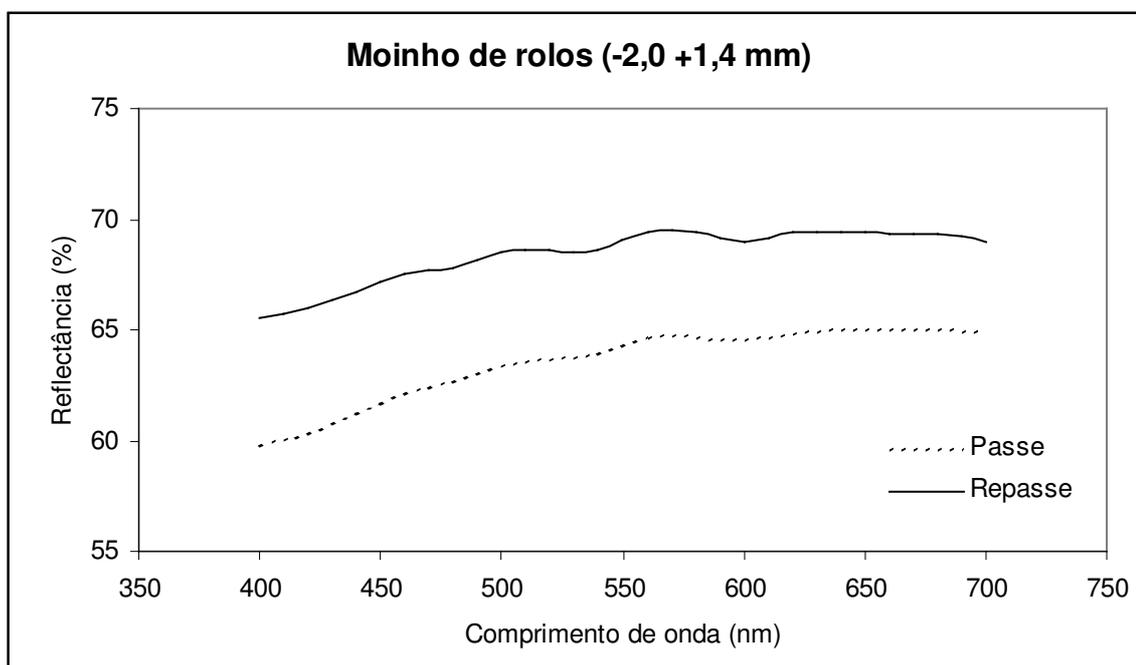


Figura 4.10 - Espectros de refletância da fração não magnética do passe e do repasse da SMS, da fração -2,0 +1,4 mm.

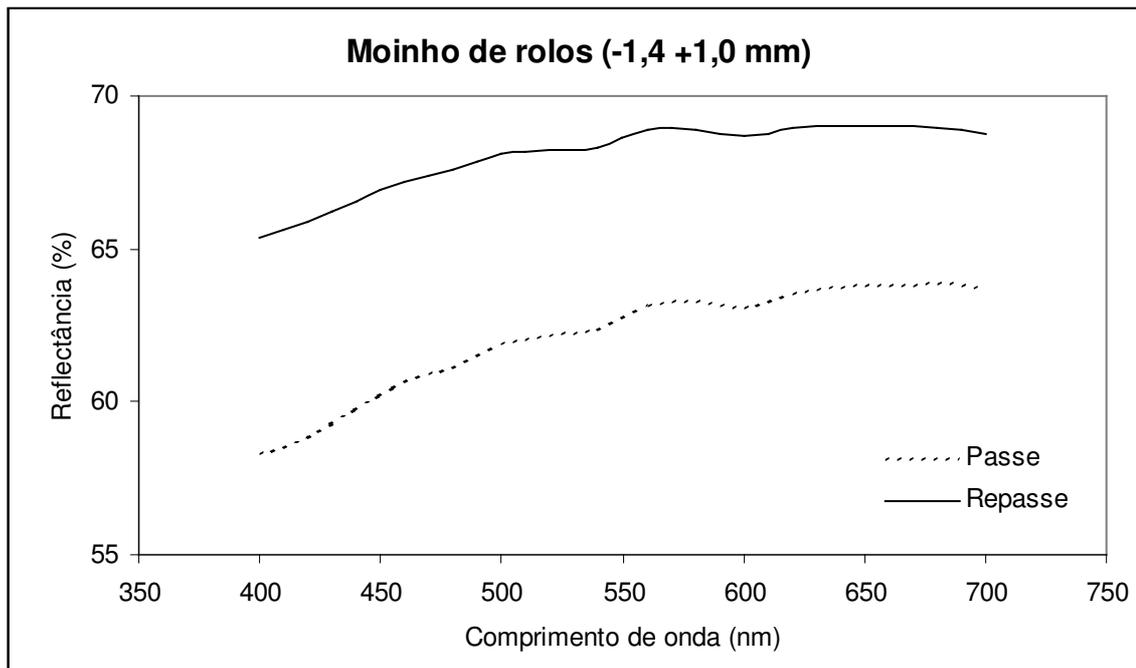


Figura 4.11 - Espectros de reflectância da fração não magnética do passe e do repasse da SMS, da fração  $-1,4 +1,0$  mm.

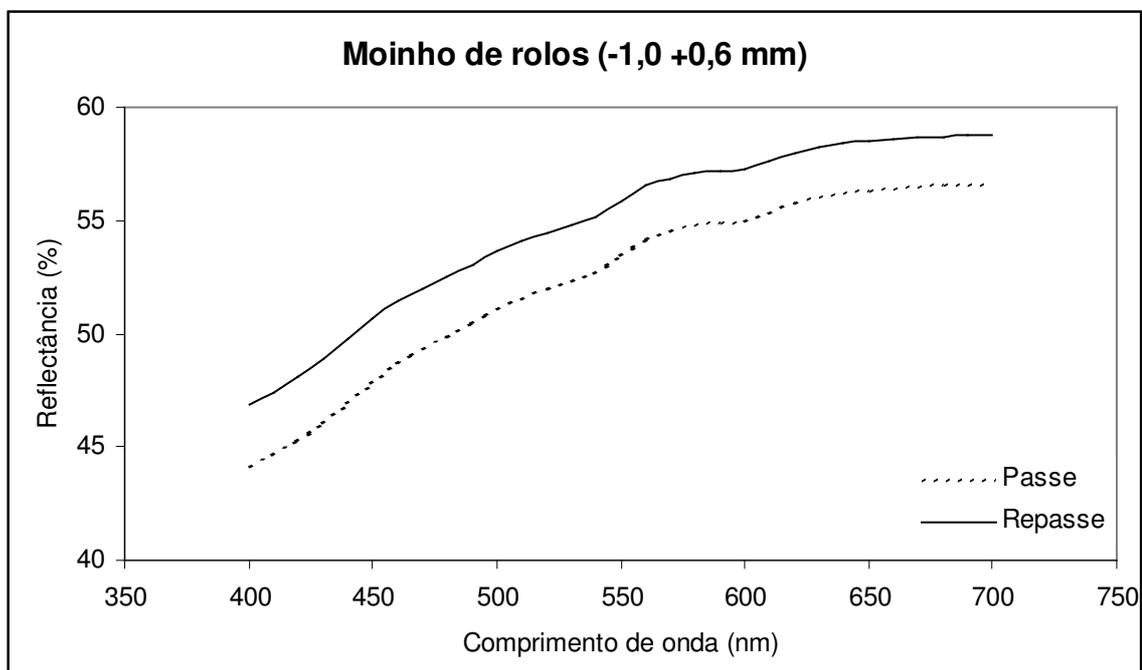


Figura 4.12- Espectros de reflectância da fração não magnética do passe e do repasse da SMS, da fração  $-1,0 +0,6$  mm.

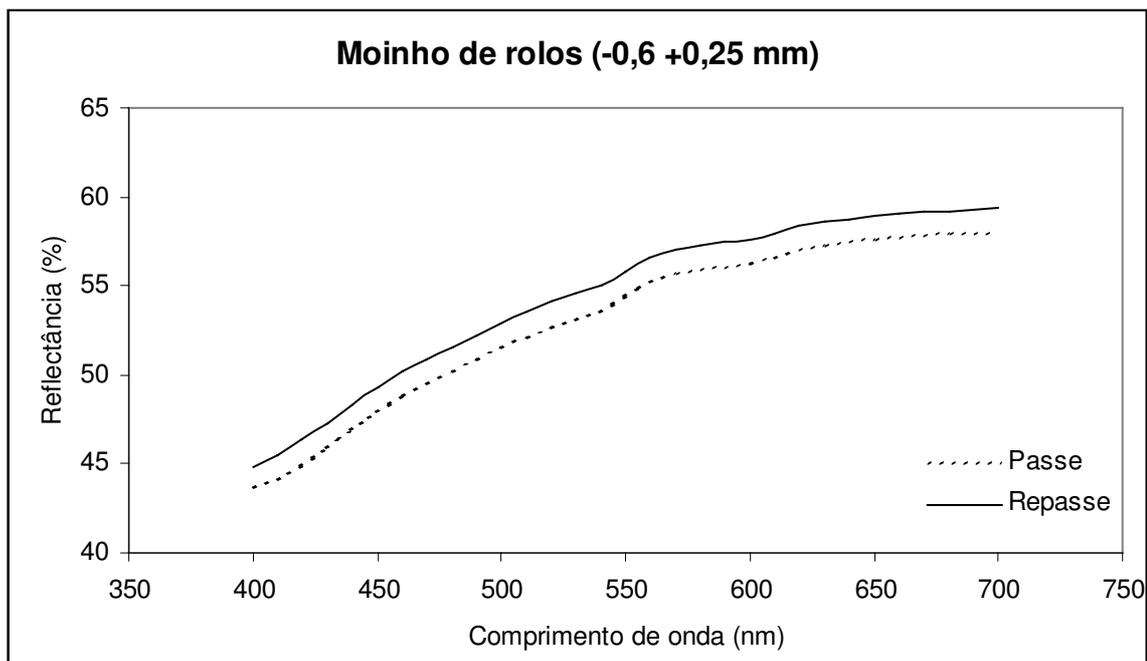


Figura 4.13 - Espectros de reflectância da fração não magnética do passe e do repasse da SMS, da fração  $-0,6 +0,25$  mm.

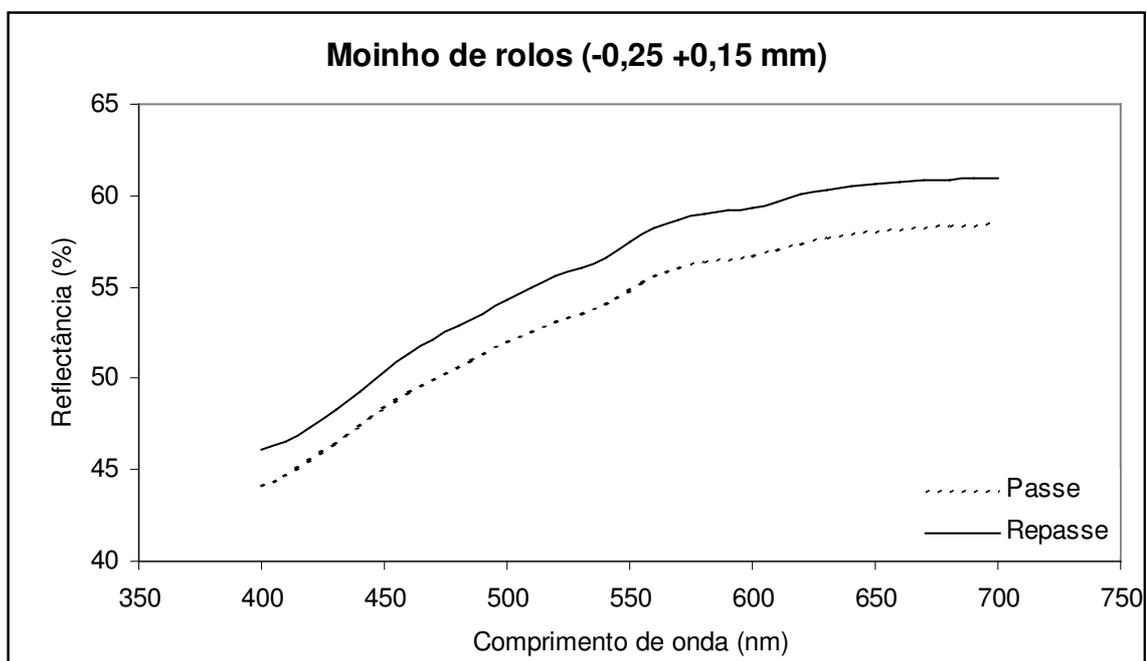


Figura 4.14 - Espectros de reflectância da fração não magnética do passe e do repasse da SMS, da fração  $-0,25 +0,15$  mm.

#### 4.4.2 Flotação

Os parâmetros colorimétricos dos produtos concentrados nos circuitos *rougher* e *scavenger* da flotação, correspondentes aos materiais passantes 0,25 mm e 0,15 mm, cominuídos no moinho de rolos, encontram-se na tabela 4.7. Os valores correspondem a média aritmética dos valores de duas pastilhas.

Tabela 4.7 - Parâmetros colorimétricos dos concentrados da flotação.

Amostra	Circuito	L	a	b	Alvura	Amarelamento
-0,25 mm	sem flotação	76,59	-0,68	6,13	45,42	13,13
	<i>rougher</i>	76,83	-0,70	5,38	46,46	11,45
	<i>scavenger</i>	81,88	-0,40	5,22	54,90	10,82
-0,15 mm	sem flotação	77,33	-0,68	6,40	46,31	13,62
	<i>rougher</i>	79,76	-0,61	4,78	51,71	9,93
	<i>scavenger</i>	82,36	-0,46	4,74	56,22	9,72

As figuras 4.15 e 4.16 representam os espectros de reflectância, respectivamente das amostras -0,25 mm e -0,15 mm.

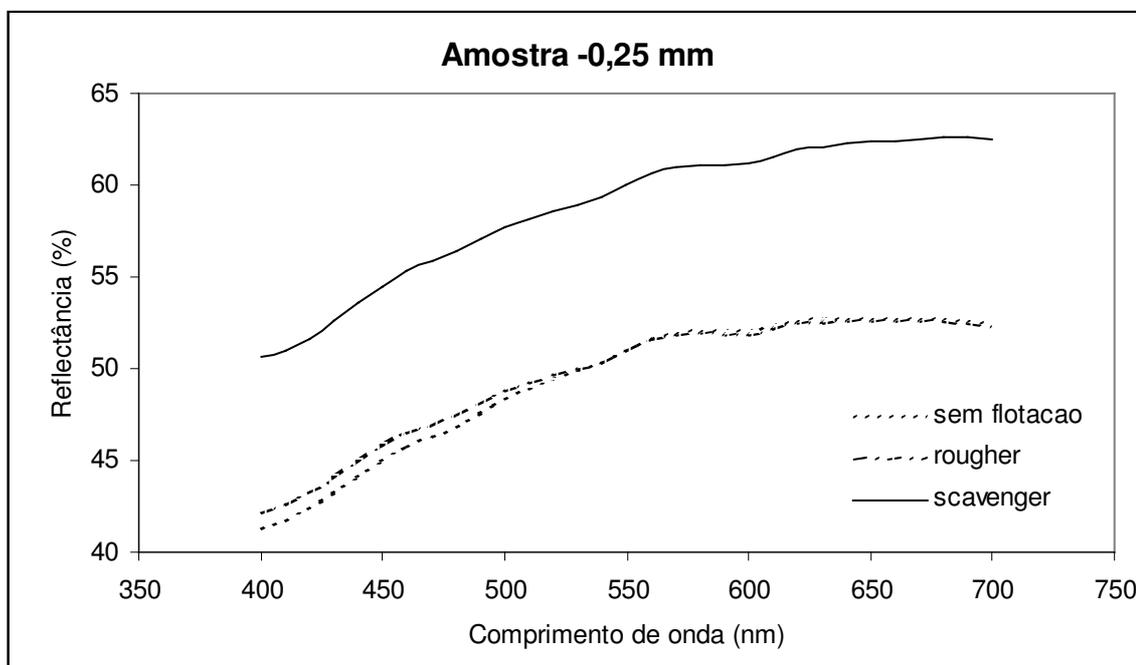


Figura 4.15 - Espectros de reflectância do material cominuído com granulometria inferior a 0,25 mm, submetidos a estágios de flotação.

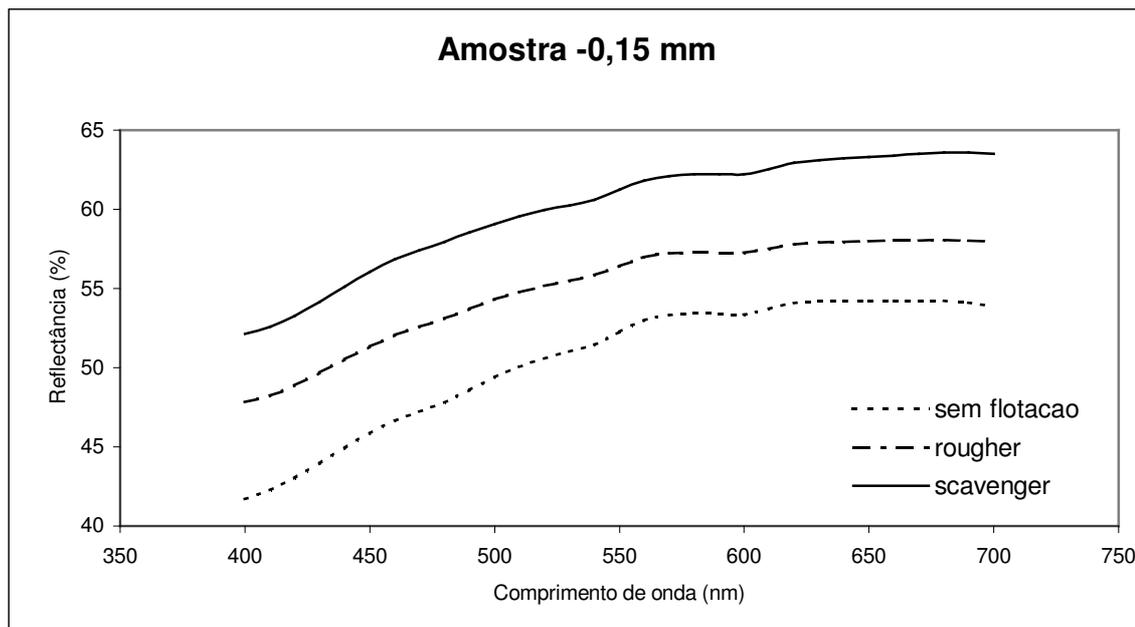


Figura 4.16 - Espectros de reflectância do material cominuído com granulometria inferior a 0,15 mm, submetidos a estágios de flotação.

#### 4.4.3 Separação Magnética a Úmido

Na tabela 4.8 estão os parâmetros colorimétricos dos produtos cominuídos no moinho de rolos, passantes nas malhas 0,25 mm e 0,15 mm. Os valores referem-se a amostras flotadas (concentrado do *scavenger*) e não flotadas, e correspondem a média aritmética dos valores de duas pastilhas. “Am original” na coluna “Flotação” representa os valores da amostra original, sem separação magnética e sem flotação. “Não” e “Sim” representam amostras submetidas à separação magnética a úmido, respectivamente sem e com flotação.

Tabela 4.8 - Parâmetros colorimétricos de amostras submetidas à separação magnética a úmido, sem e com flotação.

Amostra	Flotação	L	a	b	Alvura	Amarelamento
-0,25 mm	Am original	76,59	-0,68	6,13	45,42	13,13
	Não	81,86	-0,25	6,55	53,55	13,70
	Sim	83,06	-0,34	5,74	56,46	11,80
-0,15 mm	Am original	77,33	-0,68	6,40	46,31	13,62
	Não	81,01	-0,45	6,36	52,30	13,23
	Sim	84,20	-0,38	4,69	59,57	9,51

As figuras 4.17 e 4.18 referem-se aos espectros de reflectância, respectivamente das amostras -0,25 mm e -0,15 mm, correspondentes aos dados da tabela 4.9.

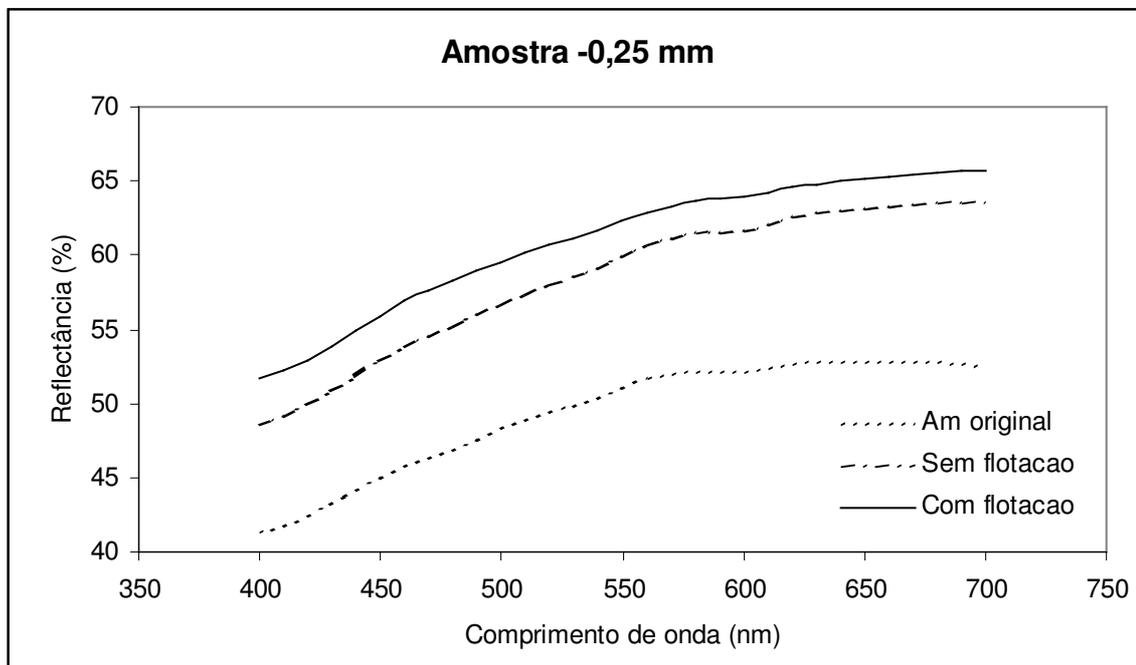


Figura 4.17 - Espectros de reflectância de amostras submetidas à separação magnética a úmido, passantes na malha 0,25 mm, sem e com processo de flotação.

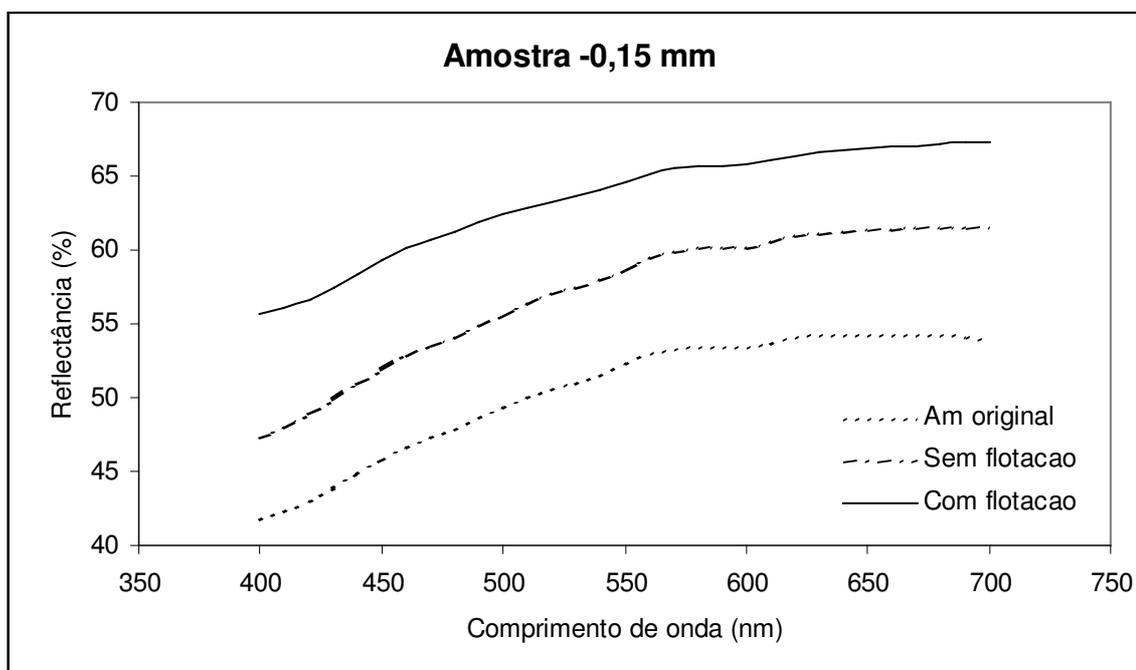


Figura 4.18 - Espectros de reflectância de amostras submetidas à separação magnética a úmido, passantes na malha 0,15 mm, sem e com processo de flotação.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentadas as conclusões básicas sobre os resultados obtidos.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### 5.1.1 Análise Microscópica

Os fragmentos de rocha fornecidos mostram predominância de uma matriz félsica (feldspatos e feldspatóides), fanerítica fina a afanítica, envolvendo cristais máficos, e com manchas irregulares de cancrinita, resultantes da alteração de feldspatóides.

As lâminas delgadas demonstram a presença de minerais essenciais em cerca de 80% da rocha e correspondem ao feldspato alcalino, feldspatóide e piroxênio. Os anfibólios e os metálicos ocorrem, cada um, em 1% da rocha, e os minerais de alteração (cancrinita + argilominerais) variam entre 8 e 10% da rocha.

A principal condição para uma separação magnética eficiente, além da susceptibilidade magnética, é a forma e tamanho dos constituintes minerais que compõem a rocha, pois influem diretamente na eficiência de liberação das partículas minerais.

Os Nefelina Sienitos, ao contrário dos Fonólitos, pela condição de formação em ambiente confinado (hipabissal), possibilitaram a cristalização mais lenta, permitindo a formação de cristais maiores e mais bem formados.

As características observadas macroscopicamente na rocha, formada por duas diferentes massas de minerais, uma de matriz fanerítica fina presente em aproximadamente 90% da rocha com predominância de minerais félsicos e outra, representando 10% com predominância de fenocristais, onde se pode distinguir os feldspatos, feldspatóides e os máficos em pontos esparsos. Estas características permitem antever uma condição favorável à liberação de minerais máficos.

### 5.1.2 Difração de Raios X

As análises por difração de raios X não auxiliaram na avaliação dos materiais. Os minerais essenciais foram confirmados, mas os de baixa ocorrência não foram bem identificados. O método de raios X é indicado para identificar fases minerais com presença superior a 5% da rocha.

Como a avaliação microscópica foi bem detalhada, sugere-se que os resultados da difração de raios X devam ser considerados, porém com restrições para os minerais acessórios. Esperava-se que o concentrado de minerais pesado da rocha pudesse dar indicações mais seguras, o que não ocorreu.

Dentre os minerais presentes, os máficos são os que interferem na cor do produto final. O principal mineral máfico determinado é o piroxênio alcalino aegerina, devido a sua abundância na rocha (11% ) e composição química  $[\text{Na}, \text{Fe}]^{+3} (\text{Si}_2\text{O}_6)$ . Os demais minerais máficos são os anfibólios sódicos, representados pela astrofilita e arfvedsonita (1% da rocha) como produto de alteração da aegerina, bem como os acessórios como o zircão, apatita, titanita e minerais opacos (1% da rocha).

### 5.1.3 Microscopia eletrônica de Varredura

O MEV também foi uma avaliação que não contribuiu muito para ampliar as informações sobre a rocha. Não se obteve imagens muito nítidas dos minerais, e os pontos analisados com EDS não indicaram dados que pudessem ser destacados como importantes.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os resultados da tabela 4.1 mostram que a maior massa de minerais pesados, cominuído no moinho de rolos, ocorreu na fração  $-0,6 +0,25$  mm, onde se obteve também a maior massa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , conforme os dados da tabela 5.1, obtidos com os dados da tabela 4.1. A figura 5.1 mostra os histogramas correspondentes aos dados da tabela 5.1.

Tabela 5.1- Massas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  obtidas nos ensaios de afunda-flutua, do material cominuído no moinho de rolos.

AMOSTRA	FRAÇÃO	MASSA DE $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)		
		VALOR ABSOLUTO		VALOR RELATIVO
		NA FRAÇÃO	NA AMOSTRA	NA AMOSTRA
Original	-	-	2,1	100
-2,0 +1,4 mm	Leves	0,23	0,23	11,0
	Pesados	-		
-1,4 +1,0 mm	Leves	0,30	0,34	16,2
	Pesados	0,04		
-1,0 +0,6 mm	Leves	0,30	0,38	18,1
	Pesados	0,08		
-0,6 +0,25 mm	Leves	0,28	0,42	20,0
	Pesados	0,14		
-0,25 +0,15 mm	Leves	0,12	0,20	9,5
	Pesados	0,08		
-0,15 mm	-	-	0,53	25,2

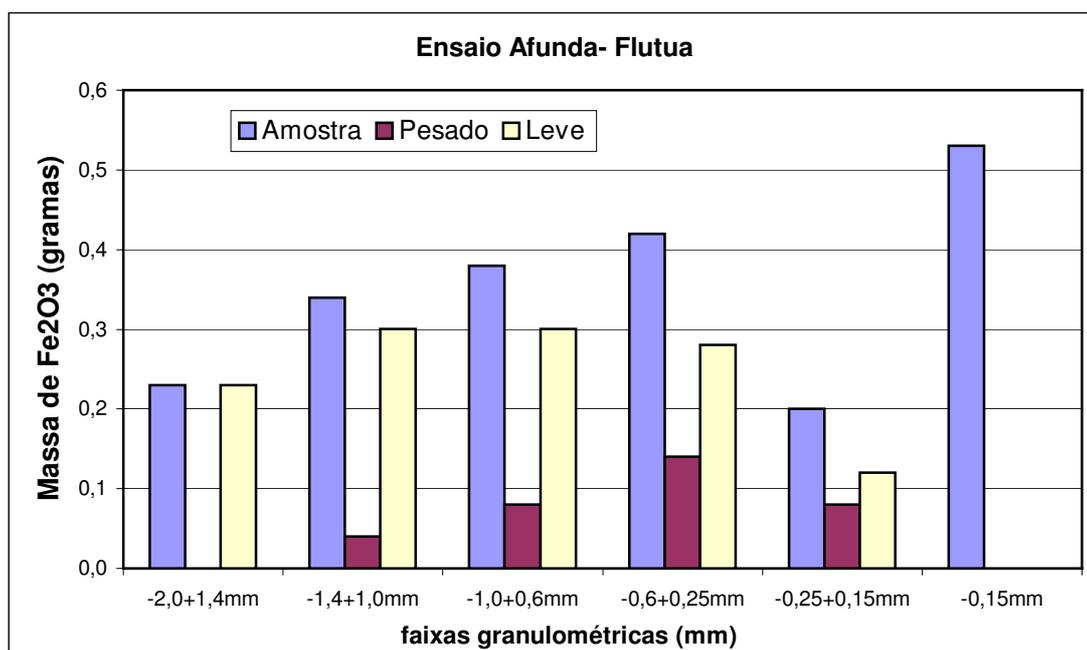


Figura 5.1- Histogramas das massas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , da caracterização tecnológica da rocha nefelina-sienito cominuída no moinho de rolos.

Pode-se observar também, através do histograma da figura 5.2, que quanto menor a faixa granulométrica maior a seletividade e o percentual da fração pesada em relação à leve, indicando um crescente aumento na eficiência de liberação.

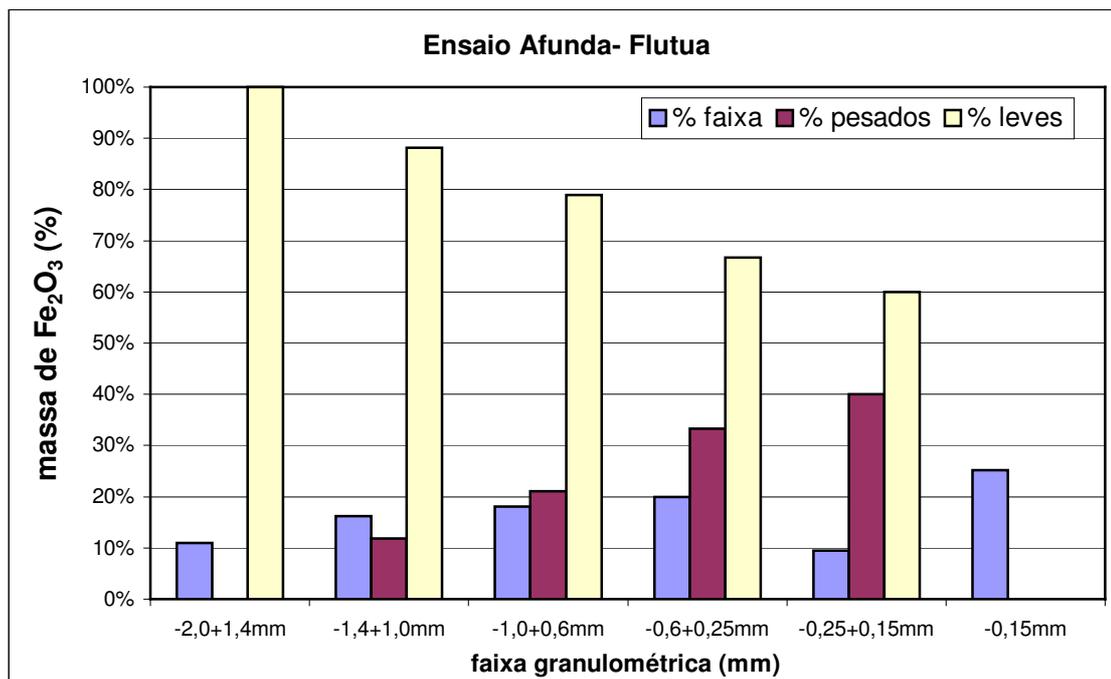


Figura 5.2 - Histogramas de distribuição de leves e pesados em cada faixa granulométrica e percentual de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em cada fração.

Como se pode observar, a técnica de separação densimétrica entre os minerais máficos e félsicos, utilizando-se o bromofórmio, apresentou baixa seletividade, quando comparada com os resultados obtidos na separação magnética a seco. Provavelmente, a causa foi a pequena diferença densimétrica entre estes dois tipos de minerais.

Os resultados nos levam a concluir que as partículas não se encontram totalmente liberadas, mesmo na fração mais fina (-0,25+0,15mm), o que certamente irá limitar a eficiência da separação magnética a seco.

### 5.3 ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

#### 5.3.1 Separação Magnética a Seco

Os resultados da tabela 4.2 indicam que quanto menor a fração granulométrica, menor a recuperação mássica do produto não magnético e maior a perda mássica no repasse, conforme se pode observar no histograma da figura 5.3.

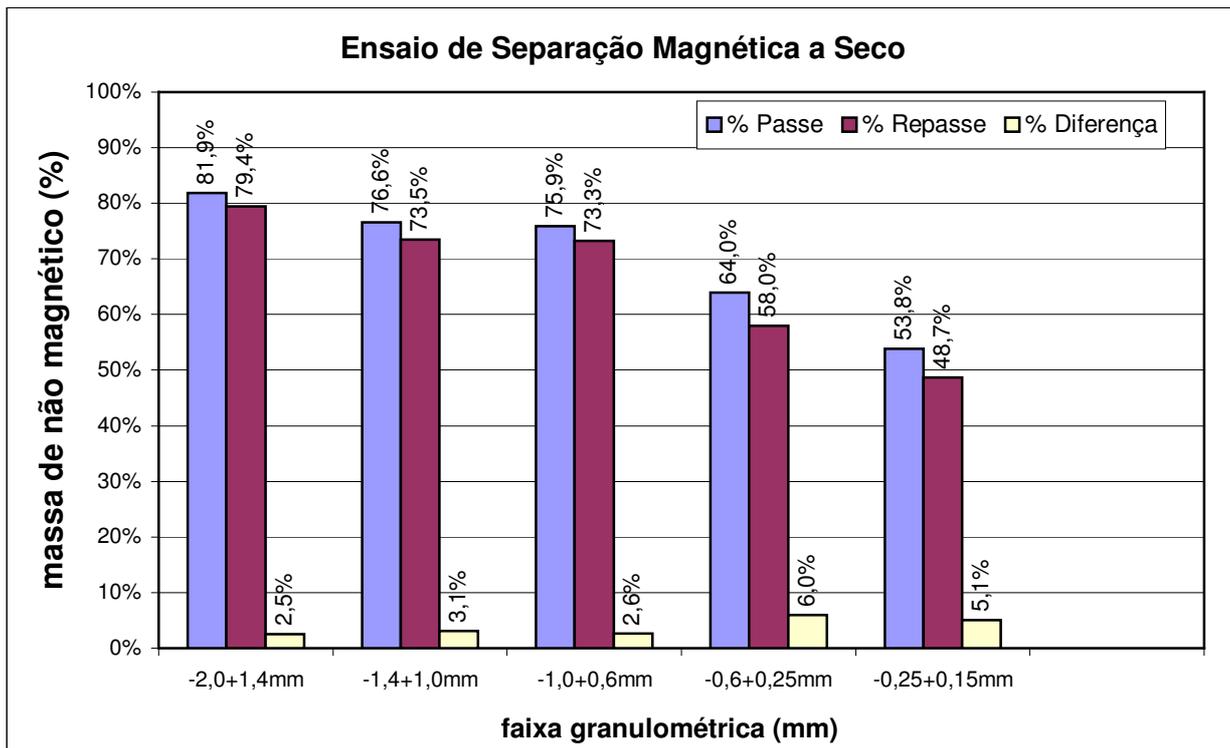


Figura 5.3 - Histogramas de distribuição da massa do produto não magnético do passe e repasse por faixa granulométrica e sua diferença.

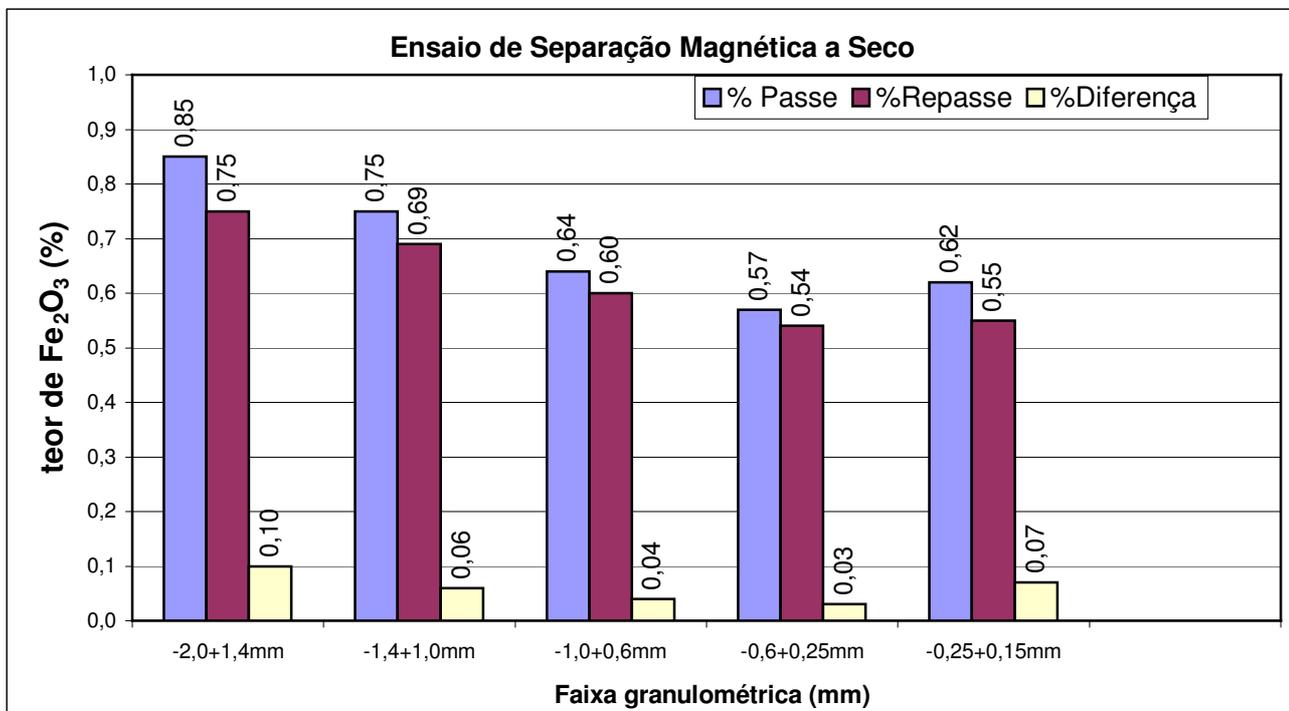


Figura 5.4 - Histogramas de distribuição dos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do produto não magnético do passe e repasse por faixa granulométrica e sua diferença.

Também se pode observar através do histograma da figura 5.4, que quanto menor a fração granulométrica, menor o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no produto não magnético e, também, menor a diferença entre o passe e o repasse, com exceção da faixa  $-0,25 +0,15\text{mm}$ .

Na faixa  $-0,25 +0,15 \text{ mm}$  não se observou uma redução e sim um aumento no teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no produto não magnético em relação a faixa anterior, o que contraria o observado no ensaio de afunda-flutua, cujo grau de liberação das partículas minerais aumenta com a diminuição da granulometria. Porém, considerando-se ser a faixa com maior grau de liberação, a provável causa deste fato se deve à ineficiência do peneiramento mecânico na separação de finos (abaixo de  $0,25 \text{ mm}$ ) que acabam aderindo às partículas maiores, reduzindo sua susceptibilidade magnética e ao mesmo tempo ocorrendo arraste mecânico destes finos aos produtos misto e magnético.

Outra observação a ser considerada é a de que o repasse torna-se importante essencialmente nas frações mais grosseiras ( $-2,0 +1,0 \text{ mm}$ ). Nas demais frações a diferença é pequena, conforme se pode observar no histograma da figura 5.4, justificando o repasse apenas em termos de incremento na produtividade, possibilitando aumentar a taxa de alimentação do separador magnético.

Considerando-se que o teor máximo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aceitável para uso na indústria de porcelanato é  $0,65\%$ , a faixa definida para operação industrial fica entre  $-1,0 +0,15 \text{ mm}$  e com apenas um passe.

### 5.3.2 Flotação

Na fração  $-0,25 \text{ mm}$  (vide tabela 4.3) a flotação *rougher*, apesar de ter apresentado uma boa seletividade ( $10,3\%$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no flotado), ocorreu uma redução pequena do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no concentrado, ( $2,2$  a  $1,8\%$ ) devido a pouca massa flotada ( $5,1\%$ ). No concentrado *scavenger*, por sua vez, ocorreu uma queda na seletividade ( $5,1\%$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no flotado) e baixa recuperação mássica ( $72,2\%$ ), com uma redução acentuada no teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , passando de  $1,09\%$  a  $0,71\%$  no concentrado *scavenger*.

Na fração  $-0,15\text{mm}$  (vide tabela 4.4) a flotação *rougher* manteve uma boa seletividade ( $9,9\%$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no flotado) e com maior massa de flotado ( $11,8\%$ ), resultando em uma queda acentuada do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $2,2\%$  a  $1,0\%$ ). Já na flotação

*scavenger* observou-se uma queda menor do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1,0 a 0,85%), porém, com uma recuperação mássica de 80,23%, superior a obtida na fração -0,25 mm.

Como o objetivo é obter um produto com teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menor que 0,65%, a fração que mais se aproxima deste valor é a -0,25 mm, porém com uma recuperação mássica inferior a obtida na fração -0,15 mm (72,2% contra 80,2% respectivamente).

### 5.3.3 Separação Magnética a Úmido

A tabela 4.5 indica que o processo removeu uma parcela significativa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Na fração -0,25 mm, o produto não magnético, previamente tratado por flotação, atingiu 0,51% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (o teor do concentrado *scavenger* tratado era 0,71%). Igualmente, na fração -0,15 mm, também previamente tratada por flotação, o resultado foi excelente, sendo que de um teor original de 0,85% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , obteve-se um produto não magnético com teor de 0,43% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

O processo também foi eficaz nas alíquotas não tratadas por flotação. Na amostra -0,25 mm, o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  baixou de 2,2% para 0,86%, e na amostra -0,15 mm, o teor baixou de 2,2% para 1,0% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Comparativamente, os resultados obtidos partindo-se do concentrado da flotação foram bem superiores àqueles que não sofreram tratamento prévio. Provavelmente ocorre, que alguns minerais com ferro em sua estrutura, porém com menor susceptibilidade magnética, apresentem, por outro lado, boa condição de flotabilidade. Também outra causa provável concorrente é a saturação do cânister devido à elevada carga de minerais ferromagnéticos.

Outro fato preocupante observado (vide figura 5.5) é a baixa seletividade do processo de separação magnética, resultando em uma baixa recuperação mássica (próximo de 57%), podendo inviabilizar economicamente a venda do produto. Esta situação se torna ainda pior quando partimos do produto da flotação, fazendo com que no final da separação esta recuperação mássica caia para 22,8%, considerando-se o melhor resultado, que foi de 0,43% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Concluindo, os teores de ferro dos concentrados de ambos os ensaios (-0,25 e -0,15 mm) sem flotação prévia ficaram acima do valor limite para uso no porcelanato. Aqueles que partiram do concentrado flotado conseguiram superar com boa margem

este valor, porém as custas de uma baixa recuperação mássica, que provavelmente acabe inviabilizando economicamente o processo. O mais indicado seria seu emprego na linha de esmaltes, de maior valor agregado. Porém, para isto os teores de ferro do concentrado final deveriam estar próximos de 0,35%.

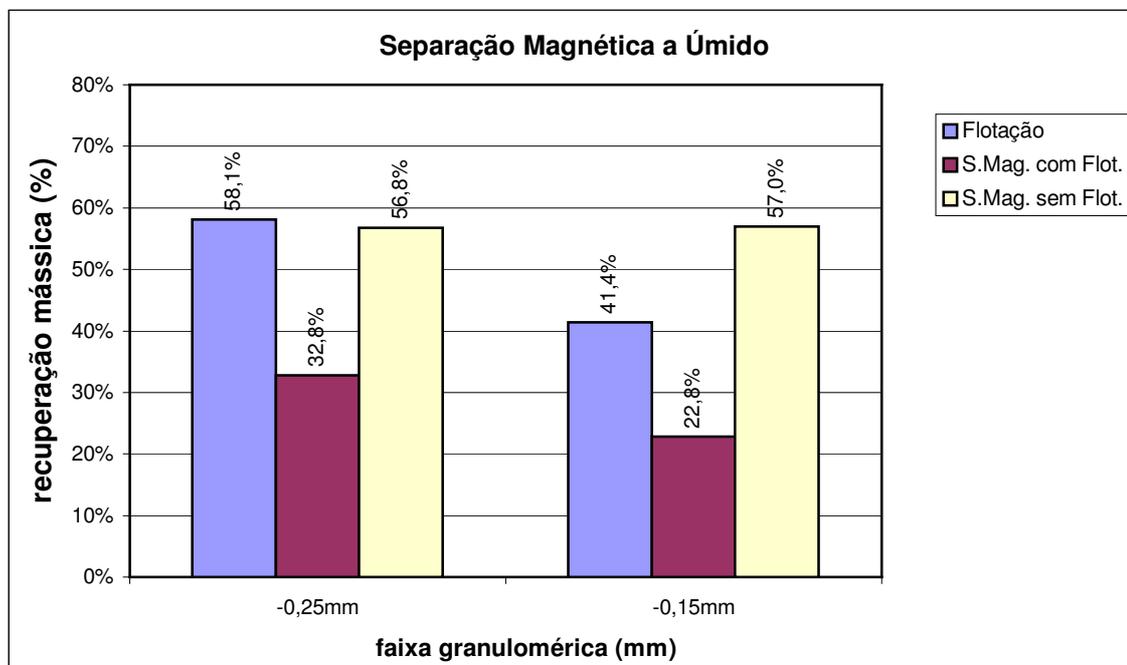


Figura 5.5 - Histogramas de distribuição da massa do produto da flotação e da separação magnética com e sem flotação prévia.

## 5.4 COLORIMETRIA

### 5.4.1 Separação Magnética à Seco

Analisando a tabela 4.6 pode-se observar que em todas as frações houve aumento de alvura no repasse em relação ao passe, o que era de se esperar, pois o repasse reduz ainda mais os minerais máficos presentes, diminuindo, portanto, o teor de ferro no concentrado, confirmando os resultados obtidos na tabela 4.2. Esta diferença se mostra mais acentuada nas frações mais grossas (-2,0 +1,4 mm e -1,4 +1,0 mm), conforme se pode observar na figura 5.6, refletindo o mesmo comportamento observado na tabela 4.2 em relação aos teores de ferro do passe e repasse.

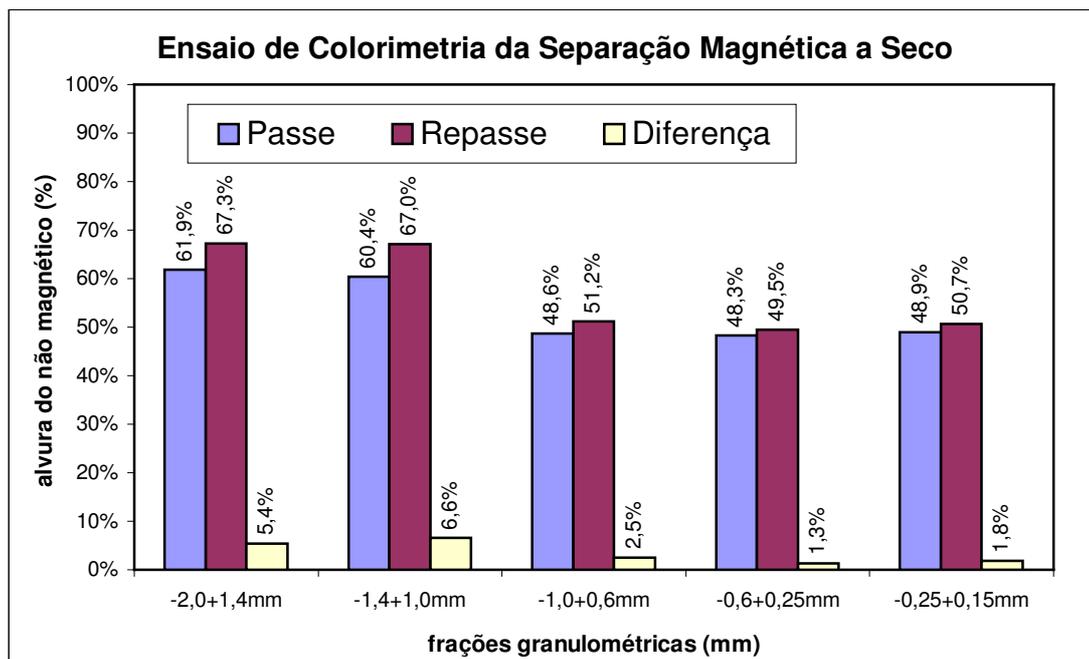


Figura 5.6 - Histograma de alvura do passe e repasse da separação magnética a seco.

Quando se compara a alvura entre as frações, observa-se que nas duas frações mais grossas têm-se alvuras mais elevadas em relação às demais frações. Porém, observando-se os teores de ferro da tabela 4.2 tem-se justamente a situação inversa, ou seja, teores mais altos nas frações grossas o que deveria refletir em alvuras mais baixas em relação às demais faixas. A causa desta discrepância deverá ser mais bem investigada, pode tanto ser de ordem granulométrica, mesmo considerando que as amostras são pulverizadas, como mineralógica, devido a liberação dos minerais opacos e da titanita nas frações mais finas.

Nestas condições deve-se ter cautela quanto aos resultados colorimétricos, quando comparados entre diferentes faixas granulométricas.

#### 5.4.2 Flotação

Os espectros das figuras 4.14 e 4.15 indicam a importância do circuito *scavenger* no processo. As alvuras aumentam significativamente nesse circuito, se comparado com a amostra original, e mesmo com a amostra do circuito *rougher* (vide figura 5.7).

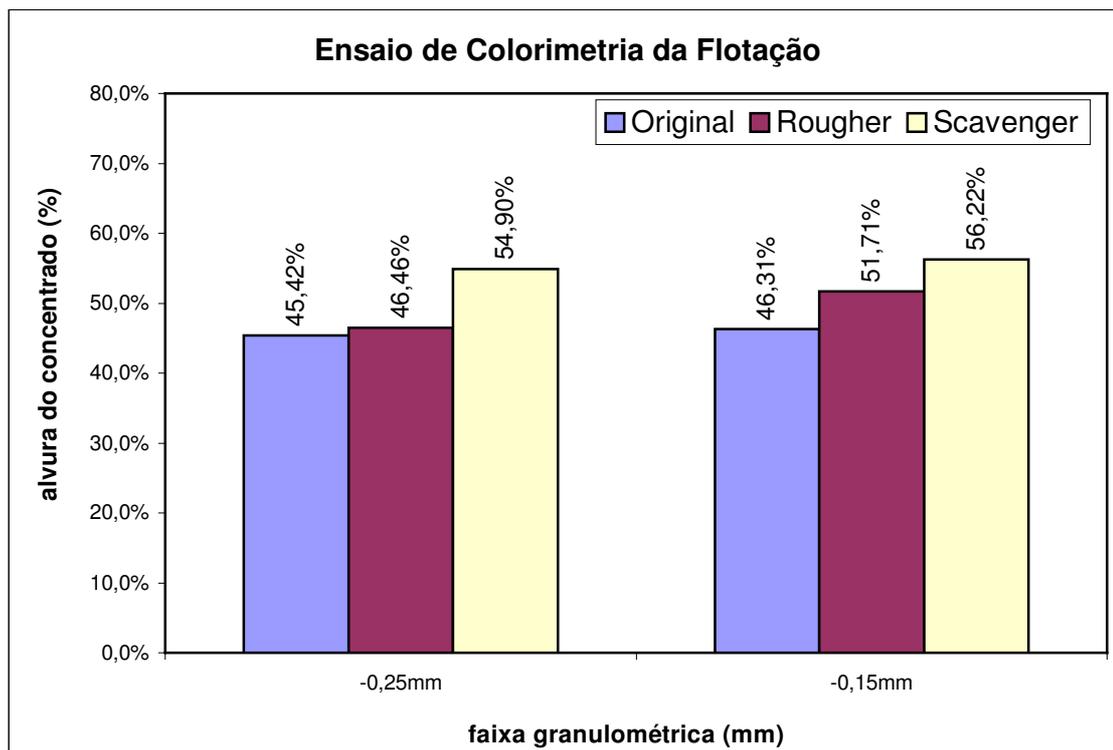


Figura 5.7 - Histogramas das alvuras da amostra original e dos produtos da flotação rougher e scavenger.

Na comparação dos parâmetros colorimétricos entre as duas frações, observou-se alvura ligeiramente melhores nos concentrados *rougher* e *scavenger* da fração – 0,15mm, ao contrário do observado nas tabelas 4.3 e 4.4 no que se refere aos teores de  $Fe_2O_3$ .

#### 5.4.3 Separação Magnética a Úmido

Os valores da tabela 4.9, associados aos espectros das figuras 4.17 e 4.18, indicam que a separação magnética a úmido foi importante para a redução do teor de  $Fe_2O_3$  (vide tabela 4.5), principalmente para a amostra –0,15 mm, cuja redução de  $Fe_2O_3$  foi maior com o processo, comprovado com os ensaios de colorimetria. Na tabela 4.8 e histogramas da figura 5.8, observa-se que a alvura da amostra –0,15 mm, submetida a flotação, foi significativamente maior que a amostra –0,25 mm, também submetida a flotação.

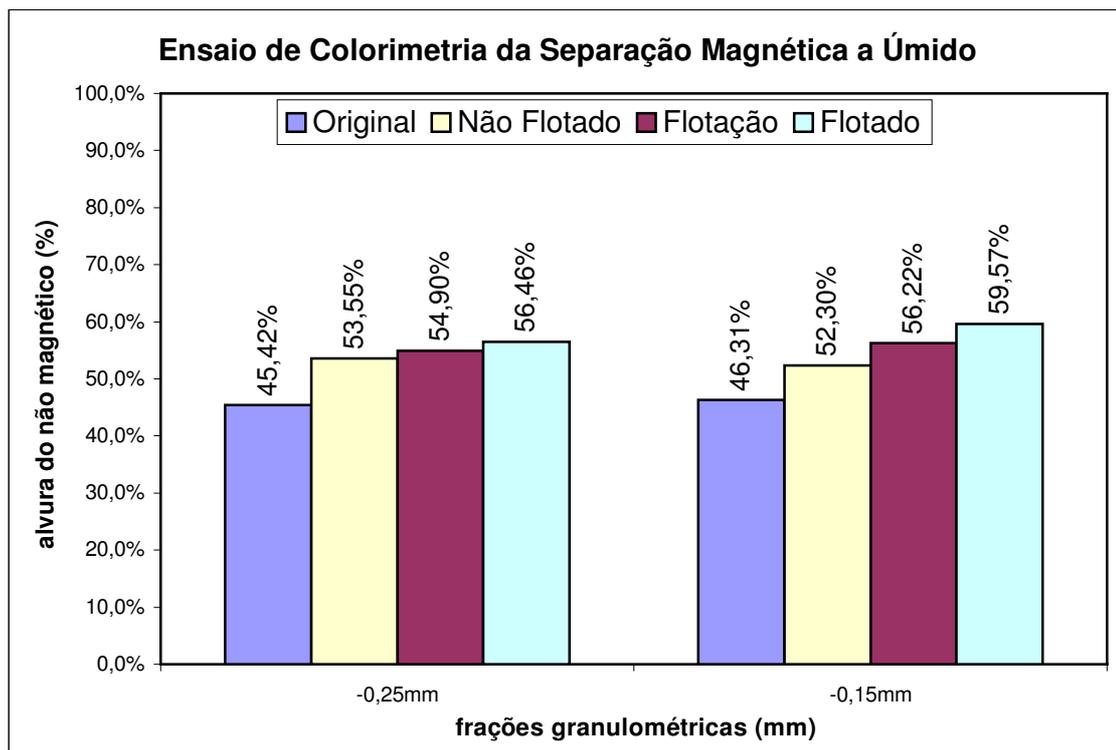


Figura 5.8 - Histogramas dos índices de alvura da amostra original e do concentrado scavenger da flotação dos produtos da separação magnética a úmido.

Novamente aqui, apesar de os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dos concentrados da separação magnética a úmido, previamente flotados, terem ficado bem abaixo dos concentrados da fração grosseira da separação magnética a seco, as alvuras obtidas foram inferiores.

## 6. PROJETO INDUSTRIAL

O objetivo do presente capítulo é projetar, a partir dos resultados obtidos, uma linha de processo para a produção de um produto destinado ao mercado cerâmico de porcelanato, inserindo-a no atual processo produtivo que beneficia a mesma matéria prima, porém para outras aplicações.

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA A ELABORAÇÃO DO PROJETO

O primeiro passo para o desenvolvimento de um projeto industrial qualquer é realizar uma avaliação de mercado para que se possa definir as especificações do produto e a escala de produção.

Avaliando o mercado, observa-se que na indústria cerâmica as matérias primas fundentes para a produção de porcelanatos e esmaltes diferem essencialmente em relação à exigência de cor, sendo que, para o porcelanato, teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,65\%$  são aceitáveis; porém, no caso de esmaltes, o limite cai para  $0,35\%$  de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Como no presente estudo não foi possível atingir o valor de  $0,35\%$ , mesmo por via úmida, este projeto concentrou-se no porcelanato.

Comparando-se os ensaios executados conclui-se que a rota de processo mais indicada para beneficiar a nefelina-sienito, e obter uma matéria prima indicada para uso na fabricação de porcelanato, é a separação magnética a seco.

Esta conclusão está fundamentada nos seguintes aspectos: é o processo de menor custo de investimento e operacional, pois dispensa a necessidade de adição de água no circuito, suprimindo os custos inerentes a posterior secagem do produto final e, apresenta o menor custo de implantação. Além disso, o aproveitamento (recuperação mássica) do minério beneficiado é bastante favorável a este processo em relação aos demais.

Quanto à faixa granulométrica operacional, observando-se a tabela 4.2 e considerando-se o limite estabelecido pelo mercado de  $0,65\%$ , conclui-se, a princípio, que deva situar-se entre 1,0 e 0,15 mm. Porém, A faixa granulométrica para proceder a separação magnética via seca foi definida entre -1,0 e +0,25 mm. Esta decisão baseou em dois fatores: o primeiro é que a empresa já comercializa um produto com

granulometria  $-0,25\text{mm}$ , denominado Nefelina Fundex 60, e o segundo é que quanto maior a granulometria, mais eficiente o peneiramento. Os subprodutos gerados na separação magnética irão compor um outro produto já existente denominado Fonólito Fundex 18, resultando no aproveitamento total da matéria prima.

Apesar do mercado indicar uma capacidade de consumir a médio prazo de aproximadamente 1.000 toneladas/mês, optou-se a princípio pela elaboração de um processo industrial que contemplasse o curto prazo, reduzindo o risco de investimentos elevados já em uma primeira etapa, permitindo avaliar a aceitação do produto no mercado antes de partir para investimentos de maior vulto. Com isto, definiu-se um circuito industrial para produzir 250 toneladas/mês de produto beneficiado e, em uma segunda fase, implantar um circuito industrial com capacidade de beneficiar 1.000 t/mês.

Este projeto permitiu à empresa realizar uma parceria com a empresa CEUSA, que irá utilizar exclusivamente o produto desenvolvido neste trabalho para testá-lo, introduzindo-o em sua massa de porcelanato, sendo que seu consumo tende a atingir, em menos de seis meses, a produção estimada de 250 t/ mês.

O projeto centrou-se, portanto, no processo de separação magnética a seco através de separador magnético ReRoll (terras raras), permitindo processar o minério a um preço competitivo no mercado em relação ao feldspato sódico.

## 6.2 PROCESSO PRODUTIVO DA NEFELINA-SIENITO

No processo produtivo da Mineração e Pesquisa Brasileira são extraídos e beneficiados dois tipos de minérios (matéria prima), o fonólito e a nefelina-sienito (anexo 1). No caso da produção de nefelina para porcelanato, a nefelina-sienito é extraída de uma jazida localizada a 40 km de distância da unidade de beneficiamento.

O processo de extração tem por finalidade a retirada do minério bruto da jazida para ser beneficiado e consiste na fragmentação da rocha pela detonação com explosivos, e transporte a unidade de britagem.

A maior dificuldade encontrada nesta etapa é a distância da jazida de nefelina-sienito, situada a 40 km da planta de beneficiamento; além disso, o trecho da estrada próximo a jazida é de difícil acesso, principalmente em dias de chuva.

A britagem do fonólito se dá em duas etapas denominadas britagem primária e secundária, havendo uma pilha de estocagem entre os dois processos a fim de regular o fluxo de produção. Porém, no caso da nefelina-sienito, não existe pilha de estocagem intermediária e, portanto, as duas britagens ocorrem de forma simultânea e, como a capacidade produtiva da primária é superior à da secundária, ocorrem problemas de fluxo, refletindo em paradas não programadas devido ao “embuxamento” do rebitador secundário por excesso de material.

O produto da britagem apresenta granulometria abaixo de 20 mm e é conduzido a um silo de estocagem com capacidade para 200 toneladas. Do silo de estocagem o material segue para o circuito de moagem. No caso do fonólito, obtém-se nesta etapa um produto, classificado entre 20 e 50 mm, denominado Sodalita 20x50.

O circuito de moagem é dotado de três moinhos de anéis operando em circuito fechado com peneiras classificadoras de dois e três *deck's*, que operam em paralelo, processando os diferentes produtos requeridos pelo mercado de acordo com suas características granulométricas. No caso da nefelina é produzido um produto abaixo de 0,25 mm, denominado Nefelina Fundex 60.

### 6.3 PROCESSO PRODUTIVO MODIFICADO DA NEFELINA-SIENITO

Para que se possa inserir no processo produtivo da nefelina-sienito um novo produto destinado ao mercado de porcelanato definiu-se um novo circuito industrial a partir das instalações pré-existentes.

A nova linha de produção é composta pelas etapas de processo de extração, britagem, moagem, separação magnética, remoagem e estocagem para expedição, cujas etapas de extração, britagem primária e secundária são compartilhadas com os demais processos.

No novo circuito (anexo 2), o material britado poderá seguir por dois caminhos, ou seja, para a britagem terciária ou para a moagem, dependendo do tipo de material que se pretende produzir. Neste caso, seguirá para a britagem terciária.

O circuito de britagem terciária é dotado de dois britadores de rolos em série, seguidos de uma peneira classificadora em circuito fechado, que classifica o material à faixa de 1,5 mm. O produto abaixo de 1,5 mm será novamente classificado em peneira

de dois *deck's*, gerando três faixas granulométricas. O produto acima de 1,0 mm, retido no *deck* superior, retorna à britagem terciária. O produto intermediário (entre 1,0 e 0,25mm) segue a um silo de estocagem, com capacidade para 14 t, de onde seguirá diretamente ao separador magnético. O produto fino, representando aproximadamente 12% da massa total, seguirá para outro silo de estocagem, onde irá compor, juntamente com o produto da moagem, o produto denominado Nefelina 60.

O processo de separação magnética tem por finalidade reduzir o teor de ferro extraíndo os minerais em que este se encontra presente na sua estrutura, visando interferir no padrão de cor do produto final. O equipamento utilizado neste processo é importado e de alto custo de aquisição, apresentando uma capacidade produtiva em torno de 1,1 t/h, considerando-se os parâmetros utilizados nos ensaios de beneficiamento por separação magnética do capítulo anterior. Porém, como deve retirar 0,2 t/h de ferro do processo, o produto gerado na separação cai para 0,9 t/h.

A etapa seguinte, remoagem, tem por objetivo fragmentar o produto da separação magnética, adequando-o às condições granulométricas exigidas pelo mercado. Para isto utiliza-se dois moinhos de bolas em circuito fechado com uma peneira classificatória, com abertura de 0,6 mm, com capacidade de produção para 1,5 t/h.

A figura 6.1 apresenta um fluxograma simplificado do processo produtivo da Nefelina CS100, que é a denominação do produto desenvolvido. No fluxograma é indicada a capacidade horária de cada um dos equipamentos, denominados “unidades operacionais”, desconsiderando sua eficiência operacional, ou melhor, considerando eficiência de 100%.

Uma vez definido o circuito operacional e as respectivas capacidades de processamento de cada um dos equipamentos envolvidos no processo, passou-se a definição dos parâmetros operacionais que permitam atingir o nível de produção mensal de 250 t/ mês de Nefelina CS100. Para isso elaborou-se uma tabela com as necessidades de disponibilidade diárias de cada equipamento, considerando-se os parâmetros de eficiência operacional. Após diversas simulações, chegou-se a situação ideal conforme demonstrada na tabela 6.1.

Na tabela 6.2 definiu-se as necessidades de mão-de-obra e distribuição dos turnos de acordo com as exigências de disponibilidade horária, definidas na tabela anterior, para atingir a produção de 250 t/ mês.

Cabe comentar que após as 19:00 horas entra-se no “horário de ponta”, cujo custo energético é bem maior e por isso optou-se por operar apenas a separação magnética neste período, pelo simples fato de que além de ser a operação gargalo, não demanda um consumo elevado de energia.

Tabela 6.1 – Nova Disponibilidade Diária por Unidade Produtiva Ajustada a Demanda do Produto no Mercado.

		Extração	Transp.	Britagem Primária	Britagem Secund.	Britagem Terciária	Moagem	Sep.magn.	Remoag.	Vendas
Capacidade produtiva	(t/h)	7,0	4,5	20,0	20,0	1,7	2,5	1,1	1,9	-
<b>Eficiência operacional</b>	(%)	76%	71%	80%	80%	<b>88%</b>	86%	<b>93%</b>	<b>73%</b>	-
Produção real	(t/h)	5,3	3,2	16,0	16,0	1,5	2,2	<b>1,0</b>	1,4	-
% granul. ou % nmag.	(%)	-	-	-	-	86%	-	80%	-	-
Produção real produtos	(t/h)	5,3	3,2	16,0	16,0	1,3	2,2	0,8	1,4	-
Disponibilidade diária	(hs/dia)	08:48	08:48	08:48	08:48	11:56	08:48	14:54	08:48	-
Capacidade do pulmão	(ton.)	1000	200	-	260	14	64	9	64	-
Capac.máx. prod. Diária	(t/dia)	61,6	39,6	176,0	176,0	<b>20,2</b>	22,0	16,4	16,7	-
Produção diária real	(t/dia)	46,8	28,1	140,8	140,8	<b>17,7</b>	18,9	<b>15,2</b>	<b>12,2</b>	-
Produção diária produtos	(t/dia)	46,8	28,1	140,8	140,8	<b>15,2</b>	18,9	<b>12,2</b>	<b>12,2</b>	-
Disponibilidade mensal	(dias/mês)	10	15	3	3	21	7	21	21	-
Produção mensal	(t/mês)	468	422	422	422	<b>372</b>	132	<b>320</b>	<b>256</b>	250
Produção mensal prod.	(t/mês)	468	422	422	422	<b>320</b>	132	<b>256</b>	<b>256</b>	<b>250</b>

Tabela 6.2 – Distribuição dos Turnos dos Operadores por Unidade

Unid. Produt	6:00-7:30	7:30-12:00	12:00-13:00	13:00-15:18	15:18-17:18	17:18-18:00	19:00-21:48	Total
Brit.Primária	-	Operador 1	-	Operador 1	Operador 1	-	-	08:48
Brit. Secund.		Operador 1	-	Operador 4	Operador 1	-	-	08:48
Brit. Terciária	Operador 5	Operador 5	Operador 2	Operador 2	Operador 2	Operador 2	-	<b>11:56</b>
Moagem	-	Operador 4	-	Operador 5	Operador 4	-	-	08:48
Sep.Magnét.	Operador 5	Operador 3	Operador 2	Operador 3	Operador 3	Operador 2	Operador 2	<b>14:54</b>
Remoagem	-	Operador 3	-	Operador 3	Operador 3	-	-	08:48

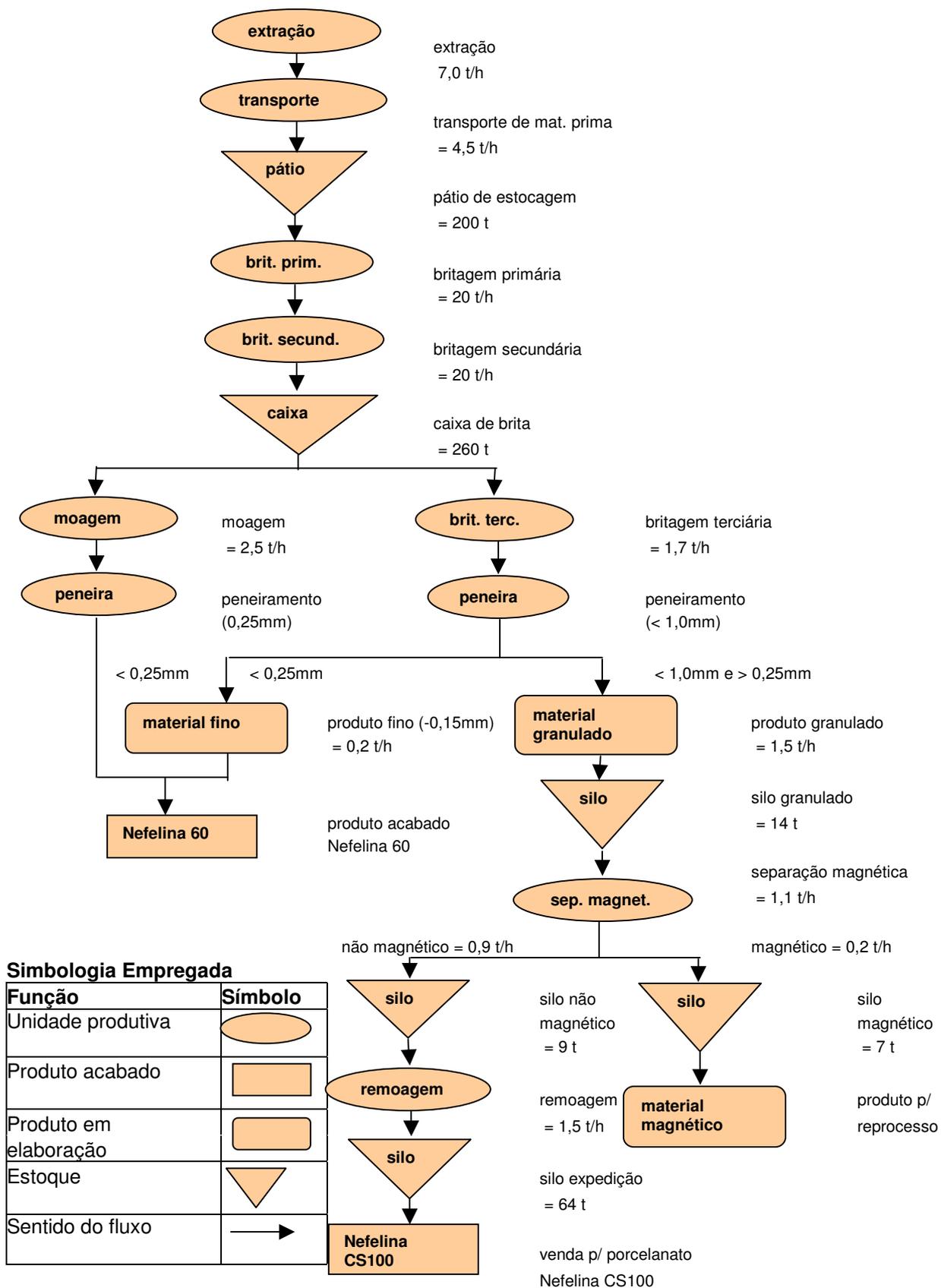


Figura 6.1 - Fluxograma simplificado do processo produtivo da Nefelina CS100.

## 7. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Uma vez definido o projeto, faz-se necessário uma avaliação econômica, identificando os investimentos necessários e os custos operacionais envolvidos na produção da Nefelina CS100, bem como avaliar a viabilidade econômica do projeto através de índices econômicos e elaboração de fluxo de caixa.

### 7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Quanto aos investimentos, serão considerados somente os equipamentos que forem inseridos na planta de beneficiamento para produção exclusiva da Nefelina CS100, desconsiderando-se os investimentos em equipamentos e instalações que já fazem parte do processo para beneficiar os demais produtos.

Os custos operacionais serão baseados nos custos praticados pela empresa, considerando suas características operacionais.

A avaliação econômica terá por objetivo indicar, através de técnicas específicas, os parâmetros de economicidade que permitam a decisão de se investir ou não neste projeto, elaborando-se para isso um fluxo de caixa representativo do projeto.

Serão avaliados os custos de investimento e operacionais para duas escalas de produção; a primeira, definida em 250 t/ mês, corresponderá aos primeiros quatro anos de operação, contemplando a implantação do projeto definido para o curto prazo. A segunda, em 1.000 t/ mês, definida para o médio prazo que terá início já a partir do quinto ano, sem interrupção entre os dois processos, com 70% da capacidade no quinto ano e 100% a partir do sexto ano.

### 7.2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA PARA O CURTO PRAZO

Conforme comentado no item anterior, adotou-se para os primeiros quatro anos de operação uma escala de produção para o produto final acabado de 250 t/ mês, conforme estudo de mercado realizado pela empresa.

## 7.2.1 Regimes Operacionais e Parâmetros de Lavra

Considerando esta escala de produção, os regimes operacionais adotados, a partição dos produtos e os parâmetros de lavra encontram-se detalhados nas tabelas 7.1 e 7.2.

Tabela 7.1 - Escala de produção de 250 t / mês de Nefelina CS100 - Regimes operacionais, partição dos produtos.

REGIMES OPERACIONAIS		PARTIÇÃO DOS PRODUTOS				
		Produto	%	t/hora	t/mês	t/ano
2,2	t/h = alimentação					
21	dias por mês	Nef. CS100	68%	1,4	252	3.030
8,8	horas/dia	Nefelina 60	12%	0,2	45	539
184,8	horas/mês	Fonolito 18	20%	0,4	75	898
2217,6	horas/ano					
92%	Eficiência de operação	<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>2,0</b>	<b>372</b>	<b>4.466</b>
REMOÇÃO DE ESTÉRIL					1.710	20.526
REMOÇÃO DE MINÉRIO					447	5.359

Tabela 7.2 - Parâmetros de lavra para produção de 250 t / mês de Nefelina CS100.

PARÂMETROS DA JAZIDA		PARÂMETROS DE PRODUÇÃO	
RESERVAS DA JAZIDA		PRODUÇÕES MÉDIAS MENSAIS	
<b>466.949</b>	Área minerável (m <sup>2</sup> )	<b>372</b>	Produto vendido (t)
<b>6,00</b>	Altura da cava (m)	<b>20%</b>	Perdas no processo
<b>2.801.694</b>	Volume total a remover (m <sup>3</sup> )	<b>447</b>	Minério Extraído (t)
<b>16,68%</b>	Relação percentual minério/estéril	<b>1.710</b>	Estéril removido (t)
<b>467.286</b>	Volume de minério “in situ” (m <sup>3</sup> )	<b>186</b>	Minério “in situ” extraído (m <sup>3</sup> )
<b>2.334.408</b>	Volume de estéril “in situ” (m <sup>3</sup> )	<b>930</b>	Estéril “in situ” removido (m <sup>3</sup> )
<b>584.107</b>	Volume de minério empolado (m <sup>3</sup> )	<b>233</b>	Minério empol. extraído (m <sup>3</sup> )
<b>3.151.451</b>	Volume de estéril empolado (m <sup>3</sup> )	<b>1.255</b>	Estéril empol. removido (m <sup>3</sup> )
<b>2,4</b>	Densidade “in situ” do minério	<b>149</b>	Estéril decapeado (m <sup>3</sup> )
<b>1,84</b>	Densidade “in situ” do estéril		
<b>1.121.485</b>	Reserva de minério da jazida (t)		
<b>4.295.311</b>	Massa de estéril da jazida (t)		
<b>3,83</b>	Relação estéril/minério (em peso)		
<b>0,60</b>	Altura da cobertura de solo (m)		
<b>280.169</b>	Volume de estéril a decapear (m <sup>3</sup> )		
<b>940</b>	Cota final projetada para a cava		

### 7.2.2 Custos

O custo médio total para a produção de 1 tonelada de produtos na proporção de 20% de Fonolito 18, 12% de Nefelina 60 e 68% de Nefelina CS100, foi estimado em R\$ 61,26 conforme resumido na tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Resumo dos custos de lavra e beneficiamento para produção de 250 t/ mês de Nefelina CS100 ,curto prazo.

<b>RESUMO DOS CUSTOS DA LAVRA E DO BENEFICIAMENTO</b>				
<b>POR CENTRO DE CUSTO</b>	<b>Custo R\$/t</b>	<b>Total mês</b>	<b>Total ano</b>	<b>%</b>
1- MÃO DE OBRA	12,73	4.735,80	56.829,60	20,77
2- SERVIÇOS DE TERCEIROS	28,26	10.515,83	126.189,97	46,12
3- MATERIAIS	10,74	3.995,56	47.946,76	17,52
4- ENERGIA ELÉTRICA	3,65	1.358,11	16.297,35	5,96
5- COMBUSTÍVEIS	4,90	1.822,70	21.872,34	7,99
6- MEIO AMBIENTE	0,17	62,03	744,33	0,27
7- ROYALTIES JAZIDA	0,83	310,14	3.721,65	1,36
<b>TOTAL</b>	<b>61,26</b>	<b>22.800,17</b>	<b>273.602,00</b>	<b>100,00</b>
<b>POR ATIVIDADE</b>				
EXTRAÇÃO	33,74	12.555,37	150.664,41	55,07
BENEFICIAMENTO	20,79	7.737,86	92.854,34	33,94
ADMINISTRAÇÃO	6,74	2.506,94	30.083,25	11,00
<b>TOTAL</b>	<b>61,26</b>	<b>22.800,17</b>	<b>273.602,00</b>	<b>100,00</b>

### 7.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA PARA O MÉDIO PRAZO

Considerou-se como médio prazo um período de quatro anos após operação do circuito definido para o curto prazo, sendo sua implantação no quarto ano, e início de operação no quinto.

Adotou-se para este caso uma escala de produção de produto final acabado de 1.000 t/ mês, iniciando a partir do quinto ano com 70% da capacidade e do sexto até o vigésimo ano com 100% da capacidade.

#### 7.3.1 Regimes Operacionais e Parâmetros de Lavra

Considerando esta escala de produção, os regimes operacionais adotados, a partição dos produtos e os parâmetros de lavra encontram-se detalhados nas tabelas 7.4 e 7.5.

Tabela 7.4 - Escala de produção de 1.000 t /mês de Nefelina CS100 - regimes operacionais, partição dos produtos.

REGIMES OPERACIONAIS		PARTIÇÃO DOS PRODUTOS				
		Produto	%	t/hora	t/mês	t/ano
8,7	t/h = alimentação					
21	dias por mês	Nef. CS100	68%	5,4	1000	11.995
8,8	horas/dia	Nefelina 60	12%	1,0	178	2.132
184,8	horas/mês	Fonolito 18	20%	1,6	296	3.554
2217,6	horas/ano					
92%	Eficiência de operação	<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>8,0</b>	<b>1.473</b>	<b>17.681</b>
REMOÇÃO DE ESTÉRIL					6.772	81.263
REMOÇÃO DE MINÉRIO					1.768	21.217

Tabela 7.5 – Parâmetros de lavra para produção de 1.000 t/ mês de Nefelina CS100.

PARÂMETROS DE PRODUÇÃO	
PRODUÇÕES MÉDIAS MENCIAIS	
<b>1.473</b>	Produto vendido (t)
<b>20%</b>	Perdas no processo
<b>1.768</b>	Minério Extraído (t)
<b>6.722</b>	Estéril removido (t)
<b>737</b>	Minério “in situ” extraído (m <sup>3</sup> )
<b>3.680</b>	Estéril “in situ” removido (m <sup>3</sup> )
<b>921</b>	Minério empol. extraído (m <sup>3</sup> )
<b>4.969</b>	Estéril empol. removido (m <sup>3</sup> )
<b>589</b>	Estéril decapeado (m <sup>3</sup> )

### 7.3.2 Custos

O custo médio total para a produção de 1 tonelada de produtos na proporção de 20% de Fonolito 18, 12% de Nefelina 60 e 68% de Nefelina CS100 foi estimado em R\$ 57,93 conforme resumido na tabela 7.6.

### 7.3.3 Preço de Venda

O preço de venda por tonelada definido para cada um dos três tipos de produtos comercializados, ou seja, da Nefelina CS100 e dos subprodutos gerados Nefelina 60 e

Fonolito 18 foram; R\$ 224,00, R\$ 98,00 e R\$ 89,00 respectivamente, sendo o preço médio dos três produtos R\$ 181,67 / t.

Tabela 7.6 – Resumo dos custos de lavra e beneficiamento para produção de 1000 t/ mês de Nefelina CS100, médio prazo.

<b>RESUMO DOS CUSTOS DA LAVRA E DO BENEFICIAMENTO</b>				
<b>POR CENTRO DE CUSTO</b>	<b>Custo R\$/t</b>	<b>Total mês</b>	<b>Total ano</b>	<b>%</b>
1- MÃO DE OBRA	10,67	15.728,39	188.740,72	18,43
2- SERVIÇOS DE TERCEIROS	28,26	41.633,13	499.597,58	48,78
3- MATERIAIS	10,74	15.818,80	189.825,60	18,53
4- ENERGIA ELÉTRICA	3,65	5.376,89	64.522,68	6,30
5- COMBUSTÍVEIS	3,61	5.324,09	63.889,06	6,24
6- MEIO AMBIENTE	0,17	245,57	2.946,87	0,29
7- ROYALTIES JAZIDA	0,83	1.227,86	14.734,35	1,44
<b>TOTAL</b>	<b>57,93</b>	<b>85.354,74</b>	<b>1.024.256,85</b>	<b>100,00</b>
<b>POR ATIVIDADE</b>				
EXTRAÇÃO	32,22	47.478,46	569.741,56	55,62
BENEFICIAMENTO	20,59	30.333,09	363.997,08	35,54
ADMINISTRAÇÃO	5,12	7.543,18	90.518,21	8,84
<b>TOTAL</b>	<b>57,93</b>	<b>85.354,74</b>	<b>1.024.256,85</b>	<b>100,00</b>

#### 7.4 INVESTIMENTOS

Para quantificar os investimentos necessários ao projeto, alguns valores foram estimados e outros obtidos junto a empresa.

Conforme comentado no capítulo anterior, só serão considerados os investimentos em equipamentos adquiridos exclusivamente para compor o circuito que irá produzir a Nefelina CS100. Os equipamentos que já fazem parte do processo produtivo da empresa e que compartilharão a produção deste produto com os demais, não requerem investimento a não ser em uma necessidade de aumento da capacidade produtiva em função do novo produto.

##### 7.4.1 Equipamentos de Lavra

Os investimentos totais realizados na lavra serão de R\$ 293.000,00, para a produção de 1.000 t/ mês de Nefelina CS100. Para a produção de 250 t/ mês não houve necessidade de investimento. Os valores encontram-se detalhados na tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Investimentos em lavra.

<b>1- DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DA MINA</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
	Aquisição do terreno ( <b>já possui</b> )	0,00	0,00
	Sondagem rotativa ( <b>já executada</b> )	0,00	0,00
	Construção de pátio p/ estocagem (ampliação)	10.000,00	0,00
	Desenvolvimento da lavra e consultorias ( <b>já executado</b> )	0,00	0,00
	<b>TOTAL ÁREA 1</b>	<b>10.000,00</b>	<b>0,00</b>
<b>2 - INVESTIMENTO EM INFRA-ESTRUTURA</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
1	Alojamento ( <b>já construído</b> )	0,00	0,00
1	Tanque de óleo e bomba	18.000,00	0,00
	<b>TOTAL ÁREA 2</b>	<b>18.000,00</b>	<b>0,00</b>
<b>3 - INVESTIMENTO EM EQUIPAMENTOS DE LAVRA</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
1	Escavadeira hidráulica ( <b>serviço terceirizado</b> )	0,00	0,00
1	Retro escavadeira ( <b>serviço terceirizado</b> )	0,00	0,00
4	Caminhão basculante ( <b>serviço terceirizado</b> )	0,00	0,00
1	Trator de esteira Komatsu - D 65	55.000,00	0,00
1	Pá carregadeira Michigan 55C	210.000,00	0,00
	<b>TOTAL ÁREA 3</b>	<b>265.000,00</b>	<b>0,00</b>
<b>RESUMO DOS INVESTIMENTOS</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
1	DESENVOLVIMENTO E PREPARAÇÃO DA MINA	10.000,00	0,00
2	INVESTIMENTO EM INFRA-ESTRUT. E MANUTENÇÃO	18.000,00	0,00
3	INVESTIMENTO EM EQUIPAMENTOS DE LAVRA	265.000,00	0,00
	<b>TOTAL DOS INVESTIMENTOS</b>	<b>293.000,00</b>	<b>0,00</b>

#### 7.4.2 Investimentos em Beneficiamento

Os investimentos totais realizados no beneficiamento foram de R\$ 1.161.200,00 para a produção de 1.000 t/ mês de Nefelina CS100 e de R\$ 616.100,00 para a produção de 250 t/ mês. Os investimentos necessários para a produção de 1.000 t/ mês já partem do que já foi investido para produzir 250 t/ mês, ou seja, são complementares a este. Os valores encontram-se detalhados na tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Investimentos em beneficiamento para produção de 1.000t / mês.

<b>1- BRITAGEM PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
1	Alimentador vibratório Faço MV 20040 *	0,00	0,00
1	Britador de Mandíbulas Faço 8050-E *	0,00	0,00
1	Alimentador vibratório Faço CV-1308 *	0,00	0,00
1	Galpão de estocagem do britado	19.000,00	0,00
1	Peneira vibratória Faço MNS-30012/2A *	0,00	0,00
1	Rebritador cônico Nordberg mod. 3' SH *	0,00	0,00
1	Separador magnético de Rolos *	0,00	0,00
12	Transportador de correia *	0,00	0,00
2	Caixa d'agua de 60.000 litros *	0,00	0,00
1	Sistema de captação de pó c/ filtro manga *	0,00	0,00
2	Caixa de brita *	0,00	0,00
<b>TOTAL BRITAGEM PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA</b>		<b>19.000,00</b>	<b>0,00</b>

\* Já existe na usina

<b>2 - BRITAGEM TERCIÁRIA</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
2	Moinho de rolos	0,00	50.000,00
1	Moinho Impactor Faço mod. Cânica	170.900,00	0,00
4	Alimentador vibratório	10.000,00	10.000,00
2	Peneira vibratória inclinada c/ duplo deck	43.000,00	15.000,00
4	Transportador de correia	0,00	34.000,00
1	Sistema de captação de pó c/ filtro manga	12.000,00	31.000,00
<b>TOTAL BRITAGEM TERCIÁRIA</b>		<b>235.900,00</b>	<b>140.000,00</b>

<b>3 - SEPARAÇÃO MAGNÉTICA</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
2	Peneira vibrat. circ.,duplo deck, diâm.1200mm	0,00	25.000,00
1	Peneira vibrat. circ.,alta freq.,duplo deck, diâm.1200mm	43.500,00	0,00
3	Silo de estocagem, cap. 6t/silo	0,00	19.500,00
3	Silo de estocagem, cap. 20t/silo	37.500,00	0,00
1	Sep. Magnético tipo ReRoll, rolo simples, 4" diâm.	0,00	85.000,00
2	Sep. Magnético tipo ReRoll, rolo duplo, 4" diâm.	287.000,00	0,00
6	Transportador de correia	28.500,00	28.500,00
4	Elevador de canecos	24.000,00	24.000,00
<b>TOTAL SEPARAÇÃO MAGNÉTICA</b>		<b>420.500,00</b>	<b>182.000,00</b>

<b>4 - REMOAGEM</b>		<b>1.000 t/mês</b>	<b>250 t/mês</b>
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
2	Silo de estocagem, capacidade 8t	0,00	9.600,00
1	Silo de estocagem, capacidade 20t	12.300,00	0,00
2	M. de bolas 1,8x2,0 c/ revest.sílex	0,00	64.000,00
1	M. de bolas 2x4 revest.sílex, c/aeroclass.e filtro mangas	250.000,00	0,00
1	Peneira vibratória circular duplo deck, diâm. 1200mm	0,00	12.500,00
2	Elevador de canecos	0,00	24.000,00
5	Transportador de correia	19.000,00	28.500,00
<b>TOTAL REMOAGEM</b>		<b>281.300,00</b>	<b>138.600,00</b>

**5 - EXPEDIÇÃO**

1.000 t/mês

250 t/mês

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
4	Silo de Estocagem (cap.32 t)	24.000,00	24.000,00
4	Elevador de canecos	24.000,00	24.000,00
6	Transportador de correia	19.000,00	38.000,00
	<b>TOTAL EXPEDIÇÃO</b>	<b>67.000,00</b>	<b>86.000,00</b>

**6 - MONTAGEM DAS PLANTAS**

1.000 t/mês

250 t/mês

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
	Obras civis	56.000,00	32.000,00
	Montagem mecânica	53.000,00	25.000,00
	Instalações elétricas	25.000,00	10.000,00
	Instalações hidráulicas	3.500,00	2.500,00
	<b>TOTAL MONTAGEM DAS PLANTAS</b>	<b>137.500,00</b>	<b>69.500,00</b>

**7 - INFRA-ESTRUTURA**

1.000 t/mês

250 t/mês

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
	Oficina, almoxarifado, alojamentos *	0,00	0,00
	Rede elétrica *	0,00	0,00
	Vias de acesso, barragem, pátios de estocagem *	0,00	0,00
	Captação de água e cisternas *	0,00	0,00
	<b>TOTAL INFRA ESTRUTURA</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

\* Já existe

**8- MANUSEIO DE MINÉRIO E CARREGAMENTO DE PRODUTOS**

1.000 t/mês

250 t/mês

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
1	Caminhão Mercedes Benz *	0,00	0,00
1	Empilhadeira *	0,00	0,00
	<b>TOTAL ÁREA 5</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

\* Já existe

**TOTAL DOS INVESTIMENTOS EM BENEFICIAMENTO**

1.000 t/mês

250 t/mês

<b>ITEM</b>	<b>DESCRIÇÃO BÁSICA</b>	<b>Total R\$</b>	<b>Total R\$</b>
1	Britagem Primária e Secundária	19.000,00	0,00
2	Britagem Terciária	235.900,00	140.000,00
3	Separação magnética	420.500,00	182.000,00
4	Remoagem	281.300,00	138.600,00
5	Expedição	67.000,00	86.000,00
6	Montagem das Plantas	137.500,00	69.500,00
7	Infra-Estrutura	0,00	0,00
8	Manuseio de Minério e Carregamento de Produtos	0,00	0,00
	<b>Total áreas 1 a 7</b>	<b>1.161.200,00</b>	<b>616.100,00</b>

### 7.4.3 Depreciação dos Investimentos

A depreciação dos investimentos e re-investimentos, foi definida em 5 anos para os equipamentos de lavra e apoio e preparação da mina e 10 anos para investimentos pré-operacionais (infra estrutura).

Tabela 7.9 – Depreciação dos investimentos

#### AMORTIZAÇÃO DA LAVRA

		1.000 t/mês	250 t/mês
<b>TOTAL DA AMORTIZAÇÃO/ANO</b>		<b>R\$/ano</b>	<b>R\$/ano</b>
Preparação da mina		2.000,00	0,00
Equipamentos de lavra		53.000,00	0,00
Infra-estrutura		1.800,00	0,00
<b>AMORTIZAÇÃO R\$/ANO</b>			
<b>1 – 5 ANOS</b>		<b>56.800,00</b>	<b>0,00</b>
<b>6 – 10 ANOS</b>		<b>1.800,00</b>	<b>0,00</b>

#### AMORTIZAÇÃO DO BENEFICIAMENTO

		1.000 t/mês	250 t/mês
<b>Anos</b>	<b>TOTAL DA AMORTIZAÇÃO/ANO</b>	<b>R\$/ano</b>	<b>R\$/ano</b>
5	Plantas de beneficiamento – equipamentos	204.740,00	109.320,00
10	Plantas de beneficiamento – montagem	13.750,00	6.950,00
10	Infra-estrutura do beneficiamento	0,00	0,00
5	Equipamentos de manuseio carregamento de produtos	0,00	0,00
<b>AMORTIZAÇÃO R\$/ANO</b>			
<b>1 – 5 ANOS</b>		<b>218.490,00</b>	<b>116.270,00</b>
<b>6 – 10 ANOS</b>		<b>13.750,00</b>	<b>6.950,00</b>

#### AMORTIZAÇÃO TOTAL DOS INVESTIMENTOS

		1.000 t/mês	250 t/mês
<b>1 – 5 ANOS</b>		<b>275.290,00</b>	<b>116.270,00</b>
<b>6 – 10 ANOS</b>		<b>15.550,00</b>	<b>6.950,00</b>

### 7.5 FLUXO DE CAIXA E AVALIAÇÃO DA RENTABILIDADE

Entende-se como fluxo de caixa a diferença entre as entradas e as saídas de caixa associadas a um projeto ou empreendimento, durante um determinado período de tempo. Para efeito da avaliação econômica foram estabelecidos fluxos anuais. Portanto, a composição e o cálculo do fluxo de caixa do projeto, foram realizados para cada ano de vida do projeto e limitados a um período de 20 anos, considerando-se nos primeiros cinco anos a produção de 250 t/ mês do produto Nefelina CS100, e nos demais anos a produção de 1.000 t/ mês deste produto, porém com 70% da capacidade no quinto ano. Normalmente, o fluxo de caixa engloba toda a vida da jazida.

### 7.5.1 Avaliação da Rentabilidade

A avaliação da rentabilidade do empreendimento foi realizada pelo método de análise do fluxo de caixa descontado, do *payback*, do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR), considerando-se os seguintes parâmetros:

- Operação por um período de 20 anos;
- Custos conforme apresentados nas tabelas 7.3 e 7.6;
- Preços de vendas conforme praticados e estimados pela empresa;
- Impostos incidentes sobre o faturamento bruto: ICMS – 12%; COFINS – 3,00%; PIS – 0,65%; CFEM – 2,00% e CPMF – 0,38%, totalizando 18,03%;
- Alíquota de 30% sobre o Lucro Bruto para fins do IRPJ;
- Lucro Bruto igual diferença entre o faturamento e os impostos, custos operacionais e depreciação;
- Taxa mínima de atratividade (TMA) de 12,0% ao ano;
- Investimentos totais conforme definidos nas tabelas 7.7 e 7.8;
- Reinvestimentos em infra-estrutura no ano 10 (equivalente a 25% do investimento inicial), em equipamentos de lavra nos anos 5, 10 e 15 (equivalente a 50% do investimento inicial em cada período);
- Depreciação dos investimentos de cinco anos para os equipamentos de lavra e beneficiamento e preparação da mina e 10 anos para infra-estrutura;
- Valor do capital de giro equivalente a três meses dos custos operacionais.

### 7.5.2 Comentários sobre os Resultados

O fluxo de caixa descontado (em anexo), elaborado para avaliar a rentabilidade do empreendimento, considerou uma produção anual de 4.466 t nos primeiros quatro anos, 12.377 t no quinto ano e 17.681 t do sexto ao vigésimo ano. A produção anual de Nefelina CS 100, para o porcelanato, será de 3.030 t, 8.396 t e 11.995 t respectivamente, correspondente a 68% da produção total desta linha de processo.

Em média o lucro bruto anual obtido no fluxo de caixa foi de R\$ 1.217.516 e o líquido de R\$ 852.261,00.

O fluxo de caixa foi calculado pela diferença entre o faturamento e os custos operacionais, impostos, investimentos e reinvestimentos. Sendo que, para o fluxo de caixa descontado, considerou-se uma taxa mínima de atratividade (TMA), que é a remuneração mínima aceita pelo capital investido, de 12% ao ano.

O valor presente líquido, obtido da soma do fluxo de caixa descontado, que leva em conta o valor temporal do dinheiro para cálculo dos retornos, foi de R\$ 4.304.022,00. A taxa interna de retorno (TIR) obtida no investimento, que é a taxa de desconto que torna nulo o valor presente líquido do investimento, foi de 34,30%, valor bem superior da taxa mínima de atratividade da empresa.

O *payback* do empreendimento, que calcula o tempo necessário à recuperação do investimento, também foi bastante atrativo, ficando em 2 anos e 10 meses.

Os resultados da simulação do fluxo de caixa estão resumidos na tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Resumo da simulação do fluxo de caixa para 20 anos de produção de Nefelina CS100.

Ano	Receita operação R\$	Custo Operação R\$	Investimento e Reinvest. R\$	Depreciação R\$	Imposto R\$	Lucro Líquido R\$	Fluxo de Caixa R\$	Fluxo Caixa Descontado R\$	Somatório Fl.Cx.Desc R\$
0	0	0	616.100	0	0	0	-616.100	-616.100	-616.100
1	811.327	273.602	0	116.270	228.834	192.621	308.891	275.796	-340.304
2	811.327	273.602	0	116.270	228.834	192.621	308.891	246.246	-94.058
3	811.327	273.602	0	116.270	228.834	192.621	308.891	219.863	125.804
4	811.327	273.602	1.454.200	116.270	228.834	192.621	-1.145.309	-727.865	-602.060
5	2.248.483	716.980	132.500	391.560	625.764	514.179	773.239	438.757	-163.303
6	3.212.118	1.024.257	0	308.740	969.138	909.983	1.218.723	617.443	454.140
7	3.212.118	1.024.257	0	308.740	969.138	909.983	1.218.723	551.288	1.005.428
8	3.212.118	1.024.257	0	308.740	969.138	909.983	1.218.723	492.222	1.497.650
9	3.212.118	1.024.257	0	308.740	969.138	909.983	1.218.723	439.484	1.937.134
10	3.212.118	1.024.257	137.000	49.000	1.047.060	1.091.801	1.003.801	323.197	2.260.331
11	3.212.118	1.024.257	0	42.500	1.049.010	1.096.351	1.138.851	327.393	2.587.723
12	3.212.118	1.024.257	0	42.500	1.049.010	1.096.351	1.138.851	292.315	2.880.038
13	3.212.118	1.024.257	0	42.500	1.049.010	1.096.351	1.138.851	260.995	3.141.034
14	3.212.118	1.024.257	0	42.500	1.049.010	1.096.351	1.138.851	233.032	3.374.065
15	3.212.118	1.024.257	132.500	26.950	1.053.675	1.107.236	1.001.686	183.004	3.557.069
16	3.212.118	1.024.257	0	26.950	1.053.675	1.107.236	1.134.186	185.010	3.742.080
17	3.212.118	1.024.257	0	26.950	1.053.675	1.107.236	1.134.186	165.188	3.907.267
18	3.212.118	1.024.257	0	26.950	1.053.675	1.107.236	1.134.186	147.489	4.054.757
19	3.212.118	1.024.257	0	26.950	1.053.675	1.107.236	1.134.186	131.687	4.186.443
20	3.212.118	1.024.257	0	26.950	1.053.675	1.107.236	1.134.186	117.577	4.304.021
Total			2.472.300	2.472.300			17.045.220		

TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE = TMA	%	12,00%
VALOR PRESENTE (CAIXA DESC) = VPL	R\$	4.304.021
TAXA INTERNA DE RETORNO = TIR	%AA	34,30%
"PAYBACK"	ANOS	2,9

## 8. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

A classificação petrográfica da rocha objeto de estudo é aegirina-nefelina-microsienito. Os minerais mostram uma condição inequigranular, com variações abruptas nas dimensões dos grãos da matriz e dos megacristais de minerais máficos.

A composição mineralógica básica da rocha é: feldspato alcalino (46%); feldspatóide (31%); piroxênio (12%); anfibólio (1%); zircão + apatita + titanita + minerais opacos (1%); cancrinita (4%); argilominerais (4%); zeólitas + epidoto + biotita (1%).

A composição química dos 10 óxidos básicos da rocha é: SiO<sub>2</sub> (57,3%); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (22,7%); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,0%); TiO<sub>2</sub> (0,2%); MgO (0,12%); MnO (0,3%); Na<sub>2</sub>O (10,4%); K<sub>2</sub>O (5,2%); CaO (0,5%); P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,02%); PF (1,2%).

Conforme os resultados da caracterização tecnológica, observou-se que quanto menor a fração granulométrica, maior a seletividade (teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na fração pesada), e maior o percentual da massa da fração pesada em relação a leve, indicando um crescente aumento do grau de liberação.

Considerando que o teor máximo de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aceitável na indústria de porcelanato é 0,65%, de acordo com os resultados da separação magnética a seco, a faixa granulométrica que estaria dentro destas condições fica entre -1,0 e +0,15 mm.

Os ensaios de flotação indicaram a importância de se implementar o circuito *scavenger* no processo. O teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> baixa consideravelmente no concentrado do *scavenger* (0,71% contra 1,8% do concentrado do *rougher*), para o material -0,25. Entretanto, nesta fração se obteve a menor recuperação de massa de concentrado final (*scavenger*) e o maior teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, se comparada com a fração -0,25 mm. Como o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em ambas as frações está acima do limite exigido pela indústria de porcelanato, seria necessário otimizar o processo de flotação para a mesma ou associá-la a outro processo, no caso a separação magnética.

Os ensaios de separação magnética a úmido ficaram acima do valor limite para uso no porcelanato, exceto aqueles submetidos previamente a flotação que apresentaram resultados bem superiores. O teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da fração -0,15 mm chega a 0,43%. Entretanto, foi recuperada apenas 55% da massa original submetida ao processo e, incluindo a perda mássica na flotação, este valor cai para 22,8%. A empresa terá que

analisar a relação custo/benefício para definir a viabilidade desta operação. Naturalmente, o processo poderá ser otimizado para aumentar a recuperação de massa não magnética.

Os ensaios de colorimetria serviram para comprovar os resultados dos ensaios de beneficiamento. O aumento da alvura está associado à retirada dos minerais máficos. Na separação magnética a seco, as alvuras dos materiais dos repasses foram maiores do que o material do passe. Na flotação, os dados colorimétricos demonstraram a eficácia do circuito *scavenger*, com um aumento considerável de alvura do concentrado deste circuito em relação ao concentrado do *rougher*, nas duas frações estudadas (-0,25 mm e -0,15 mm). Na separação magnética a úmido, os ensaios de colorimetria demonstraram a importância de submeter à amostra inicialmente ao processo de flotação. Porém, deve-se ter cautela ao comparar alvuras entre ensaios com diferentes frações granulométricas, (mesmo considerando-se que as amostras foram pulverizadas para o ensaio colorimétrico), devido as discrepâncias observadas nos resultados em relação aos teores de ferro.

Os resultados dos ensaios de beneficiamento atestaram a separação magnética a seco como o processo mais indicado para implantação na empresa. Esta decisão se baseou em critérios técnicos e econômicos, como teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e alvura compatíveis com as exigências do mercado, boa recuperação mássica do processo, como também menor custo de beneficiamento para o processo via seca.

A fração granulométrica da separação magnética a seco foi definida entre 1,0 e 0,25 mm. O limite inferior da faixa granulométrica passou de 0,15 mm para 0,25 mm permitindo utilizar os finos (-0,25 mm) em um dos materiais produzidos pela empresa, denominado Nefelina 60. Os outros subprodutos provenientes da separação magnética irão compor um outro produto, denominado Fonolito 18 (-1,0 mm). Todos estes subprodutos representam 32% da massa beneficiada. Portanto, no final tem-se 68% da massa, beneficiada para o porcelanato.

Para inserir esta nova linha de produção na unidade de beneficiamento, buscou-se obter menor custo de investimento possível, aproveitando integrá-la ao máximo no processo, utilizando os mesmos equipamentos nas etapas passíveis de serem compartilhadas. O mesmo critério foi empregado na utilização do quadro operacional, contribuindo para reduzir os custos fixos.

Neste contexto, como a empresa dispõe de um separador magnético industrial ReRoll de rolo simples, estabeleceu-se para a separação magnética efetuar somente o passe, sem o repasse, evitando-se uma redução drástica em sua capacidade produtiva.

Os investimentos levantados e os custos envolvidos contemplaram uma escala de produção de 250 t/ mês para o curto prazo e de 1.000 t /mês para o médio e longo prazo, baseados em estudos de mercado para este produto. Estes investimentos, assim como os custos, são referentes exclusivamente à produção deste insumo e seus subprodutos, não considerando a empresa como um todo.

Para definir o regime operacional (tabela 6.1) e mão de obra (tabela 6.2) de cada unidade produtiva para obter a produção mensal requerida, elaborou-se um fluxograma do processo (figura 6.1) incluindo a capacidade produtiva horária de cada unidade operacional e calculou-se a produção real baseada na eficiência operacional de cada unidade produtiva.

O preço de venda estabelecido para comercializar o produto para a linha de porcelanato, denominado em Nefelina CS 100, foi definido em R\$ 224,00 a tonelada. O preço médio de venda, incluindo os subprodutos Nefelina 60 e Fonolito 18, considerando a proporção de 68%, 12% e 20% respectivamente, foi estimado em R\$ 181,67/ t. Os custos operacionais para 250 t/ mês e 1.000 t /mês são R\$ 61,26/ t e R\$ 57,93/ t respectivamente.

Os investimentos realizados para produzir 250 t/ mês foram de R\$ 116.270,00 e para atingir a produção de 1.000 t/ mês, R\$ 275.290,00.

O fluxo de caixa descontado elaborado para avaliar a rentabilidade do empreendimento, considerou uma produção anual de 4.466 t nos primeiros quatro anos, 12.377 t no quinto ano e 17.681 t do sexto ao vigésimo ano. A produção de Nefelina CS 100, para o porcelanato, corresponde a 3.030 t, 8.396 t e 11.995 t respectivamente, correspondendo a 68% da produção total.

O lucro bruto médio anual foi de R\$ 1.217.516, 00 e o lucro líquido R\$ 852.261,00.

O valor presente líquido (VPL) calculado foi de R\$ 4.304.022,00, a taxa interna de retorno (TIR) foi 34,30% e o *payback* do empreendimento ficou em dois anos e dez meses.

De um modo geral os valores da TIR e *payback* na situação simulada se mostraram bastante promissores em se tratando de processos de mineração.

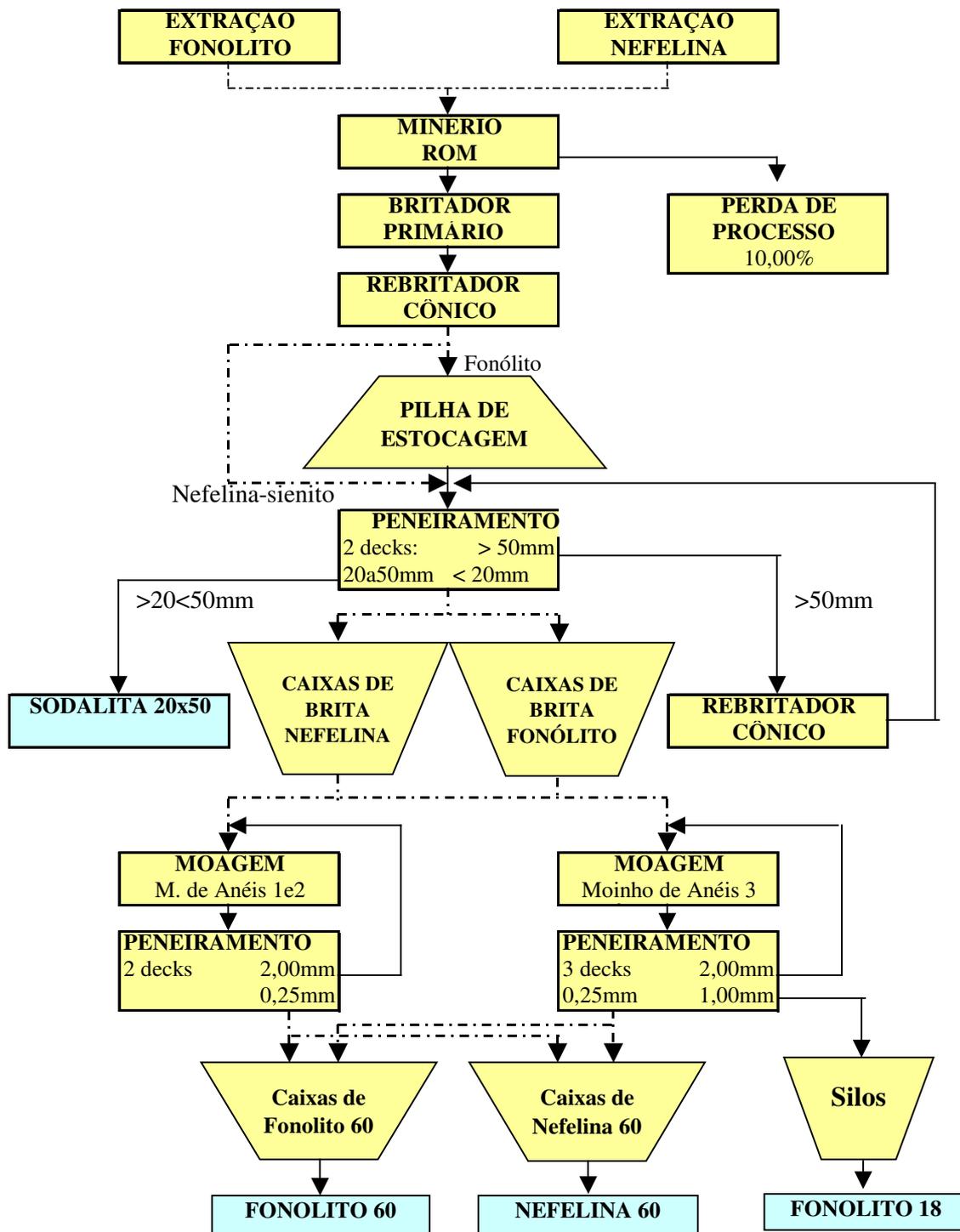
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BERALDO, J.L., Flotação; Escola Politécnica da USP; 1987.
- CASTLE, J.E., GILLSON, J.L., Feldspar, Nepheline Syenite and Aplite. Industrial Minerals and Rocks, New York; The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, chap. 16, p. 339-362, 1960.
- DANA, J. D., Manual de Mineralogia. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro; V2, pp.551, 1995.
- DELBONI, JR., H., Metodologia para Determinação de Parâmetros Magnéticos. Tecnologia Mineral – ABNT; V1, P1, pp.46-61, 1992.
- GUILLET, R.G., Nepheline Syenite. Industrial Minerals and Rocks, 6.ed. Colorado: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 1994.
- HARBEN, P.W., The Industrial Minerals Handybook II: A Guide to Market, Specifications & Prices, 2<sup>th</sup> edition; pp 114-116, 1995.
- HEWITT, D.F., Nepheline Syenite Deposits of Southern Ontario. Ontario Department of Mines, V49, pp 194, 1980.
- KLEIN, C., HURLBUT, C.S., Manual of Mineralogy, John Willer & Sons, Inc. 21 edition, 1995.
- LAWVER, E.J., HOPSTOK, D. M., Eletrostatic and Magnetic Separation, In: WEISS. N.L (ed) SME Mineral Processing Handbook. Society of Mining Engineers, p.6.1- 6.48, 1985.
- LEPREVOST, A., Química Analítica dos Minerais; Universidade Federal do Paraná; pp 345, 1975.
- LUZ, Adão B. *et all*, Tratamento de Minérios. CETEM/CNPQ, Rio de Janeiro, 1995.
- MAC GREGOR, D.D., Geology, Mining and Processing of Nepheline Syenite Proceedings; 19<sup>th</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals, S.E. Yundt, ed.; Miscellaneous Paper 114, Ontario Geological Survey, pp 49-53, 1983.
- MOREIRA, M.D., Aplicações dos Minerais e Rochas Industriais. Salvador, Bahia, Sociedade Brasileira de Geologia, pp86, 1984.
- MOTTA, J.F.M., O Brasil e as Matérias Primas para o Grês Porcelanato, Revista Pólo Cerâmico; pp 4, julho/2000.

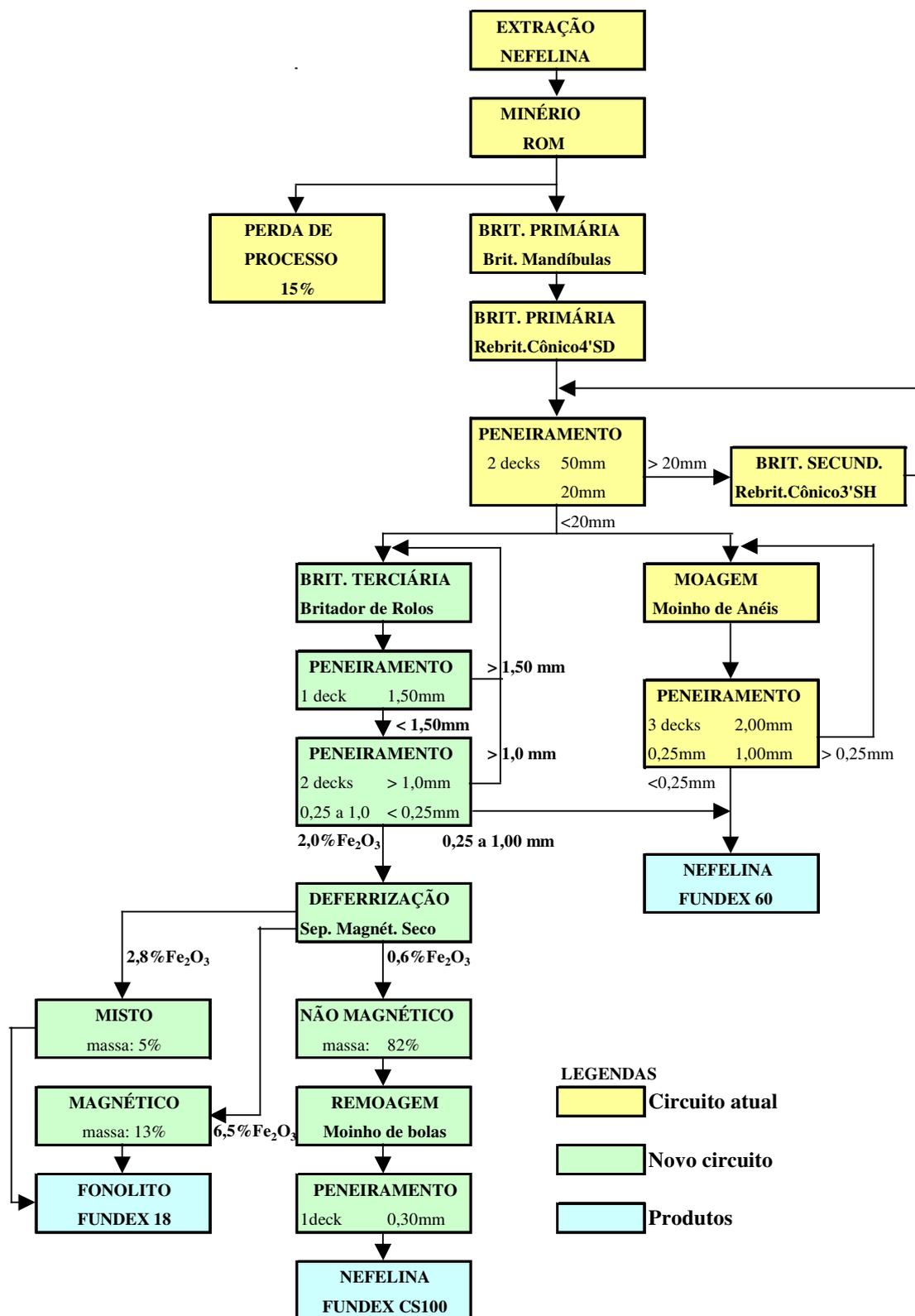
- MUSSOLIN, S., Caracterização e Controle do Defeito Ocasionado pelo Uso do Fnlóito em Massas Cerâmicas Grês, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina; pp 22, 1996.
- MUSSOLIN, S., DONEDA, C., VITÓRIO, C., ALARCON, O., Caracterização do Fonólito Utilizado na Formulação de Pavimentos Cerâmicos, Cerâmica Industrial - ABC; vol 1 –nº2, 1996.
- ROGERS, C.P., and NEAL, J.P; Feldspars; Industrial Minerals and Rocks; 5<sup>th</sup> edition; V1-pp 709-722, 1983.
- SAMPAIO J.A, LUZ A.B, LINS F.F, Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. CETEM/MCT, p. 116-125, Rio de Janeiro, 2001.
- TAYLOR, J.R., BULL, A.C., Ceramic Glaze Technology. Oxford Press, Londres, 1986.
- WILLIAMSON, W.O., Feldspathic or Feldspathoidal Fluxes and their Beneficiation. Ceramic Monograph 1.2.3 – Handbook of Ceramics. Alemanha, 1980.
- WORRAL, W.E., Ceramic Raw Materials. Pergamon Press, 2<sup>a</sup> edition. Reino Unido, 1982.

**ANEXOS**

**A N E X O 1**  
**FLUXOGRAMA DE PROCESSO DO FONOLITO E NEFELINA-SIENITO**



**ANEXO 2**  
**FLUXOGRAMA DE PROCESSO DA NEFELINA SIENITO**



Ítem	ano	%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Produtos	(t/ano)	17.681	100,00		4.466	4.466	4.466	4.466	12.377	17.681	17.681	17.681	17.681
Nefelina Fundex CS100		11.995	67,84		3.030	3.030	3.030	3.030	8.396	11.995	11.995	11.995	11.995
Nefelina Fundex 60		2.132	12,06		539	539	539	539	1.493	2.132	2.132	2.132	2.132
Fonolito Fundex 18		3.554	20,10		898	898	898	898	2.488	3.554	3.554	3.554	3.554
Faturamento (R\$/ano) = Fa	R\$/t.	100,00		811.327	811.327	811.327	811.327	2.248.483	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118
Nefelina Fundex CS100		224,00	83,65	678.649	678.649	678.649	678.649	1.880.784	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835
Nefelina Fundex 60		98,00	6,51	52.784	52.784	52.784	52.784	146.283	208.976	208.976	208.976	208.976	208.976
Fonolito Fundex 18		89,00	9,85	79.894	79.894	79.894	79.894	221.415	316.307	316.307	316.307	316.307	316.307
Impostos Totais = Ip		18,03%		146.282	146.282	146.282	146.282	405.401	579.145	579.145	579.145	579.145	579.145
ICMS		12,00%		97.359	97.359	97.359	97.359	269.818	385.454	385.454	385.454	385.454	385.454
COFINS		3,00%		24.340	24.340	24.340	24.340	67.454	96.364	96.364	96.364	96.364	96.364
PIS		0,85%		5.274	5.274	5.274	5.274	14.615	20.879	20.879	20.879	20.879	20.879
CFEM		2,00%		16.227	16.227	16.227	16.227	44.970	64.242	64.242	64.242	64.242	64.242
CPMF		0,38%		3.083	3.083	3.083	3.083	8.544	12.206	12.206	12.206	12.206	12.206
Custos Operacionais (R\$/ano) = Co				273.602	273.602	273.602	273.602	716.980	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257
Investimentos (R\$/ano) = In		2.070.300		616.100			1.454.200						
Depreciação Investimento = Di		103.515	R\$/ano		116.270	116.270	116.270	116.270	391.560	282.240	282.240	282.240	22.500
Reinvestimentos (R\$/ano) = Ri		402.000						132.500					137.000
Depreciação Reinvestim.=Dr		20.100							26.500	26.500	26.500	26.500	26.500
Lucro Bruto Anual=Lb=(Fa-Ip-Co-Di-Dr)		1.217.516	R\$/ano		275.173	275.173	275.173	275.173	734.542	1.299.976	1.299.976	1.299.976	1.559.716
IRPJ = Ir		30%	R\$/ano		82.552	82.552	82.552	82.552	220.362	389.993	389.993	389.993	467.915
Lucro Líquido Anual = Li = (Lb - Ir)		852.261	R\$/ano		192.621	192.621	192.621	192.621	514.179	909.984	909.984	909.984	1.091.802
Fluxo Caixa = Cx = (Fa-Ip-Co-In-Ri-Dr)			R\$/ano	-616.100	308.891	308.891	308.891	-1.145.309	773.239	1.218.724	1.218.724	1.218.724	1.003.802
Capital de giro = Cg			3 meses		68.401			110.844	76.819				
Taxa de atualização = i (%/ano)		12,00%			1,120	1,254	1,405	1,574	1,762	1,974	2,211	2,476	2,773
Fluxo Caixa Desc.=Cd = (Cx/i)				-616.100	275.796	246.246	219.863	-727.865	438.757	617.443	551.289	492.222	439.484
Fluxo Caixa Acum. Desc.=Ca				-616.100	-340.304	-94.058	125.804	-602.060	-163.304	454.140	1.005.428	1.497.650	1.937.134
Valor Presente (Inv. e caixa) = VP	R\$		4.304.022										
Taxa Interna de Retorno = TIR	%		34,30%	-616.100	275.796	246.246	219.863	-727.865	438.757	617.443	551.289	492.222	439.484
"Pay Back"	anos		2,90										

Ítem\ano	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Produtos	(t/ano)	17.681	17.681	17.681	17.681	17.681	17.681	17.681	17.681	17.681
Nefelina Fundex CS100		11.995	11.995	11.995	11.995	11.995	11.995	11.995	11.995	11.995
Nefelina Fundex 60		2.132	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132	2.132
Fonolito Fundex 18		3.554	3.554	3.554	3.554	3.554	3.554	3.554	3.554	3.554
Faturamento (R\$/ano) = Fa		3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118	3.212.118
Nefelina Fundex CS100		2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835	2.686.835
Nefelina Fundex 60		208.976	208.976	208.976	208.976	208.976	208.976	208.976	208.976	208.976
Fonolito Fundex 18		316.307	316.307	316.307	316.307	316.307	316.307	316.307	316.307	316.307
Impostos e Royalties Totais		579.145	579.145	579.145	579.145	579.145	579.145	579.145	579.145	579.145
ICMS		385.454	385.454	385.454	385.454	385.454	385.454	385.454	385.454	385.454
COFINS		96.364	96.364	96.364	96.364	96.364	96.364	96.364	96.364	96.364
PIS		20.879	20.879	20.879	20.879	20.879	20.879	20.879	20.879	20.879
CFEM		64.242	64.242	64.242	64.242	64.242	64.242	64.242	64.242	64.242
CPMF		12.206	12.206	12.206	12.206	12.206	12.206	12.206	12.206	12.206
Custos Operacionais		1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257	1.024.257
Investimentos (R\$/ano) = In										
Depreciação Investimento = Di		15.550	15.550	15.550	15.550	0	0	0	0	0
Reinvestimentos (R\$/ano) = Ri					132.500					
Depreciação Reinvestim.=Dr		26.950	26.950	26.950	26.950	26.950	26.950	26.950	26.950	26.950
Lucro Bruto Anual		1.566.216	1.566.216	1.566.216	1.566.216	1.581.766	1.581.766	1.581.766	1.581.766	1.581.766
IRPJ		469.865	469.865	469.865	469.865	474.530	474.530	474.530	474.530	474.530
Lucro Líquido Anual		1.096.352	1.096.352	1.096.352	1.096.352	1.107.237	1.107.237	1.107.237	1.107.237	1.107.237
Fluxo de Caixa		1.138.852	1.138.852	1.138.852	1.138.852	1.001.687	1.134.187	1.134.187	1.134.187	1.134.187
Capital de giro										
Taxa de juros (%)		3,479	3,896	4,363	4,887	5,474	6,130	6,866	7,690	8,613
Fluxo de Caixa Descontado		327.393	292.315	260.995	233.032	183.004	185.010	165.188	147.489	131.687
Fluxo de Caixa Acum. Descontado		2.587.724	2.880.039	3.141.034	3.374.066	3.557.070	3.742.081	3.907.268	4.054.758	4.186.444
Para cálculo do Valor Presente										
Para cálculo da TIR		327.393	292.315	260.995	233.032	183.004	185.010	165.188	147.489	131.687