



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**REDIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UMA UNIDADE DE
BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO PEGMATÍTICO NO MUNICÍPIO DE
PEDRA LAVRADA/PB COM ÊNFASE NAS ETAPAS DE BRITAGEM E
MOAGEM**

GERSON FERREIRA DA SILVA

Campina Grande – Paraíba
2019

GERSON FERREIRA DA SILVA

**REDIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UMA UNIDADE DE
BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO PEGMATÍTICO NO MUNICÍPIO DE
PEDRA LAVRADA/PB COM ÊNFASE NAS ETAPAS DE BRITAGEM E
MOAGEM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Viera

Linha de Pesquisa: Beneficiamento Mineral

Campina Grande – Paraíba

2019

S586r

Silva, Gerson Ferreira da.

Redimensionamento e otimização de uma unidade de beneficiamento de feldspato pegmatítico no município de Pedra Lavrada/PB com ênfase nas etapas de britagem e moagem / Gerson Ferreira da Silva. – Campina Grande, 2019.

92 f.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Viera".

Referências.

1. Mineralogia. 2. Beneficiamento Mineral. 3. Britagem e Moagem. 4. Pegmatitos. 5. Feldspato. I. Viera, Elbert Valdiviezo. II. Título.

CDU 549(043)

GERSON FERREIRA DA SILVA

**REDIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE UMA UNIDADE DE
BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO PEGMATÍTICO NO MUNICÍPIO DE
PEDRA LAVRADA/PB COM ÊNFASE NAS ETAPAS DE BRITAGEM E
MOAGEM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Viera
Orientador

Prof. Dr^a Claudia Maria de Oliveira Raposo
Examinadora

Prof. Dr^a Adriana Lemos Porto
Examinadora

Campina Grande – Paraíba
2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e heróis, José Lopes da Silva e Maria Ferreira da Silva. A minha esposa, Kivânia de B. A. Ferreira pelo carinho e amor, e as minhas filhas Gabriela Alves Ferreira e Beatriz Alves Ferreira, razão do meu viver.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer sinceramente a todas as pessoas que contribuíram direto e indiretamente para realização deste trabalho.

Inicialmente agradeço a Deus, por toda orientação e discernimento durante a pesquisa.

A toda minha família, em especial aos meus pais, José Lopes da Silva e Maria Ferreira da Silva que sempre me incentivaram a estudar.

A minha querida esposa, Kivânia de Brito Alves Ferreira por todo apoio e conforto nos momentos difíceis, e por mais uma grande conquista em nossas vidas.

A minha filha Gabriela, que mesmo sem saber sempre foi minha fonte de força e superação para ultrapassar obstáculos e obter conquistas.

A minha princesa Beatriz, com seus beijos e abraços dando sentido a minha vida.

Aos amigos, o Engenheiro de Minas Claudio e o técnico em mineração Ramilson pela visita ao Garimpo Alto Serra Branca e a Mineração Florentino.

Ao meu orientador Prof. Dr. Elbert Valdiviezo Vieira por sua orientação, dedicação, e a oportunidade de termos trabalhados juntos, acreditando em mim para realização desta pesquisa.

Ao laboratório de Cominuição do IFPB campus Campina Grande pelo espaço cedido para realização dos ensaios desta pesquisa, aos professores Wandenberg, Gonzaga, Adriana, e aos técnicos Renan e Adriano.

Ao Departamento de Mineração e Geologia da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, pela oportunidade e disponibilização da estrutura para elaboração deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa para realização da pesquisa.

A cooperativa COMIPEL da cidade de Pedra Lavrada/PB pelas informações cedidas da unidade de beneficiamento.

RESUMO

A busca por eficiência, melhoramento, e um dimensionamento adequado dos equipamentos que envolvem o processo de cominuição, tem levado inúmeros estudiosos, e empresas a estudarem a matéria prima, as técnicas, e os processos de beneficiamento dos minerais pegmatíticos, visando a sua aplicação na indústria de forma otimizada. Para realização desta pesquisa, a amostra de minério, e de feldspato albita, foram coletadas no garimpo Alto Serra Branca, e em seguida executado os ensaios tecnológicos, e de beneficiamento em escala de laboratório. Essas amostras foram identificadas, e preparadas em granulometria de 200 malhas, e posteriormente conduzida aos ensaios físicos, caracterização mineralógica, e análises térmicas. Na realização dos ensaios de beneficiamento em escala laboratorial teve-se a necessidade de fazer uma britagem primária e secundária para reduzir a uma determinada granulometria que atendesse as especificações da alimentação da moagem. A amostra de feldspato albita foi fragmentada inicialmente a uma granulometria abaixo de 25 mm, e na britagem secundária através do britador de mandíbulas, reduzida a tamanhos menores que 5 mm. Na etapa de moagem foi usado um moinho de porcelana, devido à preocupação de não ocorrer contaminação com ferro. O tempo de moagem empregado para cada ensaio foi no intervalo de 10 min, e foram feitos em 10, 20, 30, 40, 50, e 60 min. No dimensionamento dos equipamentos da COOMIPEL foi empregado o método desenvolvido pelo fabricante Metso, que é feito com auxílio de curvas e tabelas de operação, em conjunto com o critério de Taggart, e a equação de Bond. Os resultados dos ensaios físicos, e de caracterização, confirma que se trata de feldspato Albita. Quanto as informações dos ensaios em laboratório de beneficiamento foram promissoras, onde se obteve 25% da granulometria almejada, a partir do material da alimentação. Em relação ao redimensionamento, a aplicação do método do fabricante, possibilitou sugerir uma alteração na configuração do fluxograma do circuito de cominuição da COOMIPEL.

Palavras-chave: Pegmatitos, feldspato, fluxograma, redimensionamento, Coomipel.

ABSTRACT

The searching for efficiency, improving and an appropriate sizing of the equipment of the phases that involves the comminution process, has taken countless scholars and large and small mining companies to study the raw material, and the beneficiation process of the pegmatitic minerals, aiming its application in the industry optimally. To carry out this research, the mineral sample and feldspar albite, both from pegmatitic province of Borborema, especially of the Garimpo Alto Serra Branca were collected to the execution of technological tests and laboratory scale processing. These samples were identified and prepared in granulometry of 200 meshes, and then conducted to the physical tests, mineralogical characterization and thermal analysis. In performing the processing trials, there was a need to do a primary and secondary crushing to achieve a certain particle size meet the specifications to feed the mill. The feldspar albite sample was reduced initially to a granulometry below 25mm. In secondary crushing, the jaw crusher was used to reduce the particle size of the sample to values less than 5 mm. In the milling phase was used a porcelain mill due to the concern of non-contamination with iron. The milling time used to each test was in the range of 10 minutes and were made in 10, 20, 30, 40, 50, 60 min. In the sizing of the COOMIPEL equipment was used the method developed by the Metso manufacturer, that is made with the help of curves and operation tables together with the Taggart criterion and the Bond's equation. The results of the physical tests and characterization showed that it is feldspar Albite. As far as the information of the tests in the beneficiation laboratory was promising, where we had 25% of the granulometry we longed for from the feed material. In relation to resizing, the application of the manufacturer made possible to suggest an alteration configuration flow chart of the COOMIPEL Comminution circuit.

Key words: Pegmatites, feldspar, flow chart, resizing, coomipel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área pegmatítica nos Estados do RN e PB.....	6
Figura 2 – Classificação estrutural dos pegmatitos conforme Johnston & Rolff.....	8
Figura 3 – Pegmatito Alto Serra Branca-PB.....	18
Figura 4 – Equipamentos usados na lavra de pegmatitos no Alto da Serra Branca-PB..	18
Figura 5 – Britador de mandíbulas da COOMIPEL.....	19
Figura 6 – Moinho de bolas da COOMIPEL.....	20
Figura 7 – Britador de martelos e peneira da COOMIPEL.....	20
Figura 8 – Fluxograma do circuito de beneficiamento da cooperativa COOMIPEL.....	21
Figura 9 – Esquema de um moinho rotativo.....	24
Figura 10 – Trajetória percorrida pelos corpos moedores.....	24
Figura 11 – Regimes de catarata e cascata, respectivamente.....	25
Figura 12 – Mapa de localização da área pegmatítica nos Estados do RN e PB.....	27
Figura 13 – Frente de lavra no pegmatito Alto Serra Branca.....	27
Figura 14 – Amostras de feldspato albíta.....	28
Figura 15 – Pulverizador usado na preparação de material para análise química.....	29
Figura 16 – Material após moagem para peneiramento.....	30
Figura 17 – Peneiramento sob água corrente.....	30
Figura 18 – Amostra em estufa para secagem.....	31
Figura 19 – Amostra em proveta.....	31
Figura 20 – Pesagem da amostra.....	32
Figura 21 – Molde do cone.....	32
Figura 22 – Cone no forno mufla.....	33
Figura 23 – Moldagem da pastilha.....	33
Figura 24 – Prensagem da pastilha.....	34
Figura 25 – Pastilha de albíta após queima.....	34
Figura 26 – Difratorômetro de Raios-X.....	35
Figura 27 – EDX 720 da Shimadzu.....	36
Figura 28 – Fragmentação primária em um equipamento de corte.....	37
Figura 29 – Britagem secundária efetuada em britador de mandíbulas.....	37
Figura 30 – Material após britagem secundária.....	38

Figura 31 – Homogeneização da amostra.....	38
Figura 32 – Quarteamento.....	39
Figura 33 – Moinho de bolas.....	39
Figura 34 – Jarra de porcelana com carga de corpos moedores e material a ser moído...	40
Figura 35 – Disposição das peneiras da série de Tyler sob o rotap.....	41
Figura 36 – Curvas granulométricas para britadores e rebitadores.....	43
Figura 37 – Capacidade básica para material com densidade aparente de 1.600kg/m ³ ...	46
Figura 38 – Espessura do leito para uma velocidade de fluxo de 18,29 m.s ⁻¹	48
Figura 39 – Corpo de prova (cone) antes da queima em forno mufla.....	56
Figura 40 – Amostra de albita após queima.....	57
Figura 41 – Pastilha de albita antes e após a queima.....	58
Figura 42 – Difratoograma da amostra albita A.....	59
Figura 43 – Difratoograma da amostra albita B.....	60
Figura 44 – Curvas de análises termogravimétrica e térmica diferencial.....	61
Figura 45 – Curva granulométrica do material britado a – 5,0 mm.....	62
Figura 46 – Porcentagem do passante (200 malhas) em função do tempo de moagem...	66
Figura 47 – Curvas granulométricas dos ensaios de moagem em 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min.....	67
Figura 48 – Curvas granulométricas para diversos valores de APF de britadores primários.....	69
Figura 49 – Curvas granulométricas para diversos valores de APF de britadores primários	73
Figura 50 – Esquema da peneira vibratória. Vazão de alimentação: 8,0 t.h ⁻¹ de material, densidade aparente de 1.600 kg.m ⁻³	75
Figura 51 – Fluxograma atual do circuito de beneficiamento de albita na COOMIPEL.....	82
Figura 52 – Fluxograma do circuito proposto e recomendado para o beneficiamento de albita na COOMIPEL.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características gerais dos feldspatos alcalinos.....	11
Tabela 2 – Série dos feldspatos plagioclásios.....	12
Tabela 3 – Características gerais dos plagioclásios.....	12
Tabela 4 – Composição química para feldspatos comerciais beneficiados.....	13
Tabela 5 – Principais especificações para uso industrial de feldspato beneficiado.....	14
Tabela 6 – Composição química de feldspato para a indústria de vidro.....	15
Tabela 7 – Composição química de feldspato para fabricação de alguns tipos de vidro...	16
Tabela 8 – Composição química de feldspatos dos pegmatitos da Carolina do Norte....	16
Tabela 9 – Principais tipos de britadores e suas características.....	22
Tabela 10 – Resumo das etapas e ensaios realizados neste trabalho.....	26
Tabela 11 – Especificações técnicas de britadores de mandíbulas.....	42
Tabela 12 – Capacidade em $t.h^{-1}$ (para material com densidade aparente de $1,6 t.m^{-3}$)	43
Tabela 13 – Fatores de finos (F) e de eficiência do peneiramento (E)	47
Tabela 14 – Fatores de abertura.....	47
Tabela 15 – Fatores de decks.....	48
Tabela 16 – Tamanho máximo de alimentação de telas e placas da peneira vibratória inclinada M.....	49
Tabela 17 – WI kwh/t curta médios de alguns minerais e minérios.....	50
Tabela 18 – Fator de ineficiência em circuito aberto.....	50
Tabela 19 – Fator de eficiência do diâmetro do moinho.....	51
Tabela 20 – Características de moinho de bolas.....	52
Tabela 21 – Valores de K para diversos tipos de moinho e tipos de moagem.....	53
Tabela 22 – Carga inicial de bolas (% peso)	54
Tabela 23 – Especificações da % de retenção exigidas pelas indústrias de vidro e cerâmica.....	55
Tabela 24 – Distribuição granulométrica do ensaio de retenção.....	55
Tabela 25 – Identificação da amostra e caracterização realizada.....	59
Tabela 26 – Composição química da amostra albíta A.....	60
Tabela 27 – Distribuição granulométrica do material britado a – 5,0 mm.....	62

Tabela 28 – Descrição dos parâmetros empregados nos ensaios de moagem.....	63
Tabela 29 – Distribuição granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 10 min....	64
Tabela 30 – Distribuição granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 20 min....	64
Tabela 31 – Distribuição granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 30 min....	64
Tabela 32 – Distribuição granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 40 min....	65
Tabela 33 – Distribuição granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 50 min....	65
Tabela 34 – Distribuição granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 60 min....	65
Tabela 35 – Dados operacionais coletados do moinho de bolas da COOMIPEL.....	67
Tabela 36 – Dados coletados referentes à moagem na COOMIPEL.....	67
Tabela 37 – Distribuição granulométrica do britador primário (APF =20 mm)	70
Tabela 38 – Distribuição granulométrica do rebitador (APF=6 mm)	74
Tabela 39 – Porcentagem passante x granulometria do material que irá alimentar a peneira.....	76
Tabela 40 – Especificações técnicas para peneira vibratória inclinada MS.....	77
Tabela 41 – Espessura máxima do leito em função da densidade do material.....	78
Tabela 42 – Características do moinho de bolas de seixos selecionado.....	80
Tabela 43 – Características atuais do moinho de bolas da COOMIPEL.....	80
Tabela 44 – Tamanho das bolas do moinho e a relação L/D.....	82
Tabela 45 – Tamanho e porcentagens das bolas recomendadas para o moinho.....	82

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

A₀ – Alimentação

A – Área total da tela

a – percentagem de material na alimentação menor que a abertura considerada

Ab – Albita

An – Anortita

ATBIAV – Associação Brasileira das Indústrias do Vidro

ATG – Análise Termogravimétrica

B – Fator de abertura

B_{máx} – diâmetro máximo das bolas

C – Capacidade básica

°C – Grau Célsius

cm – centímetro

COOMIPEL – Cooperativa de Mineradores de Pedra Lavrada

d – densidade aparente do material

D₀ – Fator de deck

D – Diâmetro interno ao revestimento da carcaça do moinho

DRX – Difração de Raios X

DTA – Análise Térmica Diferencial

E₀ – Fator de Eficiência

E – Energia necessária para moagem de uma ton curta de material

F₀ – Fator de finos

F – Granulometria da alimentação no qual 80% passa numa determinada peneira de referência

F_m – Fatores modificadores

FRX – Fluorescência de raios X por Energia Dispersiva

g – gramas

IFPB – Instituto Federal da Paraíba

K – Fator que depende do tipo de moagem

kg – Kilogramas

kV – Kilovolts

M – Massa

mA – miliamperes

min – minutos

ml – mililitros

mm – milímetro

\leq – Menor igual

\geq – Maior igual

P₀ – Granulometria do produto no qual 80% passa numa determinada peneira de referência

p – passante

PPB – Província Pegmatítica da Borborema

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande-Pb

V – Volume

WI – Índice de trabalho

µm – micrômetros

ρ – massa específica do minério

%V_c – Velocidade de operação do moinho; % da velocidade crítica

2Ø – Ângulo de incidência

LISTA DE EQUAÇÕES

$$A = \frac{S}{C d F m} - \text{Área total da tela}$$

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho W i}{\% V c \sqrt{D}}} - \text{Diâmetro máximo das bolas}$$

$$C = \frac{\text{Fator de serviço} \times \text{vazão de alimentação}}{\text{Densidade aparente}} - \text{Capacidade}$$

$$D = M/V - \text{Densidade}$$

$$d = \frac{\text{peso específico aparente do material}}{1.602} - \text{densidade aparente do material}$$

$$E = \frac{P}{aA} \times 100 - \text{Fator de eficiência}$$

$$E = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) - \text{Energia necessária para moagem de uma ton curta de material}$$

$$EF_4 = \frac{Rr + (WI - 7) \left(\frac{F - F_0}{F_0} \right)}{Rr} - \text{Fator que corrige a granulometria de alimentação com tamanho excessivo}$$

$$EF_5 = \frac{P + 10,3}{1,145 \times P} - \text{Fator que corrige a energia adicional para moagens extremamente finas}$$

$$EF_7 = \frac{Rr - 1,22}{Rr - 1,35} - \text{Fator que corrige a Relação de redução no moinho de bola}$$

$$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{WI}} - \text{tamanho ótimo da alimentação para moinhos de bolas}$$

$$\text{Gape} = \frac{\text{tamanho da maior partícula da alimentação}}{0,8 \text{ a } 0,85} - \text{Condição de recepção}$$

$$nc = 42,3 \sqrt{D} - \text{velocidade crítica}$$

$$PF = (Paq - Pdq/Paq) \times 100 - \text{Perda ao Fogo}$$

$$X = \frac{\text{vazão em t/h}}{(\text{gape em polegadas})^2} - \text{Critério de Taggart}$$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Pegmatitos.....	4
3.1.1 Definição.....	4
3.1.2 Classificação.....	4
3.2 Província Pegmatítica da Borborema.....	5
3.2.1 Aspectos Gerais.....	5
3.2.2 Classificação dos Pegmatitos.....	7
3.2.3 Mineralogia dos Pegmatitos da Borborema.....	8
3.3 Feldspato.....	9
3.3.1 Mineralogia dos Feldspatos.....	10
3.3.2 Feldspato Potássico.....	10
3.3.3 Feldspato Sódico-Cálcico.....	11
3.4 Usos e Aplicações na Indústria.....	13
3.4.1 Especificações Comerciais de Feldspato.....	13
3.4.2 Feldspato para Indústria Vidreira.....	15
3.4.2.1 Aplicações.....	15
3.4.2.2 Especificações do Feldspato para Indústria Vidreira.....	15
3.5 Lavra e Beneficiamento de Feldspato.....	16
3.6 Aspectos Teóricos da Cominuição.....	21
3.6.1 Equipamentos de Britagem.....	22
3.6.2 Equipamentos de Moagem.....	23
3.6.3 Moinhos Cilíndricos ou Rotativos.....	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4.1 Coleta de Amostras.....	27
4.2 Preparação de Amostras.....	28
4.3 Ensaio Físicos.....	29
4.3.1 Ensaio de Retenção.....	30
4.3.2 Ensaio de Densidade.....	31
4.3.3 Ensaio de Cone de Fusão.....	32

4.3.3. Ensaio de Pastilha.....	33
4.4 Caracterização da Amostra.....	35
4.4.1 Difração de Raios-X.....	35
4.4.2 Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva.....	35
4.4.3 Análise Termogravimétrica (ATG) e Análise Térmica Diferencial (ATD)	36
4.5 Ensaio de Britagem e Moagem.....	36
4.6 Ensaio de Granulometria.....	40
4.7 Redimensionamento dos Equipamentos da COOMIPEL.....	42
4.7.1 Dimensionamento dos Britadores de Mandíbulas.....	42
4.7.2 Dimensionamento da Peneira Vibratória.....	44
4.7.3 Dimensionamento do Moinho de Bolas de Seixos.....	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1 Ensaio Físicos.....	55
5.1.1 Determinação da Retenção.....	55
5.1.2 Determinação da Densidade.....	56
5.1.3 Cone de Fusão.....	56
5.1.4 Pastilha.....	57
5.2 Ensaio de Caracterização.....	59
5.2.1 Difração de Raios-X.....	59
5.2.2 Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva.....	60
5.2.3 Análise Termogravimétrica - ATG e Térmica Diferencial – ATD.....	61
5.3 Ensaio de Britagem e Moagem.....	62
5.3.1 Ensaio de Britagem.....	62
5.3.2 Ensaio de Moagem.....	63
5.4 Redimensionamento dos Equipamentos.....	68
5.4.1 Britador de Mandíbulas Primário.....	68
5.4.2 Britador de Mandíbulas Secundário.....	71
5.4.3 Peneiramento.....	75
5.4.4 Moinho de Bolas de Seixos.....	78
5.4.5 Tamanho Máximo dos Corpos Moedores.....	81
5.4.6 Fluxograma proposto para a unidade de beneficiamento da COOMIPEL.....	82
6. CONCLUSÕES.....	85
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
8. REFERÊNCIAS.....	89

1. INTRODUÇÃO

Os depósitos e ocorrências de pegmatitos são uma importante fonte de minerais econômicos, tais como quartzo, feldspato, caulim, micas e gemas (COELHO, 2009). Também são fontes principais ou exclusivas de alguns metais raros como tântalo, lítio, berílio, nióbio, entre outros, contidos em espécies minerais como tantalita, columbita-tantalita, espodumênio, berilo, entre outros (LIMA, 2002).

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) é uma região de domínio de pegmatitos, abrangendo parte dos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, com presença de corpos mineralizados, principalmente em Ta-Nb, Be, Sn e Li. Outras áreas pegmatíticas também ocorrem no Estado do Ceará. A mineração de pegmatitos na Mesorregião do Seridó teve início na década de 1940, que teve incentivos resultado da cooperação do governo brasileiro com as Forças Aliadas durante a Segunda Guerra Mundial. Na ocasião, foi incentivada principalmente a produção de minerais de estanho, de berílio, de lítio e de tântalo. Com o fim do conflito, houve uma queda de produção, mas formou-se na região uma cultura mineira que persiste até os nossos dias (LUZ; LINS, 2003).

No Estado da Paraíba, as atividades mineiras que ocorrem nas cidades de Pedra Lavrada e Nova Palmeira, concentram-se principalmente na extração e beneficiamento de minerais de pegmatitos, que vêm sendo exploradas na região desde meados do século passado. Na execução da lavra nos garimpos, e nos processos de beneficiamento, são gerados resíduos em grande quantidade, e geralmente tem destino final inadequado, apresentando um enorme desperdício de material e degradação ambiental. Como é de regra, esses resíduos poderiam ter outros destinos, como aplicações especiais nas diversas indústrias de transformação (LUZ; LINS, 2008).

A COOMIPEL (Cooperativa de Pequenos Mineradores de Pedra Lavrada), localizada no município de Pedra Lavrada-PB, Estado da Paraíba foi selecionada para este trabalho devido a sua importância para economia da região, e também porque sua unidade de beneficiamento representa o processo empregado para o beneficiamento desses pegmatitos, em particular o mineral feldspato.

Os pegmatitos que fornecem material para a unidade de beneficiamento dos garimpeiros de Pedra Lavrada apresentam vasta mineralogia acessória. Dessa forma, a matéria prima proveniente desses garimpos está associada com vários minerais deletérios

para a indústria vidreira e cerâmica, como minerais de ferro, fosfatos, granadas, entre outros.

As indústrias de vidro e de cerâmica são as principais consumidoras de feldspato. Essas demandam especificações físicas e químicas e certo grau de uniformidade no suprimento do produto. O feldspato é também usado como carga funcional e extensor, nas indústrias de tinta, plástico e borracha. Existem novos setores que apresentam consumo crescente, como as aplicações de tecnologia de painéis solares, cargas e cosméticos (WAN, 2008).

Este trabalho objetiva fazer em uma primeira etapa uma análise geral e pormenorizada de cada equipamento que constitui o circuito de beneficiamento da Cooperativa de Mineradores do município de Pedra Lavrada-PB. Em seguida, propor e recomendar um redimensionamento para otimização do processo de beneficiamento do feldspato albita. Também será realizada uma caracterização tecnológica do minério, proveniente da área de extração Alto da Serra Branca, que faz parte da Província Pegmatítica da Borborema, através de processos físicos e outros.

Uma etapa fundamental, será o de beneficiamento, em escala de laboratório, com intuito de avaliar e observar os parâmetros que influenciam o processo de britagem e, principalmente, de moagem. Esse processamento mineral é o que normalmente é realizado na indústria, tendo como finalidade a obtenção do concentrado de feldspato. Esses estudos visam ao aproveitamento da albita, dentro das especificações requeridas para os diferentes segmentos industriais, destacando-se os setores de fabricação de vidro. O resultado dessa caracterização e do dimensionamento dos equipamentos servirá para melhoria do processo de obtenção de produtos para atender o setor em termos de qualidade e quantidade. Este estudo também contribuirá para otimização do circuito de beneficiamento, e assim, irá agregar valor, e poderá servir de referência para outras cooperativas.

A colocação em prática dos resultados deste trabalho poderá fornecer valiosos subsídios e ganhos significativos aos cooperados da região, desde que sejam aplicados corretamente em cada etapa do processo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo do melhoramento do processamento mineral nas operações unitárias de britagem, moagem, peneiramento e classificação. O alvo da pesquisa é a unidade de beneficiamento de pequenos mineradores de Pedra Lavrada (COOMIPEL). Ainda é previsto propor um modelo de uma unidade piloto de beneficiamento, com intuito de otimizar a produção de feldspato para atender as especificações demandadas pelo setor industrial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Entre os objetivos específicos estão:

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre trabalhos que abordem o beneficiamento de pegmatitos.
2. Realizar visitas técnicas às áreas onde são extraídos os pegmatitos feldspáticos e as unidades onde são beneficiados.
3. Realizar visitas para coleta de dados à unidade de beneficiamentos da COOMIPEL.
4. Realizar a caracterização mineralógica e química dos minerais, e dos produtos gerados pelo beneficiamento de pegmatitos na área selecionada para estudo;
5. Realizar ensaios em escala laboratorial, bem como ensaios físicos e outros ensaios, de modo a quantificar os parâmetros de maior relevância do processo.
6. Realizar a otimização dos equipamentos usados nas operações unitárias como britadores, peneiras, moinho e classificadores,
7. Propor um fluxograma otimizado do processo com base em modelos com suporte teórico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PEGMATITOS

3.1.1 Definição

A designação pegmatito foi mencionada inicialmente pelo mineralogista francês Hauny no início do século XIX para designar o que se conhece atualmente por granito gráfico (JAHNS,1955). Mas tarde, o vocábulo tornou-se mais abrangente, incluindo rochas de granulometria muito grosseira, onde o granito gráfico constitui uma parte delas.

No século XX vários pesquisadores desenvolveram teorias sobre a formação e evolução de pegmatitos, tais como FERSMAN (1931), JOHNSTON Jr (1945), (CAMERON *et al.*,1949), SOLODOV (1962), GINSBURG (1979), e CERNY (1991).

Os pegmatitos são rochas ígneas, de granulometria variável, alcançando em alguns casos, grãos com tamanho, de centímetros até decímetros, e que a textura associada se chama pegmatítica. Esses corpos têm os mesmos constituintes minerais que o granito (quartzo, feldspato e mica), porém os tamanhos dos cristais são maiores. Apresentam composições variadas (dioríticas, gabroícas ou graníticas), sendo os pegmatitos graníticos os mais frequentes (JAHNS,1955).

Os minerais oriundos desses pegmatitos, como feldspato, quartzo, mica, tantalita, berilo, e outros, quando há possibilidades de aproveitamento, são destinados ao mercado interno. Embora provenientes dos pegmatitos, cada bem mineral produzido tem propriedades diferentes e, conseqüentemente aplicações e mercados específicos, sendo utilizados na indústria cerâmica, e na construção, que são transformados em pisos, tintas, porcelanato, e louças sanitárias (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Os primeiros trabalhos sobre os pegmatitos da PPB se devem a JOHNSTON Jr. (1945), que afirmou: “as rochas da região da PPB são, principalmente, gnaisse e micaxistos pré-cambrianos com intrusões de granitos cortados por pegmatitos e veios de quartzo”. Por serem rochas mais resistentes à erosão do que os xistos, os pegmatitos permanecem mais aparentes. Por isso são conhecidos como “altos”.

3.1.2 Classificação

São várias as classificações propostas para pegmatitos graníticos, segundo Fersman (1931) os mesmos estão divididos em:

a) Pegmatitos de Linha Pura – São pegmatitos não contaminados pela rocha encaixante.

b) Pegmatitos de Contato – São pegmatitos que contêm minerais indicativos de assimilação das rochas encaixantes.

c) Pegmatitos de Linha Cruzada – São pegmatitos de composição diferente dos pegmatitos de composição granítica devido a extensiva reação com as rochas encaixantes.

De acordo com SOLODOV (1962) utilizando critérios químicos e mineralógicos dividiu os pegmatitos graníticos em quatro tipos, baseado na predominância de alguns minerais formadores de rocha, estabelecendo seus elementos químicos característicos:

Tipo I – Pegmatitos a microclínio – K, Be.

Tipo II – Pegmatitos a albita – microclínio – K, Na, Ta, Be, Cs, Rb, Ti, Li.

Tipo III – Pegmatitos a albita – Na, Li, Be, Ta, Nb, Sn.

Tipo IV – Pegmatitos a albita – espodumênio – Na, Li, com esporádico Nb e Sn.

Segundo Cerny (1991) dividiu os pegmatitos portadores de elementos raros em tipos e subtipos, a partir do predomínio de certos minerais e da assinatura geoquímica. Esta divisão está descrita a seguir:

Classe – Abissal; Elementos – U, Th, Zr, Nb; Mineralização – Pobre a moderada.

Classe – Muscovítico; Elementos – Li, Be, U, Nb>Ta; Mineralização – Pobre a moderada; Micas e minerais cerâmicos.

Classe – Elementos raros; Elementos – Li, Th, Zr, Nb; Mineralização – Pobre a abundante; minerais gemas e minerais industriais.

A classificação de CERNY (1991) atualmente é a mais utilizada de todas as classificações, pois engloba pressão, temperatura, ambiente metamórfico e relações dos pegmatitos com os granitos que os originaram.

3.2 PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA (PPB)

3.2.1 Aspectos Gerais

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) está inserida entre os Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, tendo como coordenadas geográficas 5°30`S e 7°15`S de latitude e 35°45`W e 37°15`W de longitude, correspondendo a parte oriental da Faixa de Dobramento Seridó.

Conforme DA SILVA (1995) a área aproximada de concentração dos pegmatitos da PPB é de 75 X 150 km², no Sudeste da Faixa de dobramentos Seridó, localizada entre os estados do RN e da PB, sendo estas rochas, majoritariamente, encaixadas em

micaxistos, quartzitos e gnaisses do Grupo Seridó e, em número menor, nos gnaisses e migmatitos do Complexo Gnáissico-Migmatítico (LUZ; LINS, 2003).

Na Formação Seridó existem mais de 1.500 pegmatitos produtores de metais raros (Be, Ta-Nb, Li e Sn), de gemas e de minerais industriais (feldspato, caulim e quartzo), em uma área de ocorrência de cerca de 10.000 km² (SILVA; CROSTA, 2011). A Figura 1 mostra a área pegmatítica da PPB.

Os pegmatitos mineralizados principalmente em Ta-Nb, Be, Sn, Li, minerais industriais e minerais gemas desta província, ocorrem nos municípios de Parelhas, Equador e Carnaúba dos Dantas, no Estado do Rio Grande do Norte, e nos municípios da Paraíba em Picuí, Frei Martinho, Nova Palmeira, Pedra Lavrada, Juazeirinho e Junco do Seridó.

No período da II Guerra Mundial ocorreu um aumento no preço e na busca intensa por matérias primas e minerais estratégicos, como berilo e tantalita para atender as necessidades dos países aliados. De acordo com ROLFF (1946), o município de Picuí na Paraíba chegou a produzir, neste período, 20% da produção mundial de tantalita, e 8 a 10% da produção mundial de berilo. Neste período foram lavradas simultaneamente cerca de 450 pegmatitos em toda região.

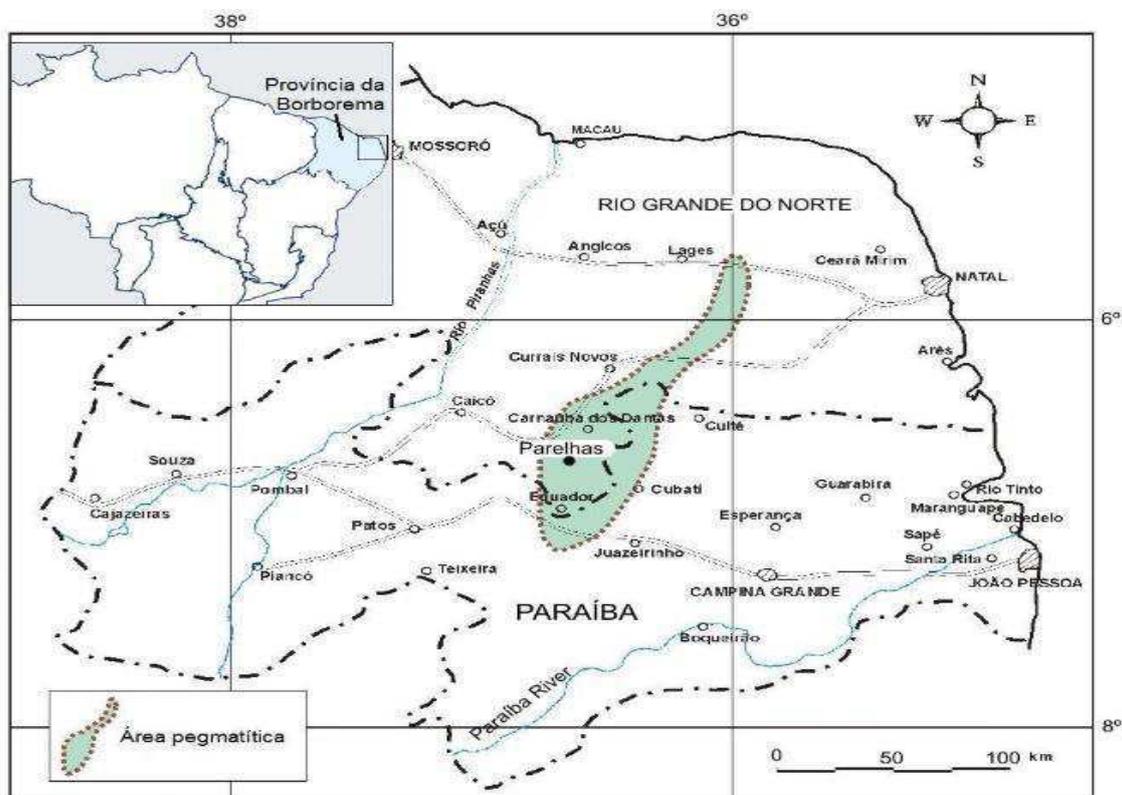


Figura 1 – Mapa de localização da área pegmatítica nos Estados do RN e PB.

Fonte: ARAÚJO (2016).

3.2.2 Classificação dos Pegmatitos da Borborema

Para a província Pegmatítica da Borborema, os pesquisadores propuseram classificações desses pegmatitos, de acordo com alguns critérios. Dentre os autores estão SCORZA (1944), JOHNSTON Jr (1945), ROLFF (1945,1946) agrupou os pegmatitos da região, de acordo com a presença de minerais de valor econômico, como: cassiterita, berilo, tantalita e columbita, em:

a) Pegmatitos que contêm cassiterita.

b) Pegmatitos que contêm minérios de cobre.

c) Pegmatitos que não contém cassiterita nem minerais de cobre.

De acordo com JOHNSTAN Jr (1945) classificou-os em homogêneos e heterogêneos, tendo como base a estrutura interna dos pegmatitos. Enquanto que ROLFF (1945) classificou-os em homogêneos, heterogêneos e mistos (Figura 2).

a) Pegmatitos Homogêneos

- Constituídos principalmente por quartzo, feldspatos, e moscovita, biotita, schorlita e almandina.
- Às vezes podem conter um pouco de berilo, columbita-tantalita, e cassiterita.
- Suas dimensões variam entre 1 a 2 m de espessura, com extensão de até centenas de metros.
- São mais abundantes que os pegmatitos heterogêneos.

b) Pegmatitos Heterogêneos

- Constituídos principalmente por quartzo, feldspatos e micas, podendo ter grandes quantidades de tantalatos, berilos, cassiterita e espodumênio, granada e turmalina negra.
- Podem conter grandes cristais (métricos) de berilo, feldspato, espodumênio, entre outros.
- Tem dimensões que chegam a 600m de comprimento por 150m de espessura, em afloramento.
- São economicamente mais importante que os pegmatitos homogêneos.

c) Pegmatitos Mistos

- São Pegmatitos intermediários entre os homogêneos e os heterogêneos, essa nomenclatura foi proposta por ROLFF (1945).
- São de granulação equidimensional, exceto alguns pontos onde ocorre gigantismo de minerais, geralmente rodeados por massas de quartzo.

- Ocorrem em pequeno número.

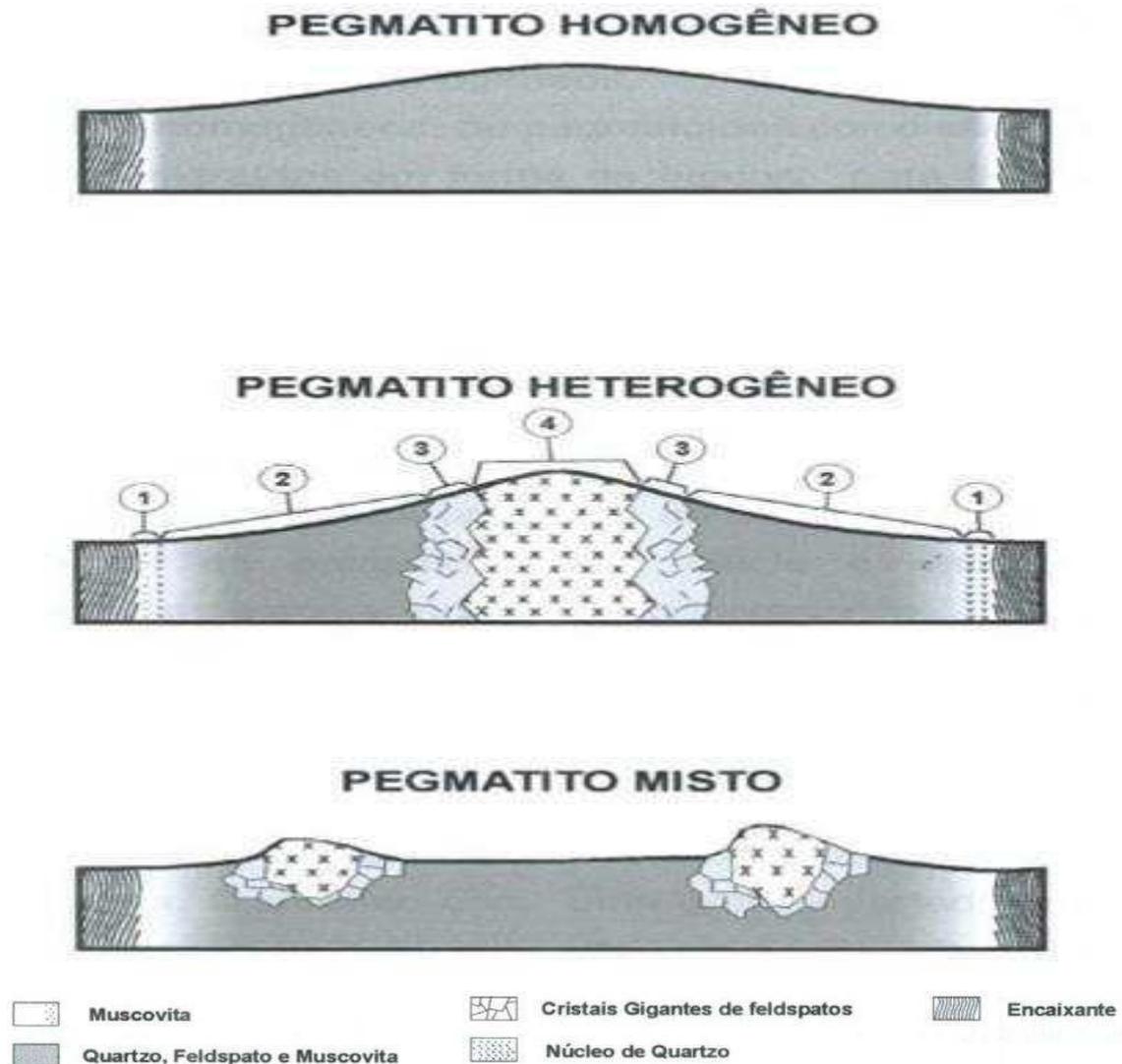


Figura 2 – Classificação estrutural dos pegmatitos.
Fonte: VIDAL; NOGUEIRA (2005).

3.2.3 Mineralogia dos Pegmatitos da Borborema

Os pegmatitos graníticos da região de Pedra Lavrada e Nova Palmeira são formados por feldspato potássico, quartzo, moscovita e, geralmente em menor quantidade, albita, biotita, turmalina negra e granada. A mineralogia acessória é vasta, destacando columbita-tantalita e cassiterita (SOARES, 2004).

O mineral quartzo abundante nos pegmatitos da região, não ocorre sob forma de cristais bem formados, distribui-se em todas as unidades, inclusive intercrescidos com os feldspatos. O quartzo do núcleo no corpo geralmente é leitoso (maioria dos pegmatitos),

e mais raramente fumê, róseo ou citrino ou mesmo ametista. Em um mesmo núcleo podem ocorrer mais de um tipo de quartzo.

A ocorrência de feldspato é de dois tipos: K-feldspato potássico e albita, sendo esta última mais comumente na variedade cleavelandita, quando em corpos de substituição, geralmente associado a micas. Os K-feldspatos ocorrem normalmente intercrescidos em quartzo e micas, ou formando grandes cristais. Da Silva (1984) estudando a triclinicidade dos feldspatos concluiu que eles são microclínio intermediários, com ortoclásio ocorrendo restritamente.

As micas são predominantemente moscovitas, e ocorre em dois tipos: uma em grandes placas, típico do zoneamento primário, outra secundária, em pequenas placas, de cor predominantemente verde, que ocorre em corpos de substituição, associada geralmente a albita, quartzo, lepidolita e as vezes elbaíta. A biotita ocorre esporadicamente em alguns pegmatitos da região (SOARES, 2004).

De acordo com ADUSUMILLI (1976) realizou um estudo sobre os nióbio-tantalatos do Nordeste do Brasil. Elaborou uma revisão bibliográfica desses, incluindo mineralogia, cristalografia, modo de ocorrência e importância econômica, descrevendo detalhadamente os minerais de Nb e Ta que ocorre no Nordeste. Pode-se dizer que as espécies cristalinas de maior frequência são colombita-tantalita e tapiolita. Estudou e identificou os minerais bismuto-tantalita, wodginita, ilmenorulito, ta-aesclinita, microlita e stringita.

3.3 FELDSPATO

Segundo COELHO (2009), o feldspato é formado por uma série de silicatos de alumínio, tendo composição variada de potássio, sódio, cálcio, e ocasionalmente bário. Esses feldspatos sódico e potássico têm grande aplicação na indústria cerâmica e de vidro.

O feldspato é representado principalmente por dois grupos de minerais, são eles os álcolis-feldspato e os plagioclásios. Os álcolis-feldspato são principalmente o ortoclásio e a microclínia cuja fórmula química é a mesma (KAlSi_3O_8).

A origem do nome feldspato vem do alemão Feld (campo) e Spath (pedra), e apresenta as seguintes características:

- **Cor:** Branco a róseo;
- **Aspecto óptico:** Translúcido e transparente;
- **Brilho:** Não metálico, vítreo;
- **Dureza:** Escala de Mohs: 6,0 a 6,5;

- **Peso específico:** 2,5 a 2,8;
- **Sistema de cristalização:** Monoclínico, triclínico;
- **Hábito:** Cristal prismático ou compacto;
- **Composição química:** (Na,K) AlSi_2O_3 , $\text{Ca}\cdot\text{Al}_2\text{SiO}_3$, $\text{Ba}\cdot\text{Al}\cdot\text{Si}_2\text{O}_3$

3.3.1 Mineralogia dos Feldspatos

A associação dos produtores de feldspato da comunidade Européia-Eurofel, cita que os principais depósitos em exploração no mundo são depósitos do tipo nefelina sienito. Esses são rochas constituídas por feldspatóides, principalmente nefelina. Os principais depósitos em exploração estão situados no Canadá e na Noruega (COELHO, 2009).

De uma maneira geral, pode-se dizer que as composições químicas dos feldspatos permitem classifica-los em:

- Ortoclásio / Microclina (KAlSi_3O_8);
- Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$);
- Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

O grupo do feldspato é subdividido em dois subgrupos em função das diferenças dos tipos de álcalis predominantes e estrutura cristalina (DEER; HOWIER; ZUSSMAN, 1966). São eles:

1. Feldspatos alcalinos ou álcali-feldspatos: são os constituintes entre o feldspato potássico (KAlSi_3O) e a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$);
2. Plagioclásios ou feldspatos sódico-cálcicos: membros com composições químicas entre anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).

Porém, para um bom entendimento da relação entre os minerais do grupo do feldspato, além da caracterização química e mineralógica, é importante caracterizá-los também em relação à temperatura de cristalização, pois, os feldspatos preservam em suas estruturas cristalinas as características da temperatura na qual foram formados.

3.3.2 Feldspato Potássico (Feldspatos Alcalinos)

O subgrupo dos feldspatos alcalinos (KAlSi_3O_8 – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) incluem os minerais: ortoclásio, microclina, sanidina e anortoclásio. As suas estruturas correspondem às temperaturas mais baixas de cristalização, denomina-se ortoclásio. Já os feldspatos potássicos, e de elevadas temperaturas de cristalização denomina-se sanidinas, e os

feldspatos potássicos de mais baixa temperatura, denomina-se microclina (DEER; HOWIER; ZUSSMAN, 1966).

A Tabela 1 apresenta uma síntese das características químicas, físicas, estruturais, e alguns dos usos e formas de ocorrência dos feldspatos alcalinos.

Tabela 1 – Características gerais dos feldspatos alcalinos.

	Ortoclásio	Microclina	Sanidina
Fórmula Química	$KAlSi_3O_8$	$KAlSi_3O_8$	$(K, Na)(Si, Al)_4O_8$
Composição	16,92% K_2O 18,32% Al_2O_3 64,76% SiO_2	16,92% K_2O 18,32% Al_2O_3 64,76% SiO_2	12,88% K_2O 2,82% Na_2O 18,59% Al_2O_3 65,71% SiO_2
Cristalografia/ Classe	Monoclínico/ Prismática	Triclínico/Pinacoidal	Monoclínico/ Prismática
Hábito	Prismático	Prismático	Prismático
Clivagem	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa
Dureza	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5
Densidade Relativa	2,56	2,56	2,56
Ocorrência	Rochas ígneas e metamórficas.	Pegmatitos graníticos. Rochas hidrotermais e metamórfica.	Rochas magmáticas félsicas
Usos	Indústria de cerâmica, abrasivos, britas, uso gemológico.	Indústria de cerâmica, vidreira, adubo potássico e uso gemológico.	Indústria de cerâmica, vidreira, adubo potássico e uso gemológico.

Fonte: Adaptado (DEER, HOWIER, ZUSSMAN, 1966).

3.3.3 Feldspato Sódico-Cálcico / Plagioclásios

O subgrupo dos feldspatos plagioclásios incluem membros da série da solução sólida de albita ($NaAlSi_3O_8$), anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) incluem albita, oligoclásio, andesina, labradorita, bytownita e anortita (LUZ; LINS, 2008).

Essa série é designada em termos das frações dos componentes albítico (Ab) e anortítico (An) existentes em cada mineral intermediário, uma vez que a soma de Ab e An devem somar 100 (Tabela 2).

Tabela 2 – Série dos feldspatos plagioclásios.

Mineral	Porcentagem de albita	Porcentagem de anortita
Albita	100 - 90	0 - 10
Oligoclásio	90 - 70	10 - 30
Andesina	70 - 50	30 - 50
Labradorita	50 - 30	50 - 70
Bytownita	30 - 10	70 - 90
Anortita	10 - 0	90 - 100

Fonte: LUZ; LINS (2008).

Ressalta-se que a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) pertence aos dois subgrupos dos feldspatos, porém, geralmente por comodidade é descrita na literatura como plagioclásio. A Tabela 3 apresenta as características químicas, físicas, estruturais, e alguns dos usos e formas de ocorrência dos plagioclásios.

Tabela 3 – Características gerais dos plagioclásios.

	Albita	Oligoclásio	Andesina	Labradorita	Bytownita	Anortita
Fórmula Química	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$				$\text{CaAlSi}_3\text{O}_8$
Composição	11,19%Na ₂ O 1,07% CaO 20,35% Al ₂ O ₃ 67,39% SiO ₂	9,34%Na ₂ O 4,23% CaO 20,05% Al ₂ O ₃ 58,38% SiO ₂	6,92%Na ₂ O 8,35% CaO 26,57% Al ₂ O ₃ 58,16% SiO ₂	4,56%Na ₂ O 12,38% CaO 30,01% Al ₂ O ₃ 53,05% SiO ₂	2,25%Na ₂ O 16,31% CaO 33,37% Al ₂ O ₃ 48,07% SiO ₂	0,56%Na ₂ O 19,20% CaO 35,84% Al ₂ O ₃ 44,40% SiO ₂
Cristalografia / Classe	Triclínico/ Pinacoidal	Triclínico/ Pinacoidal	Triclínico/ Pinacoidal	Triclínico/ Pinacoidal	Triclínico/ Pinacoidal	Triclínico/ Pinacoidal
Hábito	Prismático	Prismático	Tabular	Prismático	Tabular	Tabular
Clivagem	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa	Perfeita, Boa e distinta	Perfeita e Boa	Perfeita e Boa
Dureza	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5	6,0	6,0 - 6,5	6,0 - 6,5	6,0
Densidade Relativa	2,62	2,64 - 2,66	2,66 - 2,68	2,68 - 2,71	2,7 - 2,72	2,72 - 2,75
Ocorrência	Rochas magmáticas e pegmatitos	Rochas magmáticas e pegmatitos	Rochas magmáticas e pegmatitos	Rochas metamórficas e magmáticas	Rochas metamórficas e magmáticas	Rochas metamórficas e magmáticas
Usos	Indústria de vidro e porcelanato.	Indústria de vidro e porcelana.	Indústria de cerâmica.	Indústria de cerâmica e	Indústria de vidro e porcelanato	Indústria de cerâmica.

Fonte: Adaptado (DEER; HOWIER; ZUSSMAN, 1966).

3.4 USOS E APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA

O feldspato tem um papel fundamental na indústria cerâmica e vidreira, mas deve-se ressaltar que sua aplicação não se restringe somente a esses segmentos industriais. O feldspato também pode ser usado como carga mineral nas indústrias de tintas, plásticos, borrachas, abrasivos leves; insumo na indústria de eletrodos para soldas; materiais para restaurações dentárias, entre outras aplicações (COELHO, 2009).

Podendo também ser utilizado no ramo gemológico, apresentando numerosas variedades. No subgrupo do feldspato potássico as principais variedades são a microclina de coloração verde, denominada gemologicamente amazonita; o ortoclásio (adularia) quando apresenta adularescência, denominado pedra-da-lua. No subgrupo dos plagioclásios as principais variedades são a labradorita, a qual apresenta um jogo de cores (labradorescência) em tons metálicos brilhantes, gemologicamente denominada de espectrolita (labradorita finlandesa) que exibe bem definidas as cores espectrais; entre outros de ocorrências menos frequentes (SCHUMANN, 2006).

3.4.1 Especificações Comerciais de Feldspatos

Neste tópico será apresentada a importância das especificações do feldspato para o aproveitamento racional de feldspatos. De acordo com MOURA (1981), as especificações do mercado para o beneficiamento de feldspato devem possuir as seguintes características:

- a) estar em fragmentos variando de 5 a 15 cm ou estar moído (a menos de 28 malhas), para facilitar o preparo das pastas cerâmicas;
- b) apresentar pequenas quantidades de ferro (menos de 0,2 %), pouco quartzo (menos de 10%) e ponto de fusão de 1.200 °C.

De acordo com o mesmo autor, o feldspato para ser de primeira qualidade, deve conter menos que 0,1% de ferro. A composição dos feldspatos beneficiados e usados industrialmente está descrito na Tabela 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Composição química para feldspatos comerciais beneficiados.

Análise química (%) em peso	
SiO ₂	66,0 – 70,0
Al ₂ O ₃	15,0 – 19,0
Fe ₂ O ₃	0,05 – 0,10
Na ₂ O	3,0 – 5,0
K ₂ O	8,0 – 12,0
CaO	< 1,0

Fonte: MOURA (1981).

Tabela 5 – Principais especificações para uso industrial de feldspato beneficiado.

Indústria	Composição química							Granulometria	Perda ao fogo	Observações
Cerâmica	1° qualidade		$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 13,0\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 > 18\%$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,1\%$ $\text{TiO}_2 < 0,2\%$ $\text{CaO} \text{ e } \text{MgO} \leq 0,3\%$ $\text{SiO}_2 \leq 67\%$					Varia desde 100% passante na malha 30# até 100% na malha 200#	0,5% máx	O feldspato, tanto sódico como potássico é utilizado como fundente, devido a presença de álcalis nos setores de louça sanitária, louça de mesa, pastilhas, ladrilhos cerâmicos.
	2° qualidade		$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 10,0\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,51\%$ $\text{SiO}_2 \leq 71\%$					Varia desde 100% passante na malha 10# até 100% na malha 200#	1,0% máx	
Tintas e vernizes	Potássico		$\text{SiO}_2 \leq 65,0\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$; $\text{Na}_2\text{O} < 10\%$ $\text{K}_2\text{O} > 9$ a $12,0\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 0,20\%$					100% passante na #200 mesh	1,0% máx	Os feldspatos são utilizados na formulação de esmaltes porcelanizados.
	Sódico		$\text{SiO}_2 \leq 65,0\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 20\%$; $\text{Na}_2\text{O} < 10\%$ $\text{K}_2\text{O} > 3,0\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,20\%$					100% passante na #200 mesh	1,0% máx	
Abrasivos	SiO ₂		63,6% a 66,3%					98% passante na # 200 mesh	0,92% a 1,2% máx	Os feldspatos agregam-se á liga vitrificada que mantém os grãos abrasivos na forma do rebolo.
	Al ₂ O ₃		16,8% a 20,8%							
	Na ₂ O		1,0% a 4,6%							
	K ₂ O		8,4% a 13,6%							
Eletrodos para solda			SiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	100% passante em #80 mesh 80% passante em #325 mesh	1,5% máx	Os feldspatos são utilizados como estabilizantes do arcovoltáico, escorificante e para transferência de cromo para o material base.
	Potássico (%)		65 - 70	12 - 13	15 - 20	12 - 13	-			
	Sódico (%)		62 - 67	03 - 06	17 - 19	03 - 06	05 - 10			
Vidreira ATBIAV	%	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	100% passante em #16 mesh 2% retido em #20 mesh 10 a 80% retido em 140# mesh	1,0% máx 1,0% máx 1,5% máx	Os feldspatos são usados em todos tipos de vidros (embalagem, iluminação e vidros especiais). Sua função é fornecer alumina, e incorporar o sódio e potássio.
	A	11 - 12,6	2,5 - 3,5	64,5 - 65,5	19 - 20,0	0,10	0,04			
	B	13,5	-	-	17,5	0,10	-			
	C	12,0	-	-	15,0	0,30	-			
	D	11,5	-	-	14,5	0,35	-			

Fonte: SILVA; CUNHA; MARINHO (1996).

3.4.2 Feldspato para Indústria Vidreira

3.4.2.1 Aplicações

De acordo com TAVARES, CASTANEDA, PEDROSA (2005), os feldspatos na indústria vidreira possuem as seguintes aplicações:

- Fonte de álcalis (Na_2O , K_2O), cuja finalidade é atuar como fundente;
- Atuar como estabilizador, fornecendo ao vidro um elevado grau de resistência química;
- Melhorar a durabilidade por aumento da resistência a impacto, dobramento e choque térmico;
- Fonte de alumina (Al_2O_3), cujas finalidades são aumentar a resistência à corrosão química, a dureza e a durabilidade;
- Aumentar a viscosidade durante a formação do vidro, inibindo a desvitrificação;
- Fonte de sílica, utilizada como vitrificante.

3.4.2.2 Especificações do feldspato para indústria vidreira

As especificações do uso de feldspato para indústria vidreira aceitam parâmetros mais amplos, ou seja, ao contrário da indústria cerâmica o setor vidreiro restringe menos o uso de feldspatos de menor qualidade. Dessa forma, torna-se possível a aplicação desses minerais nesse segmento industrial (COELHO, 2009).

De acordo com OLIVEIRA (2001), existem algumas normas para especificações do feldspato para o vidro, formulada pela Associação Brasileira das Indústrias do Vidro – ATBIAV (Tabela 6). Mas há outras especificações menos frequentes, na utilização industrial do feldspato. As Tabelas 7 à 8 mostram algumas dessas especificações.

Tabela 6 – Composição química de feldspato para a indústria de vidro.

Indústria Vidreira / ATBIAV							
%	K_2O	Na_2O	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
A	11 – 12,6	2,5 – 3,5	64,5 – 65,5	19 – 20,0	0,10	0,04	traço
B	13,5	-	67,0	17,5	0,10	-	-
C	12,0	-	70,0	15,0	0,30	-	-
D	11,5	-	70,5	14,5	0,35	-	-

Fonte: Adaptado (OLIVEIRA, 2001).

Tabela 7 – Composição química de feldspato para fabricação de alguns tipos de vidro.

Análise química (%)			
Produtos	Vidro F-20	Vidro C-20	Vidro G-40
SiO ₂	68,20	68,90	67,70
Al ₂ O ₃	22	18,75	18,50
Fe ₂ O ₃	0,10	0,07	0,1
CaO	5,60	1,85	0,90
MgO	Traço	Traço	Traço
K ₂ O	3,00	3,85	4,10
Na ₂ O	6,00	7,15	7,00
P.F	0,20	0,13	0,25

Fonte: Adaptado (LUZ; COELHO, 2005).

Tabela 8 – Composição química de Feldspatos provenientes dos pegmatitos da Carolina do Norte.

Análise química (%)		
Nome comercial	Vidro F-20	Vidro K-40
SiO ₂	68,20	67,10
Al ₂ O ₃	19,00	18,30
Fe ₂ O ₃	0,07	0,07
CaO	1,85	0,36
MgO	Traço	Traço
K ₂ O	3,75	10,10
Na ₂ O	7,15	3,80
P.F	0,13	0,26

Fonte: Adaptado (LUZ; COELHO, 2005).

3.5 LAVRA E BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO

A lavra de feldspato, em uma empresa de mineração localizada no exterior do Brasil é realizada de forma mecanizada e geralmente a céu aberto. Na etapa inicial é realizado o decapeamento, normalmente, com uma relação 1:1 de estéril/minério. O corpo do minério de feldspato é desmontado através de explosivos a base de nitrato de amônia, colocados em furos de grandes diâmetros efetuados por perfuratrizes rotativas (COELHO, 2009).

O minério desmontado sofre uma redução de tamanho através do sistema denominado *drop ball*. O minério lavrado é colocado por pás carregadeiras em caminhões e transportado até a unidade de britagem, adjacente à unidade de beneficiamento. Na britagem primária usa-se um britador de mandíbulas em circuito aberto, enquanto a britagem secundária é efetuada em britador giratório, algumas vezes em circuito fechado com peneiras.

O produto final da britagem, menor que 25 mm, é submetido a uma moagem via úmida. Essa moagem pode ser realizada em moinhos de barra ou de bolas, em circuito fechado com um classificador, de modo a obter-se uma melhor operação. Posteriormente, o minério moído a úmido sofre uma deslamagem, através de hidrociclones, a fim de ser eliminada a fração menor que 38 μm . Logo que o minério atinja um tamanho adequado, iniciam-se as operações de flotação. A primeira flotação é efetuada para separar a mica que, normalmente, é vendida como subproduto. Depois, inicia-se a flotação dos minerais de ferro, que são encaminhados para o rejeito (COELHO, 2009).

Na Turquia, na região de Cine-Milas, o run of mine é normalmente britado em dois estágios e peneirado abaixo de 10 mm. O feldspato albitico britado e peneirado, se não foi lavado seletivamente e/ou processado posteriormente, é denominado de “Standard”. Além da britagem e peneiramento, foi implantado, recentemente, uma unidade industrial usando flotação e separação magnética, visando a produção de feldspato de melhor qualidade, destinado à fabricação de porcelanato. Para obter concentrados de albita com maior alvura, para a indústria cerâmica e de vidro, emprega-se a separação magnética para remover os minerais que contém ferro, tais como biotita, granada e turmalina. Nesse caso, vem sendo usado separador magnético, a seco, de alto gradiente, usando-se separador de rolos. No caso da presença de minerais de rutilo, a sua remoção só é possível por flotação (BAYRAKTAR; ÇAKIR, 2002).

As primeiras atividades de mineração registradas na lavra de pegmatitos na PPB são da época da I Guerra Mundial, com objetivo de produzir mica. A partir dos anos de 1930, buscou-se por minerais de tântalo e nióbio, desencadeando o aumento da exploração de pegmatitos, que atingiu seu nível máximo durante a II Guerra Mundial (LUZ *et al.*, 2002; SILVA; DANTAS, 1984).

As informações técnicas e econômicas acumuladas ao longo de anos de estudos não foram aplicadas para promover melhorias nas metodologias de extração e beneficiamento, uma vez que as mesmas continuam reproduzindo práticas das primeiras décadas de atividades extrativas na PPB (LUZ *et al.*, 2002).

Na região da Paraíba, Rio Grande do Norte, e norte de Minas Gerais localizam-se as principais províncias pegmatíticas do País, e de modo geral, os métodos de exploração e lavra adotados, são empíricos, predatórios, e ausente de orientação técnica da Engenharia de Minas.

Uma grande parte da produção de feldspato no Brasil é realizada em pequenas minas, por garimpeiros, inclusive o pegmatito Alto Serra Branca, situado no município

de Pedra Lavrada-PB, que é alvo desta pesquisa (Figura 3). Nesses pegmatitos são usados métodos e equipamentos rudimentares, com pouca mecanização (Figura 4).



Figura 3 – Pegmatito Alto Serra Branca-PB.



Figura 4 – Equipamentos usados na lavra de pegmatitos no Alto Serra Branca-PB.

Na unidade de beneficiamento da cooperativa COOMIPEL (Cooperativa de Mineradores de Pedra Lavrada-PB), a albita é beneficiada através das operações de britagem, moagem e classificação, produzindo um feldspato de boa qualidade e de boa aceitação no mercado. Em alguns casos, beneficiam o feldspato com alguma proporção

de quartzo, porém com preço inferior, para atender potenciais compradores. O *Run of Mine* do minério vindo da lavra, é descarregado próximo à unidade de beneficiamento, e às vezes despejado diretamente no alimentador vibratório, do tipo grelha.

As etapas do processo de beneficiamento do feldspato na cooperativa constituem-se de dois percursos distintos no processo de cominuição, a depender do feldspato a ser trabalhado. Na linha de britagem (Figura 5), são fragmentados tanto o feldspato albita como o potássico, apenas na etapa de moagem que seguem caminhos diferentes. A albita é moída no moinho de bolas de seixos (Figura 6), enquanto que o feldspato potássico é moído no moinho de martelos (Figura 7). No caso do feldspato albita, a britagem é realizada com dois (02) britadores de mandíbulas, onde o material é submetido à britagem primária e secundária, sendo reduzido a uma granulometria menor que 50 mm. Após a fragmentação, segue em uma correia transportadora para formar uma pilha. Da pilha, o material é transportado por uma retroescavadeira para o silo, que alimenta o moinho de bolas de seixos, onde a granulometria do feldspato albita será reduzida a < 200 malhas (Figura 51).



Figura 5 – Britador de mandíbulas primário e secundário da COOMIPEL.



Figura 6 – Moinho de bolas da COOMIPEL.

O processo de beneficiamento do feldspato potássico (Figura 8) na unidade da COOMIPEL, inicia-se com as etapas de britagem primária e secundária, posteriormente o material britado vai para pilha e depois segue para o moinho de martelos.

Na Figura 7, observa-se o moinho de martelos e a peneira, o qual é alimentado pelo material proveniente das etapas de britagem (primária e secundária). Desse circuito, é separado o feldspato potássico com granulometria $\leq 1,68$ mm para comercialização.



Figura 7 – Moinho de martelos e peneira da COOMIPEL.

O produto do moinho de martelos apresenta uma granulometria ≤ 10 mm, e é despejado em uma correia transportadora e conduzido a uma peneira vibratória. O material retido na peneira de 12 malhas ($\geq 1,68$ mm) é repassado por gravidade, em circuito fechado, para o moinho de martelos. O passante da peneira, segue por gravidade, para formar a pilha de feldspato com granulometria $\leq 1,68$ mm, para comercialização atendendo potenciais clientes (Figura 8).

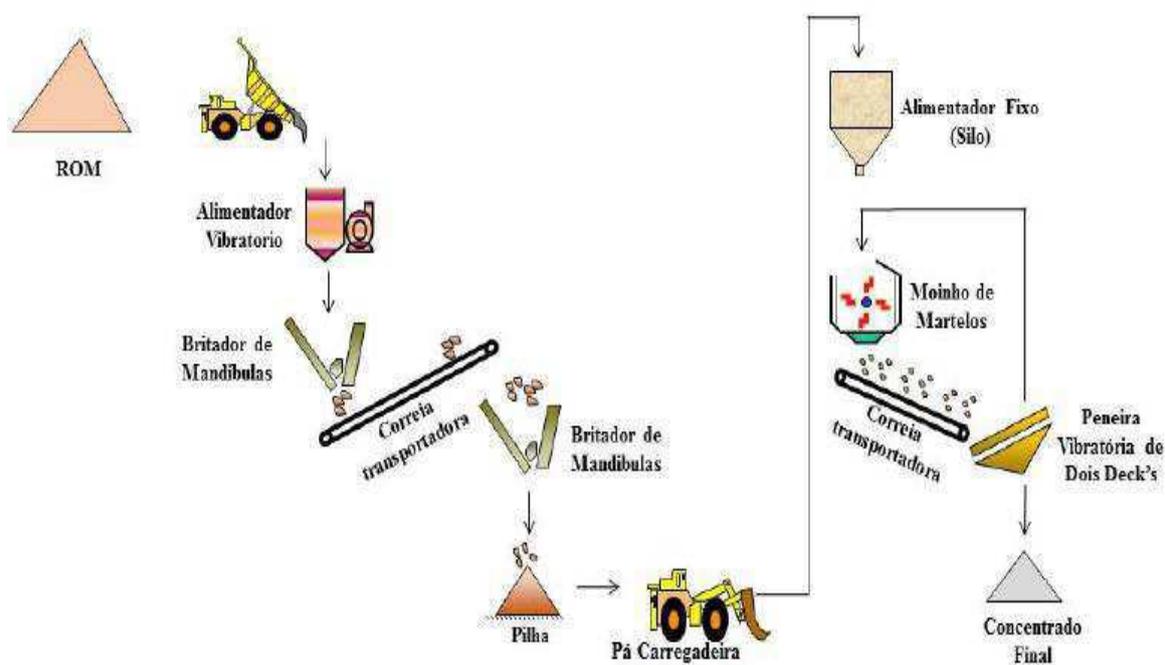


Figura 8 – Fluxograma do circuito de beneficiamento do feldspato potássico na cooperativa Coomipel. Fonte: VIERA; SILVA; VIDAL (2016).

3.6 ASPECTOS TEÓRICOS DA COMINUIÇÃO

As operações de cominuição compreendem diversos estágios que se aplicam ao minério, desde a mina, até sua adequação ao processo industrial subsequente. Na etapa de lavra, o desmonte do minério ou rocha, com o auxílio de explosivo pode ser visto como um primeiro estágio de fragmentação, onde são produzidos blocos volumosos, mas de um tamanho que permite alimentar os equipamentos de britagem (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A britagem é a operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, podendo ser repetida diversas vezes por diferentes tipos de equipamentos, até se obter um material adequado à alimentação da moagem. A moagem é a operação de fragmentação fina

obtendo-se nela um produto adequado à concentração ou a qualquer outro processo industrial, como a pelotização, lixiviação e combustão (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

A britagem é o primeiro estágio mecânico de cominuição na qual o principal objetivo é a liberação das partículas dos minerais úteis dos minerais de ganga e permitir sua separação, através dos processos de concentração, em concentrados, rejeitos e produtos intermediários (WILLS; NAPPIER, 2006).

Normalmente, para haver uma liberação satisfatória do mineral valioso, é necessário que o minério seja reduzido a uma granulometria fina. Nessas condições, a fragmentação desenvolve-se por meio de três estágios, isto é, grossa, intermediária e fina ou moagem. Nos dois primeiros estágios, a fragmentação é realizada em britadores e no último estágio, em moinhos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

3.6.1 Equipamentos de Britagem

Para uma correta escolha do britador, além das características do material processado, outras premissas do projeto devem ser levadas em consideração. Alguns aspectos técnicos limitam e definem qual o tipo de equipamento a ser utilizado no processo. Entre esses fatores, ressaltam-se os parâmetros físicos, mecânicos e operacionais intrínsecos de cada tipo de equipamento, e outros como a energia requerida, as forças envolvidas, o desgaste de componentes, a disponibilidade física e a capacidade de produção máxima. Na Tabela 9, são listados alguns dos principais tipos de britadores e suas respectivas características.

Tabela 9 – Principais tipos de britadores e suas características.

Tipo de Britador	Mandíbulas	Giratório	Cônico	Impacto	Martelos	Sizer	Rolos Dentados
Serviço	Britagem 1° e 2°	Britagem 1°	Britagem 2°, 3° e 4°	Britagem 1°, 2°, 3° e 4°	Britagem 1°, 2°, 3°	Britagem 1°, 2°, 3°	Britagem 1° e 2°
Grau de Redução	5:1 (4:1 a 9:1)	8:1 (3:1 a 10:1)	3:1 a 7:1	6:1 a 40:1	20:1 a 100:1	3:1 a 6:1	2:1 a 6:1
Capacidade Proc. (t/h)	Baixa a média 1300	Baixa a alta até 10000	Baixa a média até 2400	Baixa a média até 2400	Baixa a média até 2800	Média a alta até 1000	Média a alta até 12000
Tamanho Máx. alimentação (mm)	Grandes tamanhos até 1500	Grandes tamanhos até 1600	até 500	até 1500	até 1500	até 2000	Limitado a distância entre rolos até 2500

Granul. do produto	Poucos finos. Top size alto p/ Lamelares.	Poucos finos. Top size menor que mandíbulas.	Distribuição uniforme, formato cúbico.	Muitos finos, formato cúbico ou arredondado.	Muitos finos, e formas cúbica.	Poucos grossos e teor de finos menor que outros equip.	Tamanho médio a fino.
Aplicação	Duro e abrasivo, Com sílica<30% e umidade<10% Pouco indicado p/ minerais coesivos e tendência a produzir partículas lamelares.	Abrasivo, umidade <5% e com tendência a produzir partículas lamelares, pouco indicado para minerais coesivos.	Duro e abrasivo, e para umidade <8%. Pouco indicado para minerais coesivos.	Abrasivo com sílica+óxido Metálicos <15%, umidade <8%, alto teor de argila com tendência a produzir partículas lamelares. Limitado a rochas frágeis ou elástica.	Dureza baixa a moderada, pouco abrasivo e sílica<3-8% e umidade<15-20%	Dureza média com sílica<10% p/ umidade <30% e minerais coesivos pegajosos.	Dureza baixa e média, pouco abrasivo com sílica <10% e umidade<30%.
Resis. Compressão (Mpa)	< 500	< 400	< 400	< 300	< 200	< 130	<180

Fonte: CARVALHO (2012).

3.6.2 Equipamentos de Moagem

A importância da moagem na indústria reside no fato que a maior parte da energia gasta no processamento mineral é absorvida pela operação de moagem, ou seja, a maior parte do custo do tratamento depende da mesma. Sendo assim, a moagem deve ser bem estudada, nas etapas de dimensionamento e escolha do equipamento e bem controlada na etapa de operacionalização da usina (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

A seguir serão abordadas as características dos tipos de moinhos mais empregados nas operações de moagem.

3.6.3 Moinhos Cilíndricos ou Rotativos

Os moinhos rotativos são basicamente cilindros constituídos por uma carcaça de ferro, revestida internamente com placas de revestimento de aço ou borracha, que giram sobre mancais e dentro da qual uma carga solta denominada corpos moedores (bolas, barras ou seixos) a qual se movimenta livremente (METSO, 2005). A Figura 9, mostra esquematicamente os componentes de um moinho rotativo.

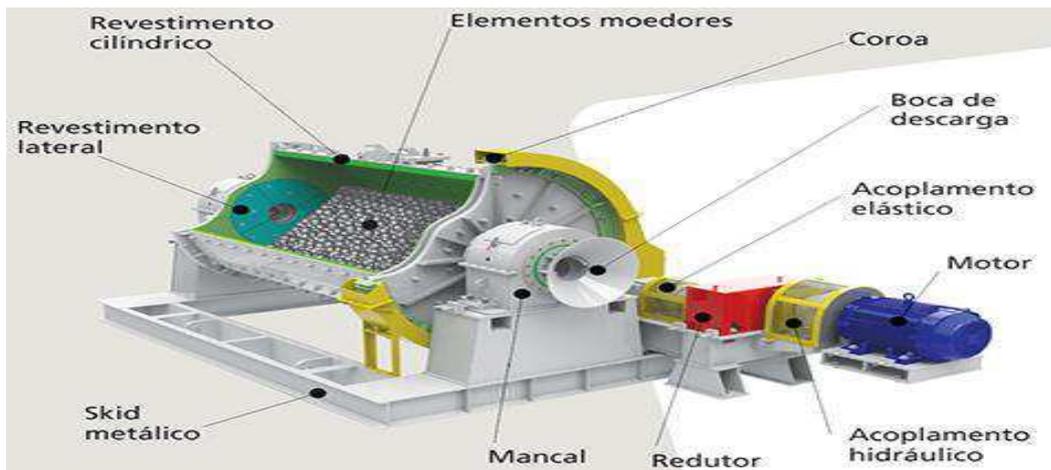


Figura 9 – Esquema de um moinho rotativo.
 Fonte: MÁQUINAS FURLAN (1970).

Os corpos moedores são elevados pelo movimento de rotação da carcaça até certa altura de onde caem sobre os outros corpos que estão na parte inferior do cilindro, sobre o minério que ocupa os interstícios das bolas e sobre as placas de revestimentos. Enquanto a força centrífuga for maior que a força da gravidade, os corpos permanecem na trajetória circular. No momento em que prevalecer o componente da força da gravidade que se opõe a força centrífuga, os corpos abandonam a trajetória circular e passam a seguir uma trajetória parabólica (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004), como ilustrado na Figura 10.

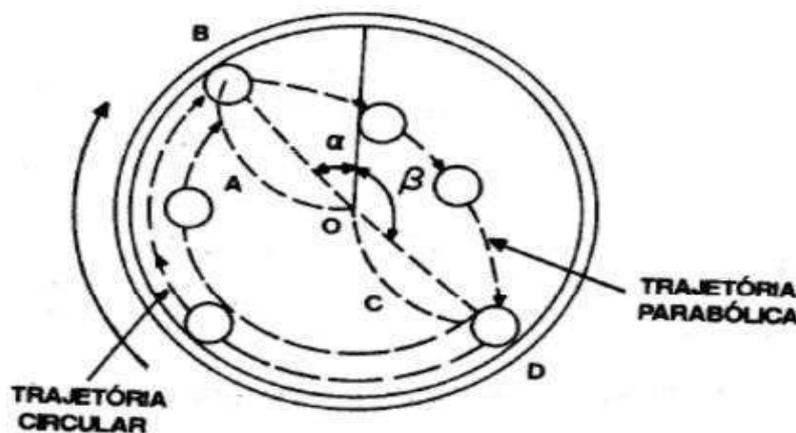


Figura 10 – Trajetória percorrida pelos corpos moedores.
 Fonte: FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ (2004).

O aumento da velocidade do moinho leva a um momento em que o corpo moedor fica preso à carcaça (pela ação da força centrífuga) durante a volta completa do cilindro. Nessas condições o corpo moedor não realiza qualquer trabalho e não há moagem. A velocidade do moinho em que isto ocorre chama-se velocidade crítica do moinho. A

velocidade de operação do moinho é sempre referida à percentagem de sua velocidade crítica (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

Os dois tipos de regime de operação do moinho são vistos na Figura 11 e são conhecidos por catarata e cascata. Os mesmos são determinados principalmente pela velocidade de rotação do moinho e pelo fator de enchimento do mesmo, isto é, a percentagem do volume do moinho ocupado com os corpos moedores, incluindo os vazios entre os mesmos (METSO, 2005).

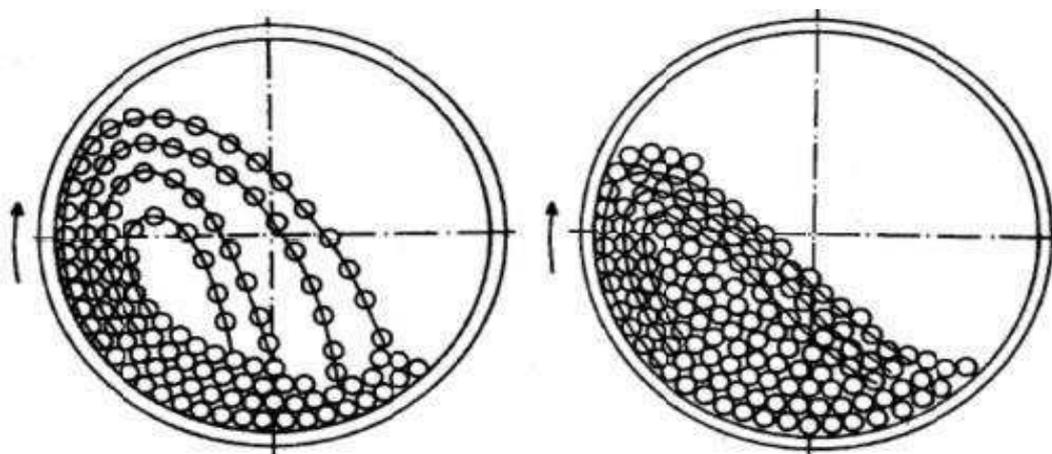


Figura 11 – Regimes de catarata e cascata, respectivamente.
Fonte: FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ (2004).

Na moagem em catarata, a velocidade do moinho carrega as bolas até uma posição bem elevada até que elas caem sobre as outras bolas e sobre a polpa causando fragmentação por impacto. Para aumentar ainda mais a energia do meio moedor, deve-se usar bolas maiores e baixo fator de enchimento (menos bolas). Esse regime é adequado para a fragmentação de material mais grosso e para evitar a produção de finos (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios deste trabalho foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios da UFCG, Laboratório de Cominuição do Instituto Federal da Paraíba, Campus Campina Grande-PB, no Laboratório de Caracterização de Engenharia de Materiais da UFCG, e na unidade de beneficiamento da empresa Mineração Florentino em Pedra Lavrada-PB.

As atividades experimentais foram desenvolvidas em três fases: Na primeira fase foram realizados os ensaios físicos. Na segunda fase a caracterização do feldspato albita, por meio das análises de Difração de Raios-X (DRX), Fluorescência de Raios-X (FRX), Análise Termogravimétrica (ATG) e Térmica Diferencial (ATD), e a terceira etapa os ensaios de britagem e moagem (Tabela 10).

O circuito de beneficiamento redimensionado na etapa final, é o da cooperativa de pequenos mineradores de Pedra Lavrada-PB (COOMIPEL), que prevê uma produção de 10 t/h, em uma cominuição a seco do minério pegmatítico. O trabalho é direcionado as duas rotas de operação desta unidade, sendo a do feldspato potássico e a albita. Foram redimensionados todos os equipamentos que fazem parte das etapas de britagem e moagem, com foco na granulometria exigida pela demanda da indústria de vidro (LUZ *et al.*, 2002).

Tabela 10 – Resumo das etapas e ensaios realizados neste trabalho.

Etapa	Ensaio
Ensaio Físicos	Determinação da Retenção
	Densidade
	Cone de Fusão
	Pastilha
	Perda ao Fogo
Caracterização	Difração de Raios-X
	Fluorescência de Raios-X
	ATG e ATD
Ensaio de Beneficiamento	Britagem
	Moagem
	Análise Granulométrica
Dimensionamento dos Equipamentos	Britador Primário
	Britador Secundário
	Peneiras
	Moinho de Bolas

4.1. COLETA DE AMOSTRAS

A ocorrência Alto da Serra Branca está localizada no município de Pedra Lavrada-PB, apresentando coordenadas geográficas S 06°50.492' e W 036°27.256'. A Figura 12 mostra a rodovia de acesso às áreas de pesquisa, distantes a 90 km de Campina Grande.

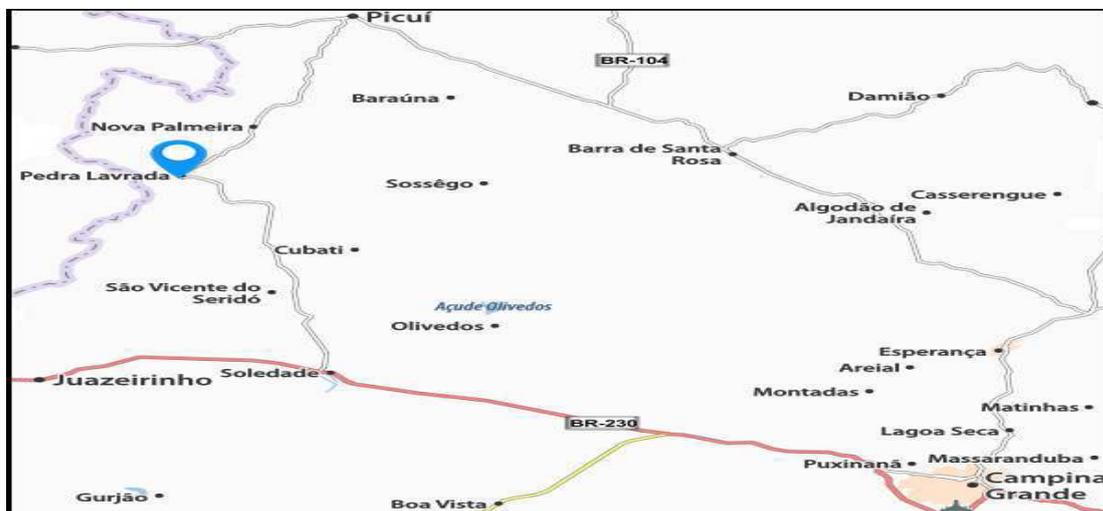


Figura 12 – Mapa de localização.
Fonte: VIAMICHELIN (2001).

O pegmatito Alto da Serra Branca é explorado pela Associação de Pequenos Mineradores de Pedra Lavrada-PB, e este foi o fornecedor das amostras de feldspato albita para o desenvolvimento desta pesquisa. As amostras de feldspato foram coletadas na frente de lavra, onde ocorre o desmonte e a seleção manual do material. Foram realizadas duas visitas para coleta das amostras. Na Figura 13 observa-se uma frente de lavra do feldspato albita.



Figura 13 – Frente de Lavra no Pegmatito Alto Serra Branca.

As amostras de feldspatos coletadas foram colocadas em sacos de plástico, e em seguida lacradas e identificadas (Figura 14).



Figura 14 – Amostras de feldspato albíta.

4.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

As amostras de minério pegmatítico coletadas no Garimpo Alto Serra Branca foram condicionadas em 01 saco de 50,0 kg, etiquetada e pesada, para realização dos ensaios em laboratório. Em seguida as amostras foram homogeneizadas, e retirada uma alíquota de aproximadamente 5,0 kg. Dessa amostra de 5,0 kg, uma parte foi moída em pulverizador CT-242 (Figura 15), até a granulometria < 200 malhas, que foi usada nos ensaios de caracterização mineralógica. Dos 45,0 kg restantes, foi separado 15,0 kg da amostra para ser usada nos ensaios de britagem e moagem. Todos os procedimentos realizados foram conduzidos a fim de minimizar a contaminação da amostra por outros minerais. Previamente, foram efetuadas a homogeneização e quarteamento das amostras. Esta parte do trabalho foi realizado no Laboratório da empresa Mineração Florentino Ltda.



Figura 15 – Pulverizador usado na preparação de material para análise química.

4.3 ENSAIOS FÍSICOS

Nesta etapa, os trabalhos foram direcionados com objetivo de determinar algumas propriedades físicas do feldspato albita. Esses ensaios foram: Determinação da retenção, densidade, cone de fusão, e pastilha (perda ao fogo e retração). De acordo com MANNING (1995), a realização de ensaios de queima de minerais industriais é importante, principalmente, na faixa de temperaturas de 150 °C (plásticos manufaturados) até 1.600 °C (vidro manufaturados).

Para cada tipo de mineral há um comportamento característico durante a queima. Alguns apresentam excelente fusibilidade outros, no entanto são muito refratários. Quanto maior for o percentual de sílica, maior a refratariedade. O quartzo é o principal exemplo de material refratário, com ponto de fusão acima de 1700 °C (ABCERÂMICA, 2011), quando submetido a esse ensaio não apresenta nenhuma fusibilidade.

Os feldspatos possuem uma boa fusibilidade, apresentando superfície vítrea e brilho, com coloração branca e sem viscosidade. Em alguns casos apresentam transparência após a queima, isso se deve ao grau de pureza do material, sendo considerado material de excelente qualidade. Os feldspatos, normalmente, apresentam uma pequena retração durante a queima, outros, no entanto, sofrem uma expansão durante o processo, devido à presença de cálcio na sua composição química, mantendo o formato cônico, como resultado do ensaio de fusibilidade.

4.3.1 Ensaio de Retenção

Uma vez o material na granulometria de 200 malhas (Figura 16) foi separado 30g para o teste. Foram usadas três peneiras, a primeira peneira de 100, a segunda de 200, e a terceira de 325 malhas. E esse material sobre o conjunto de peneiras, foi lavado em água corrente da torneira (Figura 17).

Ao terminar a lavagem, o material retido nas peneiras é colocado em pratos de vidro. E depois estes pratos são levados para estufa para serem secados, por um tempo de 15 min e temperatura de 150°C (Figura 18).



Figura 16 – Material após moagem para peneiramento.



Figura 17 – Peneiramento sob água corrente.



Figura 18 – Amostra em estufa para secagem.

4.3.2 Ensaio de Densidade

Pesou-se 15g do feldspato sódico com granulometria $< 200 \#$, numa balança digital da BEL modelo 5000 com capacidade de até 5,0 kg, e depois foi colocado em uma proveta de 100ml (Figura 19), com 60ml de água destilada.



Figura 19 – Amostra em proveta.
Fonte: Autoria Própria.

Em seguida observou-se e anotou o resultado do deslocamento (volume final).

Materiais utilizados:

- Proveta graduada de 100 ml.
- Balança eletrônica de precisão (BEL modelo 5000).
- Água destilada.

4.3.3 Ensaio de Cone de Fusão

O teste foi efetuado com 10g da amostra de feldspato albíta na malha ≤ 200 . Inicialmente pesou-se a amostra (Figura 20), e em seguida foi adicionado 10% de água destilada para dar umidade ao material. Esse material é preparado em um recipiente e peneirado, depois é levado ao molde do cone (Figura 21), e em seguida vai se encaixando até ficar no formato adequado.



Figura 20 – Pesagem da amostra.



Figura 21 – Molde do cone e acessórios.

Ao concluir essa fase, esse molde é levado ao forno mufla (Figura 22), por um tempo de 1h30min, e temperatura de 1.250°C. Ao passar esse tempo, a mufla é desligada, e deverá permanecer repousando por 2 h para voltar a temperatura ambiente.



Figura 22 – Cone no Forno Mufla.

4.3.4 Ensaio de Pastilha

O ensaio foi realizado com 30g da amostra, com granulometria ≤ 200 malhas, e adicionado 7% de água destilada. Após umedecido, o material é colocado no molde (Figura 23).



Figura 23 – Moldagem da pastilha.

Após o preenchimento do molde, o mesmo é conduzido para a prensa (Figura 24), e nessa é aplicada uma força de 2,55 kgf. A seguir inverte-se a posição do molde, na prensa, e é aplicada uma nova força. Logo é retirado o material prensado. Após a conformação da pastilha, essa é colocada no forno, durante 24 h e a uma temperatura de 1.250°C.



Figura 24 – Prensagem da pastilha.

Ao término de tempo de 24 h, a amostra é retirada (Figura 25) e será feito algumas medições.



Figura 25 – Pastilha de albita após queima.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

4.4.1 Difração de Raios X (DRX)

O emprego da Difractometria teve como objetivo a identificação dos minerais constituintes na amostra do minério e do feldspato albita. Essas foram moídas em um pulverizador até a granulometria < 200 malhas. Em seguida foram preparadas para análise no equipamento. As amostras foram analisadas no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais – UFCG, em um difratômetro XRD 6000 da Shimadzu (Figura 26). A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (40 kV/30mA); a velocidade do goniômetro foi de 2° por min e passo de $0,02^\circ$. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões contidos em banco de dados.



Figura 26 – Difratorômetro de Raios-X.

4.4.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

Através da FRX foram identificados os elementos em termos quantitativos presentes na amostra de albita. As amostras foram previamente compactadas em pastilha. Foi utilizado para determinação dos elementos, presentes na forma de óxidos, um equipamento EDX 720 da Shimadzu (Figura 27). A análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG.



Figura 27 – EDX 720 da Shimadzu.

4.4.3 Análise Termogravimétrica (ATG) e Térmica Diferencial (ATD)

As análises, termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD) foram realizadas em um equipamento da Shimadzu TA 60, com taxa de aquecimento de 12,5 °C/min., com atmosfera de ar comprimido. A temperatura máxima para ambos os casos foi até 1.000 °C e o padrão utilizado na ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG.

4.5 ENSAIOS DE BRITAGEM E MOAGEM

Os ensaios de britagem e moagem foram realizados no laboratório de Tratamento de Minério da UFCG, e no Laboratório de Cominuição do Instituto Federal da Paraíba-IFPB. Para realização dos ensaios foram usados 15,0 kg de amostras de feldspato albíta, um britador de mandíbulas, um moinho de bolas, o agitador de peneiras tipo rotap e um conjunto de peneiras da série Tyler.

Nessa etapa, foi determinado o *top size*. O material que apresentava tamanho maior que 12,5 cm (5,0 polegadas), foi fragmentado em pedaços menores. A seguir, as amostras com tamanho < 12,5 cm foram submetidas a uma fragmentação primária (Figura 28).



Figura 28 – Fragmentação primária em um equipamento de corte.

O material com tamanho $< 12,5$ cm foi britado neste equipamento de corte com intuito de redução da granulometria a $< 1,0$ polegada. Esse material alimentou o britador de mandíbula, onde foi realizado a britagem secundária.

O ensaio de britagem secundária, realizado em um britador de mandíbulas (Figura 29), com abertura da boca de alimentação de 25 mm, e descarga de 5,0 mm. O britador de mandíbulas foi alimentado com 15 kg de amostra. A granulometria do material foi reduzida a $< 5,0$ mm (Figura 30).



Figura 29 – Britagem secundária efetuada em britador de mandíbulas.



Figura 30 – Material após britagem secundária.

As amostras de feldspato albíta foram preparadas aplicando as técnicas de amostragem, homogeneização e quartejamento, através de cone e pilhas (SAMPAIO; SILVA, 2007).

Após a britagem, a amostra foi homogeneizada (Figura 31) e quartejada (Figura 32) separando-se 15 lotes, cada um de 1,0 kg, totalizando os 15,0 kg da alimentação. Essas amostras foram obtidas de acordo com os procedimentos adequados de amostragem e preparação. Posteriormente, esse material foi armazenado, e guardado para não ocorrer alguma possível contaminação e/ou alteração.



Figura 31 – Homogeneização da amostra.



Figura 32 – Quarteamento no quarteador Jones.

A etapa seguinte à britagem foi a moagem. Na moagem, a granulometria do produto é reduzida com objetivo de alcançar a malha 200. Dessa forma, é importante o controle do tempo de moagem e outros parâmetros, bem como o equipamento utilizado, de forma a se obter um produto com a granulometria desejada.

Nesse caso, realizou-se a moagem em um moinho de porcelana com bolas de quartzo e alumina (Figura 33), equipamento de bancada. No ensaio, foi usado um total de 3,0 kg de amostra de albita, e em cada ensaio 500,0 g. O tempo usado para reduzir a granulometria do material foi estabelecido em intervalos de 10 min. Assim, foi empregado no ensaio os seguintes tempos de moagem, de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min. Esses tempos foram baseados nas características do material a ser moído (SAMPAIO; BARBATO, 2007).



Figura 33 – Moinho de bolas e acessórios.

Ao se tratar de uma amostra de feldspato albita, é recomendável a utilização de um moinho de porcelana com bolas de alumina, e assim evitar a possível contaminação das amostras com ferro. Esse cuidado é importante, para preservar as características do mineral, principalmente para fins comerciais.

Para realização dos ensaios de moagem em laboratório foram usados os seguintes equipamentos:

- Um moinho de bolas, com Jarra de porcelana, com dimensões de 120 mm de diâmetro e 185 mm de comprimento (Figura 34);
- 82 Esferas de quartzo, com diâmetros de 15, 18, e 24 mm, e 50 esferas de alumina de 26 mm de diâmetro;
- Um conjunto de peneiras de laboratório da série Tyler e um rotap de bancada
- Um cronômetro para controle do tempo de moagem;
- Recipientes para coleta de amostras.



Figura 34 – Jarra de porcelana com carga de corpos moedores e material a ser moído.

Após a moagem, o material foi retirado e manuseado com muito cuidado para evitar perdas e contaminação, e em seguida foi realizado o peneiramento.

4.6 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

Este ensaio foi realizado depois de etapa de britagem, e foram determinadas as porcentagens das partículas em função de sua granulometria. A amostra de feldspato passou por uma série de peneiras colocadas, no sentido de maior diâmetro para o menor

diâmetro, sendo esta última peneira a de 200 malhas (0,074 mm). Na realização dos ensaios, teve-se a necessidade de usar apenas 03 peneiras em cada procedimento do peneiramento, devido a capacidade permitida pelo equipamento Rotap. Desta forma, foram feitos 05 ensaios de peneiramento para poder usar todas as peneiras, e determinar a distribuição granulométrica da britagem do material.

Amostra

A amostra analisada foi proveniente do material coletado na ocorrência Alto da Serra Branca, após submetido à amostragem e homogeneização.

Materiais e Equipamentos

- Série Tyler de peneiras: 4, 6, 8, 10, 14, 20, 28, 35, 48, 65, 100, 150 e 200 malhas.
- Rotap de peneiras.
- Balança *top loader* digital.
- Sacos plásticos.

Procedimentos

As peneiras selecionadas foram colocadas no *rotap* (Figura 35). O peneiramento a seco foi realizado da seguinte forma: Pesou-se a amostra, o tempo de peneiramento do *rotap* foi de 20 min, e o material retido em cada peneira foi pesado, etiquetado o armazenado em sacos plásticos.



Figura 35 – Disposição das peneiras da Série de Tyler sob o rotap.

4.7 REDIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DA COOMIPEL

4.7.1 Dimensionamento dos Britadores de Mandíbulas

Para selecionar um determinado britador com pretensão do seu uso em um dado serviço, este equipamento deve atender uma série de exigências.

Na realização do dimensionamento dos britadores primário e secundário, foi empregado: curvas granulométricas, aplicação das tabelas dos fabricantes dos equipamentos (manual da Metso), bem como as características próprias do material, e com esses dados foram determinadas algumas condições.

O procedimento adotado envolveu as seguintes etapas:

(a) Consulta às tabelas de especificação técnica definindo os equipamentos que estão dentro das condições exigidas (Tabela 11) ;(b) Verificação das capacidades de produção de cada equipamento selecionado, observando-se se os mesmos estão dentro das condições especificadas (Tabela 12) ;(c) Observação das curvas granulométricas do tipo de equipamento para definir melhor as condições de operação (Figuras 36) ;(d) Determinações das condições de recepção, de processo, e capacidade. O britador só brita partículas menores que 0,8 A. Então, o tamanho máximo da alimentação (*Top size*) é condicionado pela dimensão da boca de alimentação do equipamento (A_0).

Tabela 11 – Especificações técnicas de britadores de mandíbulas.

Modelos	Unid	Britadores de Mandíbulas						
		2015E	3020E	4230E	6240E	8013E	9026E	12040E
Boca	mm	200x150	300x200	420x300	620x400	800x130	900x60	1200x400
Peso	kg	545	1720	3000	7000	3350	5800	14500
Volante- diâmetro	mm	750	800	900	1075	850	900	1300
Rotação	rpm	380	350	350	280	350	300	280
Motor-1200 rpm	hp	10	15	25	40	25	40-50	75-100
Polia-diâmetro	mm	172	260	280	265	250	240	330
Correias V	Qte	4xB	5xB	4xC	5xC	4xC	5xC	8xD
Altura (h)	mm	680	1160	1370	1630	1065	1275	1855
Comprimento (L)	mm	750	1050	1300	1600	1200	1550	2230
Largura (B)	mm	760	1100	1250	1530	1710	1865	2500

Fonte: METSO (2005).

Tabela 12 – Capacidade em t.h⁻¹ (para material com densidade aparente de 1,6 t.m⁻³)

Máquina	Movimento do queixo	Abertura de saída-posição fechada APF – mm (pol.)									
		6 (1/4)	12 (1/2)	20 (3/4)	30 (1 3/16)	40 (1 5/8)	50 (2)	75 (3)	100 (4)	125 (5)	150 (6)
2015	1/2"	2 3	3 5	5 6,5	6 8	8 10					
3020	3/4"			8 10	9 13	14 16	17 22				
4230	3/4"				12 16	16 20	20 25	25 33			
6240	3/4"				25 35	35 45	45 58	65 85	70 88		
8013	1/2"	6 8	10 13	13 18	19 26						
9026	3/4"			25 33	28 36	40 50	60 76	75 95			
12040	1"					65 85	87 124	118 153	157 200	190 250	210 270

Fonte: METSO (2005).

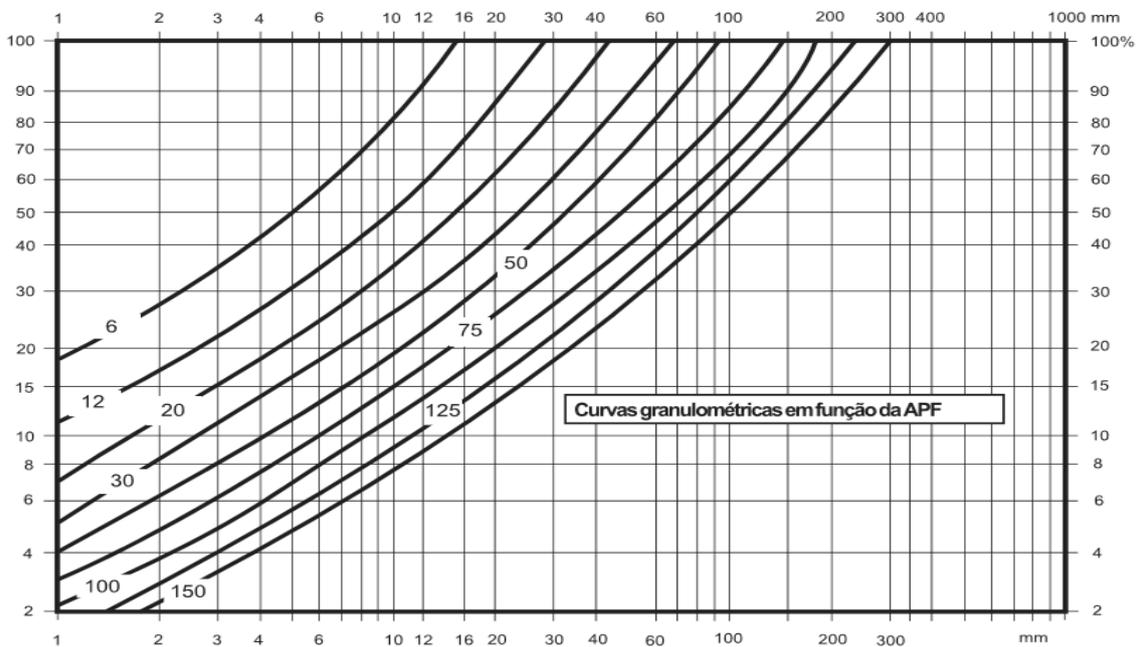


Figura 36 – Curvas granulométricas para britadores e rebitadores (% passante x granulometria, mm). Fonte: METSO (2005).

Para atender as exigências de seleção dos equipamentos junto com a realização dos cálculos necessários para determinar as condições dos britadores, foram abordados os seguintes itens:

a) Condição de Recepção

A distância entre as duas mandíbulas na extremidade superior do britador é muito importante e é denominada gape.

$$\text{Gape} = \frac{\text{tamanho da maior partícula da alimentação}}{0,8 \text{ a } 0,85} \quad (1)$$

b) Critério de Taggart

O britador possui uma capacidade que varia com o seu tamanho e, para cada tamanho, com a abertura. Taggart estabeleceu um critério (x) para optar por britadores de mandíbulas ou giratórios.

$$x = \frac{\text{vazão em t/h}}{(\text{gape em polegadas})^2} \quad (2)$$

Se $x > 0,115$, sugere-se adotar britador giratório, caso contrário recomenda-se o britador de mandíbulas (CHAVES; PERES, 2003).

c) Condição de Processo

O britador de mandíbulas deve gerar uma distribuição granulométrica estabelecida pelo engenheiro responsável pela unidade de beneficiamento. No presente trabalho, a granulometria do material na alimentação do britador primário corresponde a 20 cm (200 mm), com uma razão de redução de 5:1.

d) Capacidade

O britador tem uma capacidade que varia com o seu tamanho e, com as dimensões da boca de alimentação (A_0). Devido a operação de carga e descarga dos caminhões, o britador fica de tempo em tempo ocioso. Em consequência disso é necessário utilizar um fator de serviço, para que o britador possa atender à capacidade necessária. Esse Fator é 1,5 para os britadores primários e 1,25 para os demais. A determinação da capacidade do britador é dada por:

$$C = \frac{\text{Fator de serviço} \times \text{vazão de alimentação}}{\text{Densidade aparente}} \quad (3)$$

4.7.2 Dimensionamento da Peneira Vibratória

Os equipamentos de peneiramento são dispositivos muito importantes em uma usina de beneficiamento. Dessa forma, no processo de seleção se deve ter o máximo de atenção na escolha das dimensões e tipo adequado.

As peneiras são definidas inicialmente pelas suas dimensões e pelo tipo de abertura (quadrada, retangular, circular e alongada). As informações utilizadas para seleção das peneiras (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010) são:

a) Características físicas do material a ser peneirado, tais como:

Densidade aparente e % de umidade; tamanho máximo da alimentação; distribuição granulométrica; forma das partículas; e % de argila.

b) Capacidade;

c) Faixas de separação do produto;

d) Eficiência desejada;

e) Tipo de serviço;

f) Limitação ou não de espaço e peso;

g) Grau de conhecimento do material e do produto desejado.

O dimensionamento da peneira da cooperativa consiste em calcular as dimensões da sua superfície em função da capacidade requerida, ou seja, da quantidade de material com características e condições determinadas que deverá passar pelo equipamento por um tempo determinado. No caso das peneiras, duas condições independentes devem ser atendidas, a área total da tela (A) e espessura do leito (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Área total "A" é ser definida por:

$$A = \frac{S}{C d F_m} \quad (4)$$

Onde:

S = Vazão ou fluxo de alimentação, (t/h);

C = Capacidade básica de peneiramento (t/h x 0,9 m²);

$$d = \frac{\text{peso específico aparente do material}}{1.602} \quad , \quad (5)$$

Sendo d : Densidade aparente do material

F_m = Fatores modificadores

a) Capacidade básica (C)

Na Figura 37 é apresentada a curva que fornece os valores de C para as várias aberturas, baseadas num material com densidade aparente de 1.602 kg.m⁻³.

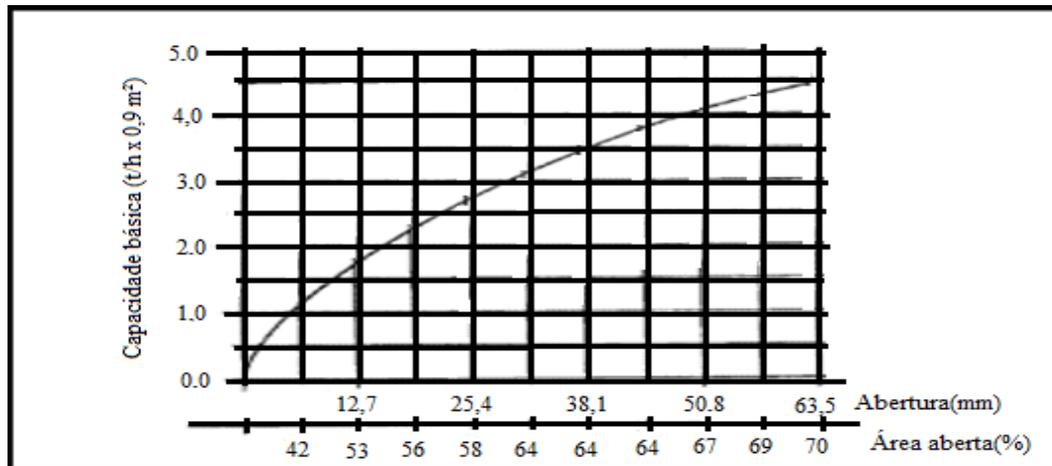


Figura 37 – Capacidade básica para material com densidade aparente de 1.602 kg/m³. Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

b) Fatores modificadore (Fm)

As variáveis e interrelações entre essas variáveis que afetam a eficiência de peneiramento de um determinado material, e que afetam também a determinação do tamanho da peneira são:

Fator de Finos (F₀)

Esse fator depende da quantidade de material na alimentação, que é menor do que a metade do tamanho da abertura no deck. O fator de finos para um determinado deck, sempre será calculado em relação à alimentação desse deck.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de F₀ para as várias eficiências de peneiramento e para vários fatores de eficiência (E₀).

O Fator de eficiência (E₀) é dado por:

$$E_0 = \frac{P}{aA} \times 100$$

(6)

Onde:

E₀ = Fator de eficiência; P = passante; A = alimentação

a = percentagem de material na alimentação menor que a abertura considerada.

A eficiência de peneiramento (%) é expressa como uma razão entre a quantidade de material que passa por uma abertura determinada e a quantidade na alimentação que deveria passar.

Tabela 13 – Fatores de finos (F) e de eficiência do peneiramento (E)

Eficiência de Peneiramento (%)	Fator Finos (F₀)	Fator Eficiência (E₀)
0	0,44	-
10	0,55	-
20	0,70	-
30	0,80	-
40	1,00	-
50	1,20	-
60	1,40	-
70	1,80	2,25
80	2,20	1,75
85	2,50	1,50
90	3,00	1,25
95	3,75	1,00

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

Fator de Abertura (B).

Esse fator compensa a tendência das partículas ficarem retidas na superfície de peneiramento devido ao tipo de abertura da superfície. A Tabela 14 apresenta estes valores.

Tabela 14 – Fatores de abertura

Tipos de abertura	Razão (r) comprimento/largura	Fator B
Quadradas e retangulares	$r < 2$	1,0
Retangulares	$2 < r < 4$	1,2
Retangulares	$4 < r < 25$	1,2
Barras paralelas	$r > 25$	1,4*
*paralelo ao fluxo		

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

Fator de Deck (D_0)

Esse fator leva em consideração a estratificação que ocorre nos decks reduzindo assim a área de peneiramento. Na Tabela 15 são apresentados os fatores para peneiras de até três decks.

Tabela 15 – Fatores de decks.

Deck	Fator
1°	1,00
2°	0,90
3°	0,80

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

Na determinação da espessura do leito de material que passa no deck, utiliza-se a Figura 38. Essa figura representa a vazão de minério para cada centímetro de altura do leito em função da largura da peneira e do peso específico do minério para um ângulo de inclinação de 18° .

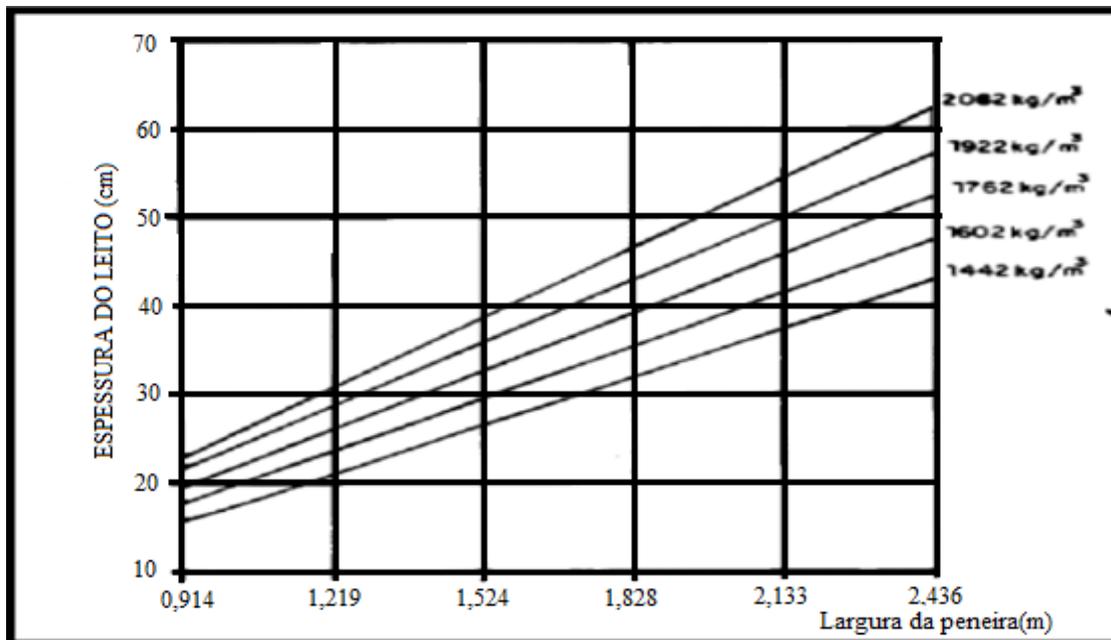


Figura 38 – Espessura do leito para uma velocidade de fluxo de $18,29 \text{ m.s}^{-1}$

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

Por outro lado, para seleção da peneira que atenda as características do material e da unidade de beneficiamento foi empregada a Tabela 16. Essa tabela mostra as

informações referentes ao tamanho do material na alimentação e a abertura da grelha que é possível de ser utilizada.

Tabela 16 – Tamanho máximo de alimentação de telas e placas da Peneira Vibratória Inclinada M.

Peneira M	Malha/ Tela Mínima	Malha/ Tela Máxima	Placa Máxima	Tamanho máx. Alimentação da Tela	Tamanho máx. Alimentação da Placa
20008/1A	1/4"	3"	4"	6"	8"
25010/1A	1/4"	3"	4"	8"	10"
30012/1A/2 ^a	1/4"	4"	4"	10"	12"

Fonte: METSO (2005).

4.7.3 Dimensionamento do Moinho de Bolas de Seixos

No dimensionamento do moinho, inicialmente deve-se determinar a energia necessária para produzir a moagem desejada e na granulometria almejada. Existem diversas fórmulas empregadas para essa finalidade, porém vamos utilizar a equação de Bond, que é a mais usada, devido a que fornece bons resultados (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O método de Bond baseia-se na equação por ele desenvolvida e no valor de Índice de Trabalho (WI-Tabela 17), cuja metodologia de determinação foi também por ele estabelecida.

Temos a seguinte equação:

$$E = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (7)$$

Onde:

E = Energia necessária para moagem de uma ton curta de material; KWh/st;

WI = Índice de trabalho; KWh/st;

P₀ = Granulometria do produto no qual 80% passam numa determinada peneira de referência; em μm.

F = Granulometria da alimentação no qual 80% passa numa determinada peneira de referência; em μm.

Tabela 17 – WI kwh/t curta médios de alguns minerais e minérios.

Mineral	Moinho de barras			Moinho de bolas		
	Nº de testes	Média	Intervalo	Nº de testes	Média	Intervalo
Alumina	3	12,2	9-17	6	17,9	7-34
Barita	6	5,7	2-12	7	5,8	4-9
Argila	4	12,5	6-18	11	10,8	4-23
Feldspato	7	11,0	8-16	7	11,7	9-14

Adaptada (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A granulometria de alimentação usado nos testes de Bond é de 13.200 μm (13,2 mm) para o moinho de barras e 3.350 μm (3,35 mm) para o moinho de bolas. No entanto, qualquer moagem que fuja dessas condições deve ter o valor da energia calculada pela equação de Bond corrigida por fatores de correção.

A seguir, os fatores de correção de Bond e Rowland que foram utilizados:

EF_1 – Fator que corrige o tipo de moagem. Quando a moagem for a seco deve-se usar o valor de $EF_1 = 1,3$ que exprime o fato que a moagem a seco é 30% menos eficiente.

EF_2 – Fator que corrige o tipo de circuito. Para o circuito aberto em moinho de bolas: Requer uma energia extra quando comparado ao circuito fechado. A Tabela 18 apresenta o fator de ineficiência recomendado.

Tabela 18 – Fator de ineficiência em circuito aberto

% Passante na Malha de Controle	50	60	70	80	90	92	95	98
Fator	1,035	1,05	1,10	1,20	1,40	1,46	1,57	1,70

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

EF_3 – Fator que corrige o diâmetro do moinho. A Tabela 19 descreve os valores desses fatores para os moinhos mais comuns. Esse fator só pode ser calculado após a escolha prévia do moinho.

Tabela 19 – Fator de eficiência do diâmetro do moinho

Diâmetro do Moinho (m)		
Interno Carcaça	Interno Revestimento	EF ₃
0,914	0,79	1,25
1,00	0,88	1,23
1,22	1,10	1,17
1,52	1,40	1,12
1,83	1,79	1,075
2,00	1,82	1,060
2,13	1,98	1,042
2,44	2,29	1,014
2,59	2,44	1,000
2,74	2,59	0,992
2,90	2,74	0,977
3,00	2,85	0,970
3,05	2,90	0,966
3,02	3,05	0,956
3,35	3,20	0,948
3,51	3,35	0,939
3,66	3,51	0,931
3,81	3,66	0,923
3,96	3,81	0,914
4,00	3,85	0,914

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

EF_4 – Fator que corrige a granulometria de alimentação com tamanho excessivo

$$EF_4 = \frac{Rr + (Wl - 7) \left(\frac{F - F_0}{F_0} \right)}{Rr} \quad (8)$$

$$Rr = \text{razão de redução} = \frac{F}{P}$$

F_0 = tamanho ótimo da alimentação para moinhos de bolas;

$$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{Wl}} \quad (9)$$

EF_5 – Fator que corrige a energia adicional para moagens extremamente finas (d_{80} menores que 200 malhas ou 0.074 mm). A expressão para determinar esse fator é:

$$EF_5 = \frac{P + 10,3}{1,145 \times P} \quad (10)$$

EF_6 – Fator que corrige a Relação de redução no moinho de barras;

EF_7 – Fator que corrige a Relação de redução no moinho de bolas, é dada por:

$$EF_7 = \frac{Rr-1,22}{Rr-1,35} \quad (11)$$

Essa equação só deve ser usada quando a relação de redução no moinho de bolas for menor que 6.

A partir da determinação da potência consumida por um moinho de bolas, é realizada a identificação das dimensões desse equipamento através da Tabela 20. Para comprimentos diferentes dos tabelados, a potência consumida varia na proporção direta do comprimento.

Tabela 20 – Características de moinho de bolas

Diâmetro Nominal		Compri. Nominal		Velocidade do Moinho			Potência do Moinho (HP)						Diâmetro (D) interno ao revest.	
							Descarga por overflow % vol. da carga			Descarga por diafragma % vol. da carga				
m	pés	m	pés	rpm	%Vc	ft/min	35	40	45	35	40	45	m	pés
0,91	3,0	0,91	3,0	38,7	79,9	304	7	7	7	8	8	9	0,76	2,5
1,22	4,0	1,22	4,0	32,4	79,1	356	19	20	21	22	24	25	1,07	3,5
1,52	5,0	1,52	5,0	28,2	78,1	399	42	45	47	49	52	54	1,37	4,5
1,83	6,0	1,83	6,0	25,5	78,0	441	30	85	89	93	99	103	1,68	5,5
2,13	7,0	2,13	7,0	23,2	77,2	474	137	145	151	158	168	175	1,98	6,5
2,44	8,0	2,44	8,0	21,3	76,1	502	215	228	237	249	265	275	2,29	7,5
2,59	8,5	2,59	8,5	20,4	75,3	513	250	266	277	290	308	321	2,44	8,0
2,74	9,0	2,74	9,0	19,7	75,0	528	322	342	356	373	397	413	2,55	8,5
2,89	9,5	2,89	9,5	19,15	75,0	541	367	390	406	425	483	471	2,71	9,0
3,05	10,0	3,05	10,0	18,65	75,0	557	462	481	512	535	570	593	2,89	9,5
3,20	10,5	3,20	10,5	18,15	75,0	570	519	552	575	602	640	607	3,05	10,0
3,35	11,0	3,35	11,0	17,3	72,8	565	610	848	676	708	753	784	3,17	10,4
3,51	11,5	3,51	11,5	16,75	72,2	574	674	718	747	782	832	867	3,32	10,9
3,66	12,0	3,66	12,0	16,3	71,8	584	812	854	900	942	1003	1044	3,47	11,4
3,81	12,5	3,81	12,5	15,95	71,8	596	886	954	993	1040	1106	1152	3,63	11,9
3,96	13,0	3,96	13,0	15,60	71,7	607	1033	1130	1127	1233	1311	1365	3,76	12,4
4,11	13,5	4,11	13,5	15,30	71,7	620	1189	1269	1321	1379	1409	1532	3,93	12,9
4,27	14,0	4,27	14,0	14,8	70,7	623	1375	1464	1527	1595	1699	1771	4,08	13,4
4,47	14,5	4,47	14,5	14,55	70,8	635	1482	1598	1656	1730	1842	1921	4,24	13,9
4,57	15,0	4,57	15,0	14,1	69,8	638	1707	1817	1893	1980	2107	2196	4,39	14,4
4,72	15,5	4,72	15,5	13,85	69,6	648	1838	1956	2037	2132	2234	2363	4,54	14,9
4,88	16,0	4,88	16,0	13,45	68,9	651	2084	2217	2309	2417	2521	2678	4,69	15,4
5,03	16,5	5,03	16,5	13,20	68,7	659	2229	2370	2468	2585	2750	2803	4,85	15,9
5,18	17,0	5,18	17,0	13,0	68,7	670	2505	2764	2883	3010	3206	3344	5,00	16,4

Fonte: CHAVES; PERES (2003).

Tamanho dos Corpos Moedores

Na realização do processo de moagem é necessário identificar, e determinar o tamanho do meio moedor empregado na moagem e as respectivas porcentagens. Esse parâmetro é um dos principais fatores que afetam a eficiência e a capacidade do moinho. O tamanho pode ser calculado usando-se a equação (12) e posteriormente, com os devidos ajustes, se for o caso. A determinação do diâmetro máximo da bola é de grande importância, pois é usual se fazer a reposição periódica do peso dos corpos moedores desgastados, utilizando-se apenas esse tipo de meio moedor. A partir das fórmulas estabelecidas por Rowland, calculam-se os diâmetros máximos dos corpos moedores, pela fórmula a seguir:

Moinho de Bolas:

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho W I}{\%Vc \sqrt{D}}} \quad (12)$$

Onde:

B_{\max} = diâmetro máximo das bolas; em mm;

F = granulometria em que passa 80% da alimentação; em mm;

WI = índice de trabalho; em kwh/st;

ρ = massa específica do minério; em g/cm³;

%Vc = Velocidade de operação do moinho; % da velocidade crítica;

D = diâmetro interno ao revestimento da carcaça do moinho; em m;

K = fator que depende do tipo de moagem (ver Tabela 21)

Tabela 21 – Valores de K para diversos tipos de moinho e tipos de moagem.

Tipo de Moinho	Valores de K
Moinho de bolas, com descarga por transbordo, a úmido	350
Moinho de bolas, com descarga por grade, a úmido	330
Moinho de barras a seco	335

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

Uma outra variável importante, é identificar o desgaste dos corpos moedores após sua utilização na operação de moagem, ao final de algum tempo, é observado uma distribuição contínua de diâmetros, o que é denominado carga de equilíbrio. Por esse motivo é recomendável que se dê a partida do moinho com uma carga de meio moedor próxima a carga de equilíbrio (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Ao se determinar o tamanho máximo do diâmetro da bola, consultam-se as tabelas fornecidas por Bond e determina-se a percentagem em peso de cada diâmetro que vai ser utilizado (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). A Tabela 22 apresenta a carga inicial de bolas.

Tabela 22 – Carga inicial de bolas (% peso)

Diâmetro (mm)	Diâmetro de reposição (mm)						
	115	100	90	75	65	50	40
115	23						
100	31	23					
90	18	34	24				
75	15	21	38	31			
65	7	12	20,5	39	34		
50	3,8	6,5	11,5	19	43	40	
40	1,7	2,5	4,5	8	17	45	51
25	0,5	1	1,5	3	6	15	49
Total	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios realizados foram de porcentagem retida, densidade, cone de fusão e pastilha (perda ao fogo).

5.1.1 Determinação da retenção (% retida).

A determinação do tamanho das partículas, ou seja, a malha e a % retida (retenção) do material acima da granulometria, são exigidas pelas empresas compradoras do material, neste caso a indústria de cerâmica e vidro. Para o caso específico da empresa Mineração Florentino Ltda, as especificações das malhas solicitadas são as de aberturas de 100 malhas (0,147 mm) e/ou 200 malhas (0,074 mm), e em relação à % de retenção, os valores variam de acordo como o cliente, conforme Tabela 23.

Tabela 23 – Especificações da % de retenção exigidas pelas indústrias de vidro e cerâmica.

Substância	Malha (mesh)	Retenção (%)
Feldspato potássico	200	5
Feldspato potássico	100	7
Feldspato albita	200	8

Segundo a Tabela 23, para o feldspato albita, numa granulometria < 200 malhas, a % retida deve ser, no máximo 8,0 %.

O ensaio de retenção foi realizado com uma massa de 30,0 g de feldspato albita, e um tempo de moagem durante um tempo de 30 min. Os resultados de distribuição granulométrica encontram-se apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Distribuição granulométrica do ensaio de retenção.

Linha	Peneira (mm)	Peso (g)	Retida (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	0,147	0,15	1,65	1,65	98,34
2	0,074	0,23	2,53	4,18	95,81
3	0,044	8,7	95,81	99,99	0
Total		9,08			

Ao término do ensaio granulométrico, é determinada a porcentagem retida para as peneiras de 100, 200, e 325 malhas. Na Tabela 24, observa-se que o percentual de retido na malha 100 (0,147 mm), corresponde a 1,65 %. No caso do percentual de retido na

malha 200 (0,074 mm), apresentou um valor de 2,53%, estando em ambos os casos, um valor inferior aos 8% exigidos pelos clientes (Tabela 23).

5.1.2 Determinação da Densidade

Pesou-se 15g do feldspato albíta numa balança digital, e depois foi colocado em uma proveta de 100 ml, com 60 ml de água destilada (Volume inicial). O Volume final foi de 66 ml. Usando a equação a seguir, tem-se

$$D = M/V \quad (13)$$

$$D = 15g / (66 \text{ ml} - 60 \text{ ml}) = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

5.1.3 Cone de Fusão

Esse ensaio possibilita identificar a alvura (cor após queima), viscosidade, fusibilidade, presença de impurezas, brilho e retração. No caso do feldspato albíta, apresenta a maior transformação visual após a queima, e também possui boa fusibilidade, verificado pela alteração do formato cônico (Figura 39, antes da queima). Esse comportamento ocorre devido ao teor presente de sódio. Quanto maior o percentual de sódio na albíta, menor será o ponto de fusão e maior a retração (Coelho, 2009). Esse material, após a queima, apresentará coloração branca, brilho vítreo e superfície lisa, e alteração da viscosidade (Figura 40).

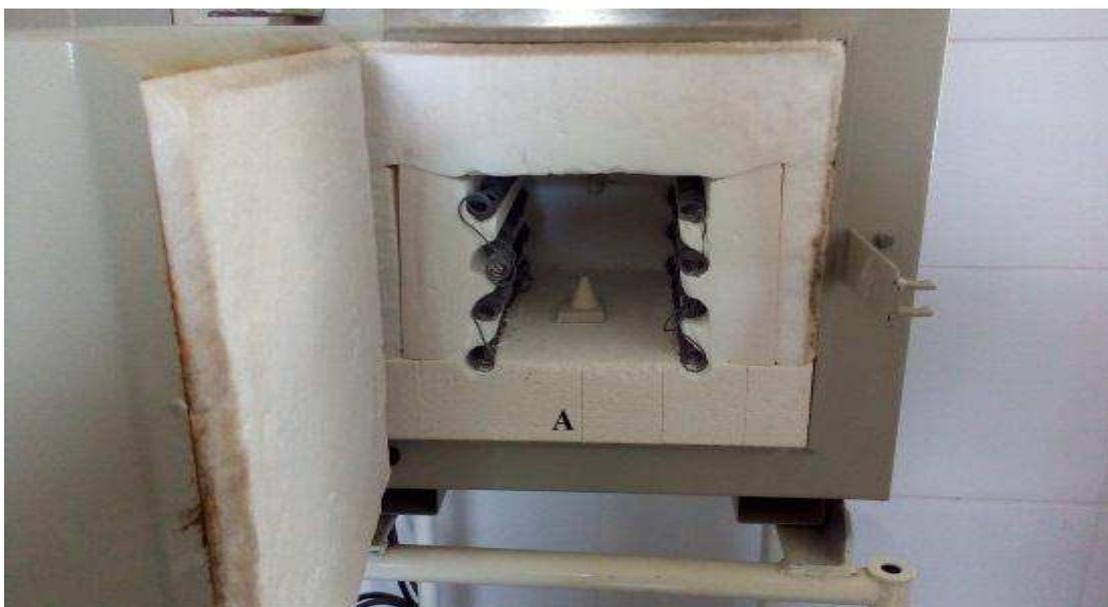


Figura 39 – Corpo de prova (cone) antes da queima em forno mufla.



Figura 40 – Amostra de albita após queima.

O teste de queima em laboratório foi realizado com material moído em malha 200. O corpo de prova em forma de cone foi queimado em um forno estufa a temperatura de 1.250 °C. Esse resultado permitiu observar que o corpo de prova, após a queima, produziu uma fase vítrea, e principalmente com visível alteração para um formato achatado, e esse processo de deformação é atribuída à existência de plagioclásio, que forma eutéticos de baixa temperatura e baixa viscosidade (TREIN, 1997).

5.1.4 Pastilha

Com a pastilha assim preparada foi realizado o ensaio de queima. O corpo de prova foi descrito, referindo-se à variação dimensional, e assim, foram efetuadas as medições de peso e diâmetro, respectivamente, antes e após a queima para fins de comparação. A queima da pastilha foi à temperatura de 1.250 °C (Figura 41). As medições foram realizadas com paquímetro.



Figura 41 – Pastilha de albita antes e após a queima.

O resultado das aferições das dimensões do corpo de prova, em relação ao peso e ao diâmetro, antes e após a queima, está apresentado a seguir.

Determinação da Perda ao Fogo (PF)

Usando-se a equação a seguir, tem-se:

$$PF = (Paq - Pdq/Paq) \times 100 \quad (14)$$

Onde:

Paq = Peso antes da queima, g.

Pdq = Peso depois da queima, g.

Daq = Diâmetro antes da queima, mm

Ddq = Diâmetro depois da queima, mm.

Daq = 46,80 mm

Ddq = 42,10mm

PF = Perda ao fogo, %.

Sendo:

Paq = 29,45g

Pdq = 29,31g

Então:

$$PF = (29,45 - 29,31/ 29,45) \times 100 = 0,47 \%$$

A partir das medições, observa-se que o corpo de prova apresenta uma pequena diminuição no peso e no diâmetro. De acordo com a Tabela 5 (Principais especificações para uso industrial de feldspato beneficiado) é visto que o resultado do ensaio para a Perda ao Fogo, no valor de 0,47% é satisfatório em relação ao exigido pelas empresas consumidoras, que recomendam um PF de até 1,5 % para sua aplicação na indústria de vidro.

5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A Tabela 25 apresenta a relação de ensaios de caracterização realizados com as amostras Albita A, que representa o feldspato albita e Albita B que representa o minério de feldspato.

Tabela 25 – Identificação da amostra e caracterização realizada.

Amostra	Nome original	Caracterização realizada
1	Albita A	Difração de Raios-X, Fluorescência de Raios-X e Análise Térmica.
2	Albita B	Difração de Raios-X

Os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados a seguir.

5.2.1 Difração de Raios-X

Na Figura 42 observa-se que a amostra A, como era esperado, apresentou os picos característicos do mineral albita.

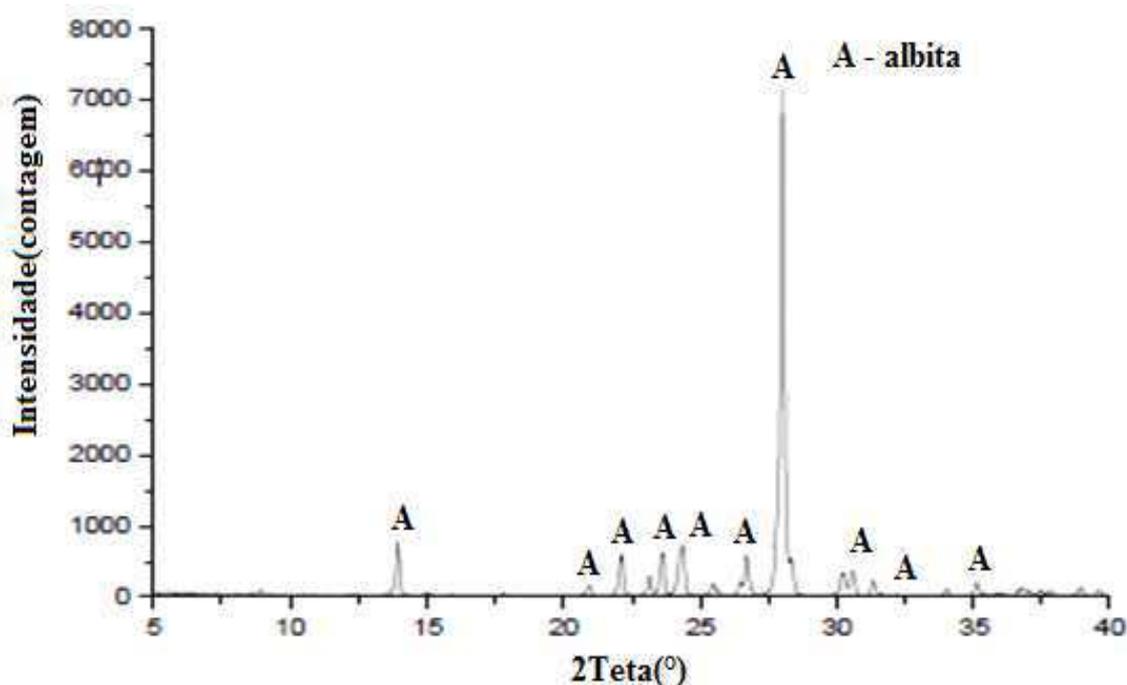


Figura 42 – Difratograma da amostra Albita A.

Observando o difratograma da Figura 43, referente à amostra B, é possível identificar os picos característicos do mineral albita (espécie predominante) com pequenas proporções de quartzo.

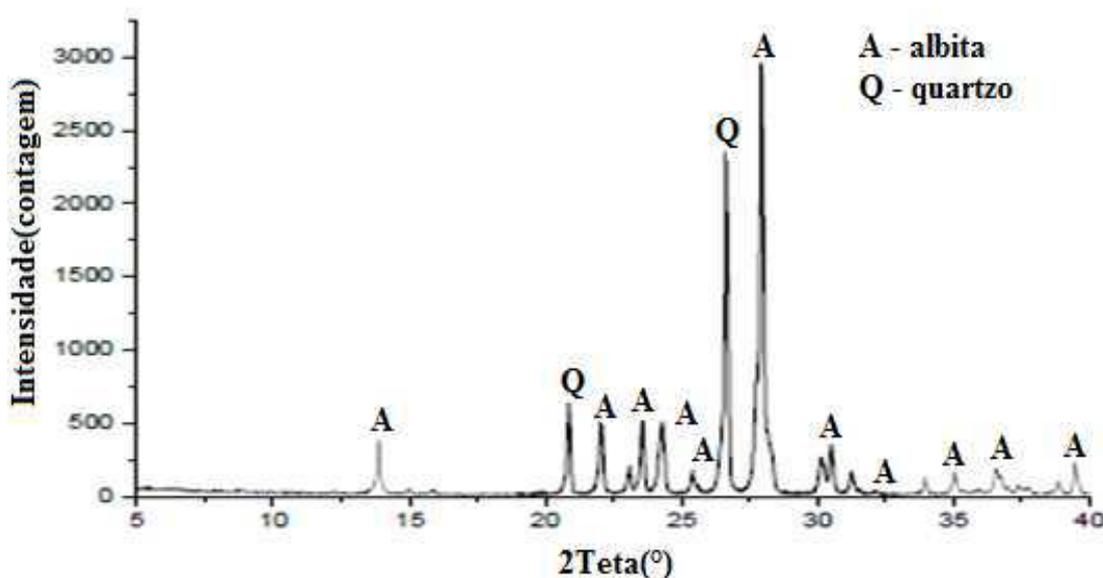


Figura 43 – Difratograma da amostra Albita B.

Em termos gerais, os resultados mostrados nos difratogramas das amostras de albita A e B, é da presença de uma grande porcentagem de feldspato sódico. O difratograma da amostra B (Figura 43) apresenta um resultado esperado, em relação à presença de albita e de quartzo.

5.2.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

O resultado da composição química da amostra (Albita A) está mostrado na Tabela 26.

Tabela 26 – Composição química da amostra Albita A.

Composto	Resultado (%)
SiO ₂	67,96
Al ₂ O ₃	22,18
Na ₂ O	8,59
K ₂ O	0,46
P ₂ O ₅	0,38
SO ₃	0,19
CaO	0,12
F ₂ O ₃	0,09
Rb ₂ O	0,008
CuO	0,008

Os resultados obtidos foram comparados aos dados da literatura apresentados na Tabela 3. No que se refere ao teor de SiO_2 , que foi de 67,96 % (Tabela 26), está muito próximo das especificações, que é de 67,39 % de SiO_2 (Tabela 3). Quanto ao teor de Al_2O_3 , a amostra analisada apresenta 22,18%, enquanto a albíta de referência, tem teor de 20,35 % (Tabela 3). No caso do teor Na_2O na amostra analisada, o valor de 8,59% foi um pouco menor em relação ao feldspato albíta da especificação (Tabela 3). Em relação ao teor de Fe_2O_3 , a amostra possui teor de 0,090 %, estando dentro da faixa solicitada de 0,05 a 0,10 % (Tabela 4). Esses valores estão muito próximos, mostrando que o mineral estudado neste trabalho, trata-se de uma albíta com qualidade e pureza suficiente para uso na indústria de vidros.

5.2.3 Análise Termogravimétrica (ATG) e Térmica Diferencial (ATD)

A Figura 44 apresentada as curvas de análise térmica diferencial e termogravimétrica da amostra Albíta A. Observa-se que, na faixa de temperatura de 0 a 1.000°C, a amostra apresenta perda de massa de aproximadamente 0,698 %. Na análise térmica diferencial observam-se um pico endotérmico, em torno de 100°C e outro pico, também endotérmico, em aproximadamente 568 °C.

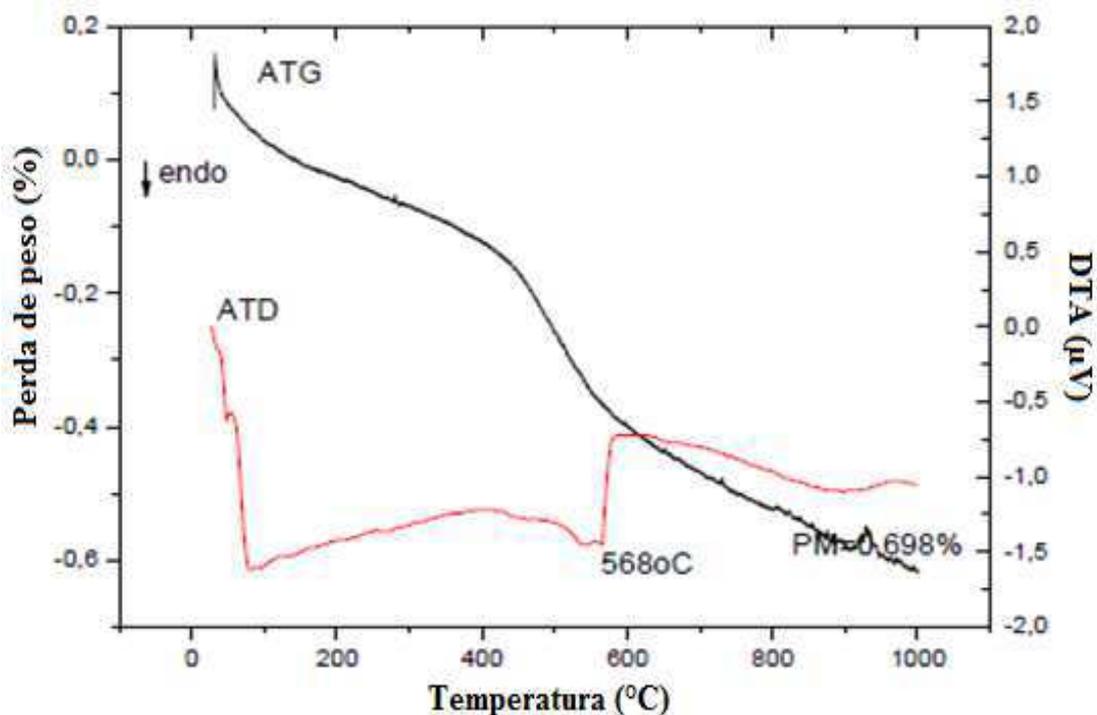


Figura 44 – Curvas de análises termogravimétrica e térmica diferencial.

5.3 ENSAIOS DE BRITAGEM E MOAGEM

5.3.1 Ensaios de Britagem

O material utilizado nos ensaios foi a albita, selecionada manualmente. A amostra foi pesada, e em seguida realizada o ensaio de britagem e moagem. Com o material britado a < 5,0 mm foi realizado uma análise granulométrica. Os resultados encontram-se apresentados na Tabela 27 e Figura 45.

Tabela 27 – Distribuição Granulométrica do material britado a – 5,0 mm.

Linha	Peneira (mm)	Peso (g)	Retida (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
1	4,699	40	8	8	92
2	3,327	110	22	30	70
3	2,362	60	12	42	58
4	1,651	50	10	52	48
5	1,168	50	10	62	38
6	0,833	50	10	72	28
7	0,589	40	8	80	20
8	0,417	50	10	90	10
9	0,295	20	4	94	6
10	0,208	10	2	96	4
11	0,147	10	2	98	2
12	0,104	5	1	99	1
13	0,074	5	1	100	0
	Total	500	100		

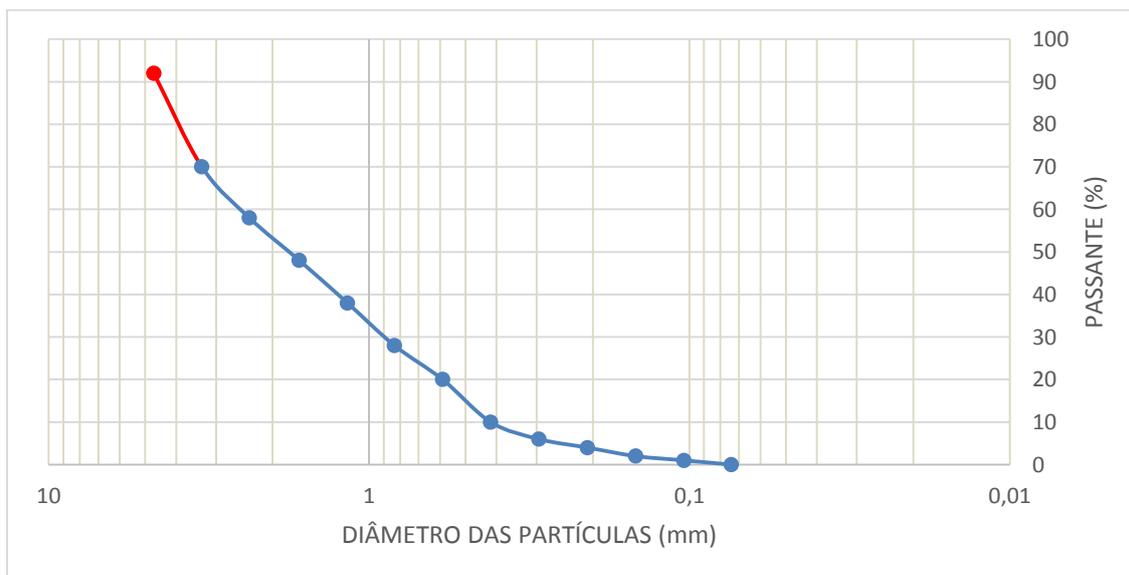


Figura 45 – Curva Granulométrica do material britado a – 5,0 mm.

Observa-se na Tabela 27 que dos 100% do material (500,0 g) usado no ensaio, não é identificado perdas, após pesagem do material. Em relação ao diâmetro das partículas, é possível identificar que 90% (d_{90}) do material é menor de 4,69 mm, 50% (d_{50}) está no tamanho menor que 1,65 mm, e 25% (d_{25}) está com granulometria menor que 0,58 mm. Ressalta-se que a fração passante em 0,074 mm (200 malhas) foi de aproximadamente zero.

5.3.2 Ensaio de Moagem

Na realização do ensaio de moagem foi usado um fator de enchimento de carga de 80%, onde 50% é ocupado pelo meio moedor, e 30% ocupado pelo material a ser moído, neste caso o feldspato albita. A composição do meio moedor foi composta por 82 bolas de quartzo, e 44 bolas de alumina, totalizando 126. Em cada ensaio usou-se 500g da amostra de albita. Nessas condições, o material foi colocado na jarra, que tem diâmetro interno de 120 mm, e comprimento de 185 mm.

A velocidade de operação do moinho de bolas medida foi $V_{op} = 70$ rpm. A velocidade crítica determinada do moinho foi de:

$$nc = 42,3\sqrt{0,12} = 122,5 \text{ rpm.} \quad (15)$$

A velocidade de operação do moinho de bolas usado para o ensaio está relacionada à velocidade crítica. Assim, tem-se que o moinho possui um $nc=122,5$ rpm, e está trabalhando com $V_{op}=70$ rpm, logo sua velocidade de operação é de 57% da velocidade crítica.

A Tabela 28 mostra a quantidade de bolas empregadas, o diâmetro e volume dos meios moedores, e os tempos de moagem empregados de 10, 20, 30, 40, 50, e 60 minutos.

Tabla 28 – Descrição dos parâmetros empregados nos ensaios de moagem.

Carga de enchimento	Nº de bolas	Diâmetro (mm)	Peso (g)	T (min)					
	44	15	200						
	20	18	140						
80%	18	24	340	10	20	30	40	50	60
	44	26	620						
Total	126		1.300						

Em seguida foi realizado o respectivo peneiramento para cada moagem efetuada. A partir desses peneiramentos foram elaboradas as Tabelas 29, 30, 31, 32, 33, e 34.

Tabela 29 – Distribuição Granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 10 min.

Linha	Malha	Peso (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	100	430	86	86	14
2	150	20	4	90	10
3	200	20	4	94	6
4	-200	30	6	100	-
	Total	500	100		

Tabela 30 – Distribuição Granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 20 min.

Linha	Malha	Peso (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	100	390	78	78	22
2	150	30	6	84	16
3	200	30	6	90	10
4	-200	50	10	100	-
	Total	500	100		

Tabela 31 – Distribuição Granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 30 min.

Linha	Malha	Peso (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	100	380	76	76	24
2	150	30	6	80	18
3	200	20	4	84	14
4	-200	70	14	100	-
	Total	500	100		

Tabela 32 – Distribuição Granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 40 min.

Linha	Malha	Peso (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	100	360	72	72	28
2	150	20	4	76	24
3	200	30	6	82	18
4	-200	90	18	100	-
	Total	500	100		

Tabela 33 – Distribuição Granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 50 min.

Linha	Malha	Peso (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	100	320	64	64	34
2	150	40	8	72	28
3	200	20	4	76	24
4	-200	120	24	100	-
	Total	500	100		

Tabela 34 – Distribuição Granulométrica do ensaio de moagem no tempo de 60 min.

Linha	Malha	Peso (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
1	100	310	62	62	38
2	150	40	8	70	30
3	200	25	5	75	25
4	-200	125	25	100	-
	Total	500	100		

No ensaio de moagem com tempo de 10 min, observa-se que o material passante foi de 6,0 % na malha 200 (Tabela 29). No caso da moagem com tempo de 20 min, tem-

se um aumento de 6,0 % para 10,0% na malha 200 (Tabela 30). Já a moagem no tempo de 30 min, apresenta um aumento na malha 200 de 10,0% para 16,0% (Tabela 31).

Com um tempo de moagem de 40 min, em 200 malhas, a percentagem do passante, aumentou para 18,0% (Tabela 32). Com um tempo de 50 min, foi verificado que a percentagem do passante aumentou para 24,0% (Tabela 33), também na malha 200. Finalmente, para a moagem com tempo de 60 min, a percentagem do passante, na malha 200, foi de 25% (Tabela 34).

Observa-se que com o aumento do tempo de moagem, também aumenta a percentagem do passante na malha 200. Assim com 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min as porcentagens do passante foram 6,0; 10,0; 14,0; 18,0; 24,0; e 25,0%, respectivamente. Há uma tendência de linearidade dos pontos (tempo vs % passante). No entanto, verifica-se que com o tempo de moagem maior que 50 min, a percentagem do passante atinge valores com pequena variação (Figura 46). Nos ensaios constata-se que a percentagem do passante aumenta de 24,0 para 25,0%. Possivelmente, com tempos maiores de moagem haja pouca variação da percentagem do passante na malha 200.

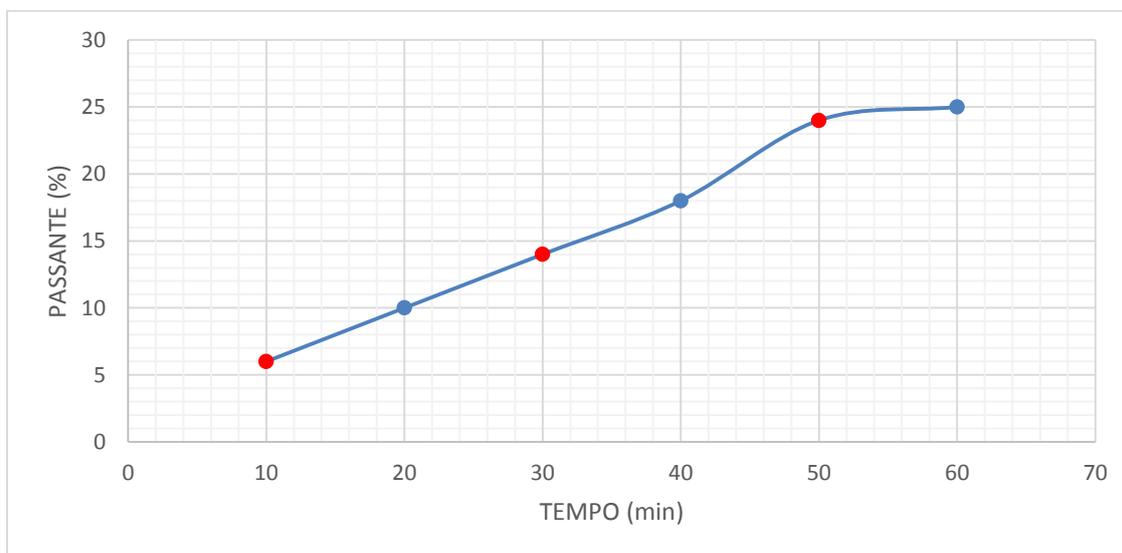


Figura 46 – Porcentagem do passante (200 malhas) em função do tempo de moagem.

A Figura 47 representa as distribuições granulométricas obtidas nos ensaios de moagem com tempos de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min., respectivamente. Observa-se que quando a granulometria diminui, também diminui a percentagem do passante em todos os tempos dos ensaios de moagem. Constata-se também, que antes do ensaio de moagem, não existia percentagem de material na malha 200. Por outro lado, com um tempo de 60 min, tem-se 25,0% na malha 200.

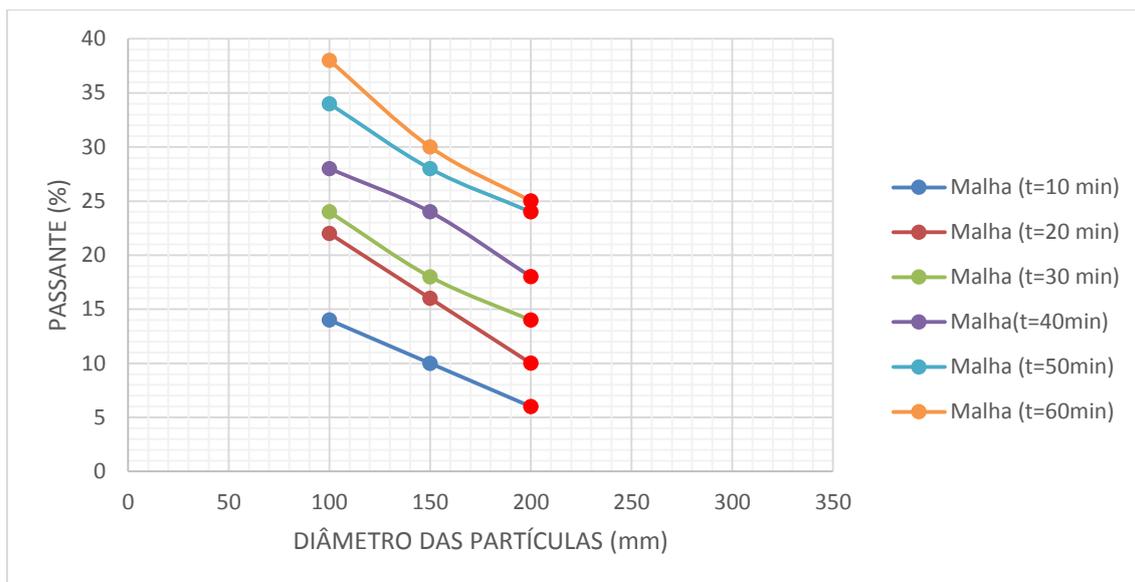


Figura 47 – Curvas granulométricas dos ensaios de moagem em 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min.

Na etapa de análise dos equipamentos de britagem e moagem da cooperativa, foram coletadas informações sobre os dados operacionais, como: o tipo de meio moedor, tamanho dos corpos moedores e seu peso (Tabela 35). Nesta mesma fase do levantamento de informações do processo de cominuição, também foram coletados os resultados da moagem em escala industrial no moinho de bolas da COOMIPEL (Tabela 36).

Tabela 35 – Dados operacionais coletados do moinho de bolas da COOMIPEL.

Carga de enchimento	Tipo de meio moedor	Diâmetro (mm/pol)		Peso (kg)
		127	5	300
Nd	Calcedônia	203	8	100
		19	3/4	100
Total	-	-		500

Nd – não determinado.

Tabela 36 – Dados coletados referentes à moagem na COOMIPEL.

Carga de enchimento	Alimentação no silo do moinho (kg)	Realização da moagem			Realização da moagem		
		T (h)	P (kg)	% (200 #)	T (h)	P (kg)	% (200 #)
Nd	5.000	1	125	2,5	8	1000	20

Nd – não determinado.

Ao observar os dados apresentados na tabela 36, verifica-se que para uma alimentação no moinho de bolas de 5.000 kg de feldspato albíta, e utilizando os elementos operacionais descritos na Tabela 35 na realização da moagem, tem-se em um dia trabalhado (8hs) uma produção de material na granulometria de 200 malhas de 1.000 kg, que representa cerca de 20% da alimentação. Isso significa que para essa mesma quantidade de material alimentado no moinho, temos em 1 hora trabalhada em torno de 125kg de feldspato, que corresponde a 2,5% dos 5.000kg.

5.4 REDIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

5.4.1 Britador Primário

a) Condição de Recepção

O britador primário deve ter gape suficientemente ajustado para deixar passar o máximo de material na alimentação. O top size do material é de 20 cm (200 mm) e a vazão de alimentação de 10 t.h⁻¹.

Usando a equação (1) a seguir, tem-se:

$$\text{Gape} = \frac{\text{tamanho da maior partícula da alimentação}}{0,8 \text{ a } 0,85} = \frac{20 \text{ cm}}{0,8} = 25 \text{ cm}$$

As informações provenientes da condição de recepção, permitem definir uma distância entre as mandíbulas (gape) de aproximadamente 25,0 cm, e a granulometria máxima da alimentação (top size) de 20,0 cm, que vai alimentar o britador de mandíbulas primário, a fim de que não haja entupimento de material entre a mandíbulas fixa e móvel do equipamento.

b) Critério de Taggart (equação 2)

$$X = \frac{\text{vazão em t/h}}{(\text{gape em polegadas})^2} = \frac{10 \text{ t/h}}{(9,8)^2} = 0,104, \text{ esse valor é menor que } 0,115.$$

De acordo com Taggart, como o valor de $X < 0,115$, usa-se o britador de mandíbulas (CHAVES; PERES, 2003).

A determinação do critério de Taggart é muito importante para definição de qual tipo de britador deverá ser empregado. Neste caso, tem-se que o valor encontrado de $X = 0,104$, é menor que o estabelecido por Taggart. Assim, pode-se selecionar o britador de mandíbulas na britagem primária ao invés do britador giratório ou cônico.

c) Condição de Processo

Dado que o top size é de 20 cm e a razão de redução (R) é 5:1, considerando que:

$$R = \text{Top size da alimentação} / \text{tamanho máximo do produto.}$$

Então tem-se que, o tamanho máximo do produto é de 40 mm,

Por outro lado, tem-se que:

$$\text{APF} = \text{APA} - \text{Movimento do queixo.}$$

Sendo que:

APF: abertura da boca do britador na posição fechada; mm.

APA: abertura da boca do britador na posição aberta; mm.

Assim:

$$\text{APF} = (40 - 20) \text{ mm} = 20 \text{ mm};$$

Onde: movimento do queixo = 20 mm ($\pm 3/4''$ - ver Tabela 12)

De acordo com a Tabela 12, que apresenta a capacidade de britadores primários para várias APF, pode-se considerar a abertura da boca de saída do britador primário na posição fechada, no valor de 3/4" (20 mm). Com essas considerações técnicas pode ser selecionado o britador 3020E, que apresenta uma capacidade que varia de 8 - 10 t.h⁻¹.

A Figura 48, e a partir da curva referente a um APF de 20 mm, fornece as faixas granulométricas do produto britado (Tabela 37).

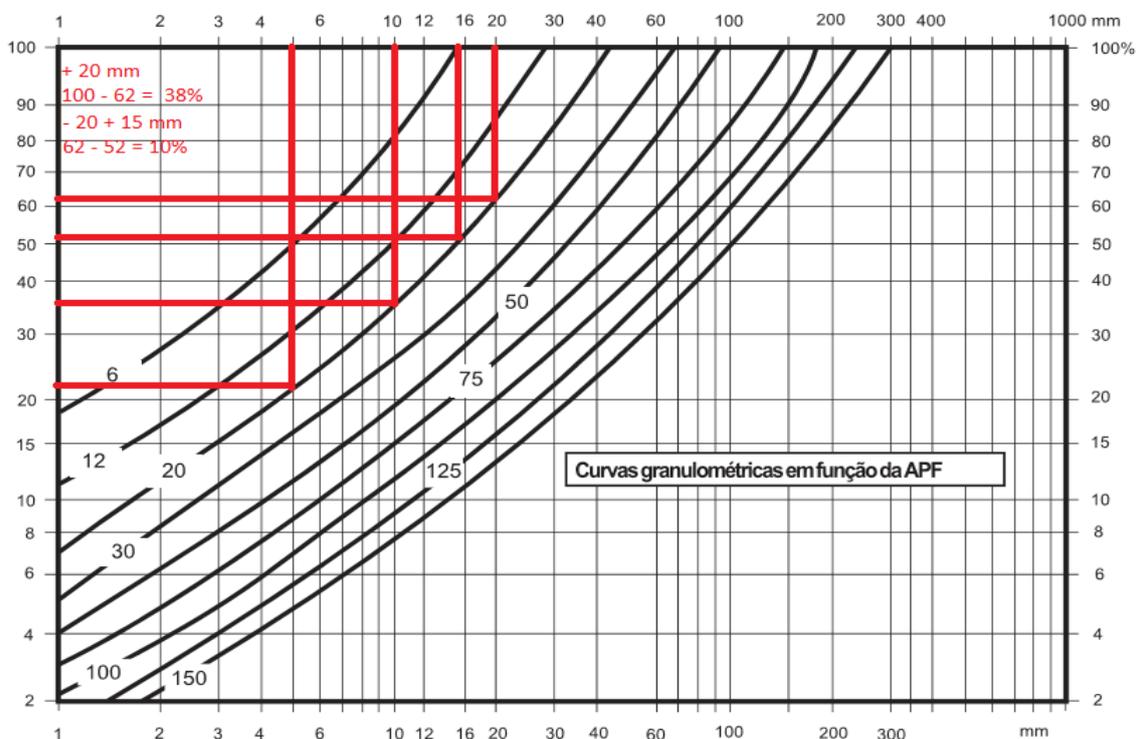


Figura 48 – Curvas granulométricas para diversos valores de APF de britadores primários.

Observou-se que 38% do material encontra-se acima de 20 mm, o que corresponde a 3,8 ton de material britado por cada 10,0 ton de alimentação. Tem-se que 10% do produto britado é menor que 20 mm e maior que 15 mm, isso representa 1,0 ton. Também se constatou que 16% do material produzido é menor que 15 mm e maior 10,0 mm, correspondendo a 1,6 ton. Ainda se tem que 14% é menor 10 mm e maior que 5 mm, com cerca de 1,4 ton. Por fim, tem-se que 22% do material britado apresenta granulometria menor que 5 mm, que corresponde a 2,2 ton. A soma de todas as percentagens das faixas granulométricas representa 100% do material alimentado (Tabela 37).

Tabela 37 – Distribuição granulométrica do britador primário (APF = 20 mm) considerando a capacidade do britador de 10 t.h⁻¹.

Faixa granulométrica (mm)	Peso (%)	Capacidade (t/h)
+ 20	38,0	3,8
- 20 + 15	10,0	1,0
- 15 + 10	16,0	1,6
- 10 + 5	14,0	1,4
- 5	22,0	2,2
Total	100,0	10,0

A partir da condição de processo, onde foi consultado o manual da Metso, da determinação do top size de 20 cm (ou 200 mm) que corresponde ao tamanho máximo da alimentação, da definição da razão de redução de 5:1, e com o ajuste da boca de saída (APA) de 40 mm, que foi baseado na Tabela 12. É recomendado a utilização do britador de mandíbulas de um eixo, modelo 3020E.

d) Capacidade real do britador (equação 3)

A capacidade real do britador primário é determinada com base nos seguintes dados:

Fator de serviço = 1,5 (britador primário)

Vazão de alimentação = 10 t.h⁻¹ (Valor estimado).

Densidade aparente do material = 1,6 (Valor estimado).

$C = \text{Fator serviço} \times \text{Vazão de alimentação (t.h}^{-1}\text{)} / \text{Densidade aparente}$

$$C = \frac{\text{Fator de serviço} \times \text{vazão de alimentação}}{\text{Densidade aparente}} = \frac{1,5 \times 10}{1,6} = 9,37 \text{ t.h}^{-1}.$$

A capacidade real do britador de mandíbulas primário foi de 9,37 t.h⁻¹, que pode ser atingida com um britador modelo 3020E. A faixa de produção desse modelo varia de 8,0 – 10,0 t.h⁻¹.

No processo de britagem atual, o britador primário da cooperativa apresenta na boca de alimentação as dimensões de 36 x 24 cm, e na abertura de saída o valor de 36 x 12 cm. O equipamento está operando para britar material com tamanho máximo (top size) de até 20 cm, e está produzindo um produto britado com tamanho máximo de até 12 cm. Nessas condições, está trabalhando com uma razão redução de aproximadamente 1,7. Essa razão de redução é inadequada já que evidencia uma subutilização do equipamento.

A razão de redução (R) desse britador deve ser reajustada em 5:1, quando usado na fragmentação de feldspato. O gape permanece em 24 cm, o top size em 20 cm. Por outro lado, as dimensões da boca de descarga deverão ser reajustadas, com um APA = 4,0 cm e um APF = 2,0 cm, aproximadamente. Esses ajustes melhorarão a eficiência do britador da cooperativa, em termos de um produto gerado com menores granulometrias.

5.4.2 Britador Secundário

a) Condição de Recepção

O britador secundário (rebritador) usado atualmente na cooperativa apresenta uma boca de alimentação com dimensões de 88 x 18 cm, e a boca de descarga com APF = 3,0 cm, e APA = 5,0 cm. Para este tipo de britador o movimento do queixo é de 2,0 cm (± 3/4” - ver Figura 12). O gape deve estar suficientemente ajustado para deixar passar o máximo de material na alimentação. O top size do material é de 15 cm (150 mm) e considerando-se uma vazão de alimentação de 10 t.h⁻¹.

Usando a equação (1) a seguir, tem-se que:

$$\text{Gape} = \frac{\text{tamanho da maior partícula da alimentação}}{0,8 \text{ a } 0,85} = \frac{15 \text{ cm}}{0,8} = 18,8 \text{ cm}.$$

As informações provenientes da condição de recepção, permitem definir uma distância entre as mandíbulas (gape) de aproximadamente 19,0 cm, e a granulometria máxima da alimentação (top size) de 15,0 cm, que vai alimentar o britador de mandíbulas

secundário, a fim de que não haja entupimento de material entre a mandíbulas fixa e móvel do equipamento.

b) Critério de Taggart (equação 2)

$$X = \frac{\text{vazão em t/h}}{(\text{gape em polegadas})^2} = \frac{10 \text{ t/h}}{(7,6)^2} = 0,17, \text{ esse valor está próximo de } 0,115.$$

De acordo com Taggart, como o valor de X (0,17), está dentro do limite do indicado, usa-se o britador de mandíbulas ao invés do britador giratório (CHAVES; PERES, 2003).

c) Condição de Processo

Com um top size de 15 cm e um produto de material britado com tamanho máximo de 5 cm, o rebitador da cooperativa apresenta uma razão de redução de 3:1.

Visto que o top size é de 150 mm e a razão de redução (R) é 3:1, considerando-se que:

$R = \text{Top size da alimentação} / \text{tamanho máximo do produto}.$

Então tem-se que, o tamanho máximo do produto é de 50,0 mm,

Por outro lado, tem-se que:

$APF = APA - \text{Movimento do queixo (ver Tabela 12)}.$

Assim:

$APF = (50,0 - 20,0) \text{ mm} = 30,0 \text{ mm};$

Como não foi encontrado esse modelo de rebitador empregado na cooperativa, nas tabelas dos equipamentos industriais, optou-se por se encontrar um outro modelo que seja o mais parecido. De acordo com a Tabela 12, que apresenta a capacidade de britadores secundários para várias APF, pode-se considerar a abertura da boca de saída do britador secundário (APF - posição fechada) no valor de $1\frac{3}{16}$ ou (30 mm). Com essas considerações pode ser selecionado o britador 8013E, que nesta condição apresenta uma capacidade que varia de 19 a 26 t.h⁻¹.

A seguir será realizado um novo redimensionamento do rebitador propondo-se variações do top size, tamanho máximo do produto, e dimensões da APA e da APF, respectivamente.

c) Condição de Processo

Tendo-se que o tamanho máximo do produto produzido pelo britador primário seria de 40,0 mm. Esse seria o top size do britador secundário.

Visto que o top size é de 40,0 mm e o tamanho máximo do produto é 18,0 mm (APA). Então a razão de redução (R) é de 2.2.

Por outro lado, tem-se que:

$$APF = APA - \text{Movimento do queixo. } (\pm 1/2'' - \text{ver Tabela 12})$$

Assim:

$$APF = (18,0 - 12,0) \text{ mm} = 6,0 \text{ mm}$$

De acordo com a Tabela 12, que apresenta a capacidade de britadores secundários para várias APF, pode-se considerar a abertura da boca de saída do britador secundário (APF - posição fechada) no valor de $1/4''$ ou (6 mm). Com essas considerações técnicas também poderá ser selecionado o rebitador 8013E, que apresenta nessa condição, uma capacidade que varia de 6 a 8 t.h⁻¹.

A Figura 49, e a partir da curva referente a um APF de 6,0 mm, fornece as faixas granulométricas do produto britado (Tabela 38).

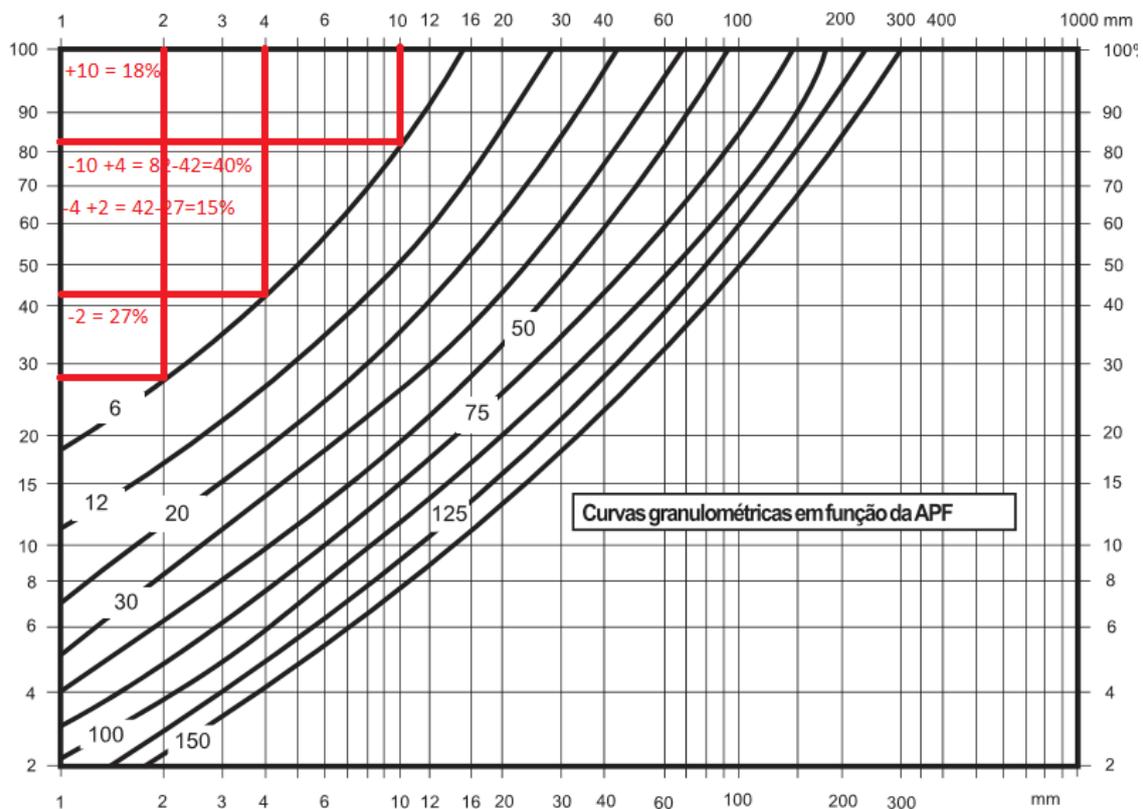


Figura 49 – Curvas granulométricas para diversos valores de APF de britadores primários.

Os resultados mostraram que 18% do material encontra-se acima de 10 mm, o que corresponde a 1,44 ton de material britado por cada 8,0 ton de alimentação. Observa-se que 40% do produto britado encontra-se em uma faixa de (- 10,0 + 4,0) mm, isso representa 3,20 ton. Também se constatou que 15% do material produzido corresponde à fração (- 4,0 + 2,0) mm, correspondendo a 1,20 ton. Por fim, tem-se que 27% do material britado apresenta granulometria – 2,0 mm, que corresponde a 2,16 ton. Observa-se que a fração - 4,0 mm corresponde a 42,0% do total (Tabela 38).

Tabela 38 – Distribuição granulométrica do rebitador (APF = 6 mm)
Considerando a capacidade do britador de 8,0 t.h⁻¹.

Faixa granulométrica (mm)	Peso (%)	Capacidade (t/h)
+ 10	18,0	1,44
- 10 + 4	40,0	3,20
- 4 + 2	15,0	1,20
- 2	27,0	2,16
Total	100,0	8,0

d) Capacidade real do britador secundário (equação 3)

A capacidade real (C) do rebitador é determinada com base nos seguintes dados:

Fator de serviço = 1,25 (britador secundário)

Vazão de alimentação = 10 t.h⁻¹ (Valor estimado).

Densidade aparente do material = 1,6 (Valor estimado).

$C = \text{Fator serviço} \times \text{Vazão de alimentação (t.h}^{-1}\text{)} / \text{Densidade aparente}$

$$C = \frac{\text{Fator de serviço} \times \text{vazão de alimentação}}{\text{Densidade aparente}} = \frac{1,25 \times 10}{1,6} = 7,8 \text{ t.h}^{-1}.$$

A capacidade real do rebitador de mandíbulas, com as novas condições, seria de 7,8 t.h⁻¹, que pode ser atingida com um britador modelo 8013E. A faixa de produção desse modelo varia de 6,0 – 8,0 t.h⁻¹.

O rebitador empregado na Cooperativa de Pedra Lavrada está operando para rebitar material com tamanho máximo (top size) de até 15 cm, e está produzindo um

produto britado com tamanho máximo de até 5 cm. Nessas condições, está trabalhando com uma razão redução de aproximadamente 3:1. Esse material (≤ 50 mm) iria alimentar o moinho de bolas de seixos.

Com o novo redimensionamento do rebitador, o top size passaria de 15,0 cm (150 mm) para 4,0 cm (40 mm). Essa recomendação de variação de top size foi considerada haja visto que, o tamanho máximo do produto gerado pelo britador primário 3020E é ≤ 40 mm. O gape permanece em 18 cm. Para isso, as dimensões da boca de descarga deverão ser reajustadas, com um APA = 18,0 mm e um APF = 6,0 mm, aproximadamente. A razão de redução (R) desse rebitador será de 2.2. Essas recomendações de ajustes proporcionariam uma redução no tamanho máximo do produto de 50 mm para 18 mm. Esse produto com menores granulometrias irá alimentar o moinho de bolas de seixos. Essa seria uma proposta técnica, que poderá ser implementada na cooperativa, no intuito de permanência do rebitador, atualmente usado, e evitando a sua substituição.

5.4.3 Peneiramento

Na atual unidade de beneficiamento não existe um sistema de peneiramento na etapa de britagem secundária. Para melhoria do processo de cominuição é necessário a colocação de uma peneira vibratória operando em circuito fechado com o rebitador. Por essa razão, neste item irá ser dimensionado um equipamento que atenda às metas de produção da cooperativa.

Na Figura 50 apresenta-se um esquema de uma peneira cujos dados são: vazão de alimentação, vazão do retido, vazão do passante, e suas respectivas porcentagens, foram obtidas a partir do produto gerado pelo rebitador, e determinada a partir das curvas granulométricas.

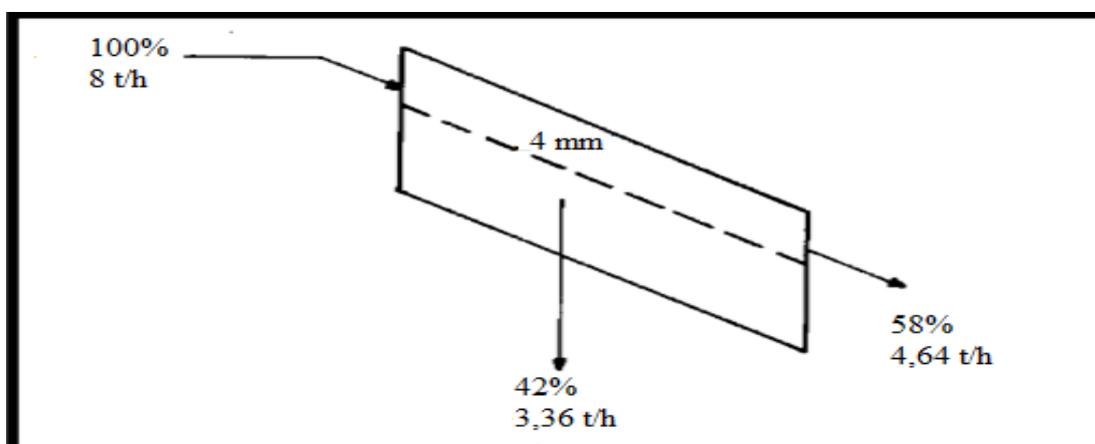


Figura 50 – Esquema da peneira vibratória. Vazão de alimentação: $8,0 \text{ t.h}^{-1}$ de material, densidade aparente de 1.600 kg.m^{-3} .

A abertura da tela da peneira irá ser de 4,0 mm, peneiramento a seco. Tem-se que a área da peneira (A) é dada por:

$$A = S / C \cdot d \cdot F_m \text{ (equação 4);}$$

Sendo:

S = quantidade de material passante na alimentação que atravessa a peneira por hora (t/h); 3,36 t.h⁻¹.

C = Capacidade básica, 0,8 t/h x 0,9 m² (ver Figura 37);

$$d = \frac{\text{peso específico aparente do material}}{1.602} = \frac{1600}{1602} = 1,0;$$

A Tabela 39 apresenta as porcentagens do passante (%) nas granulometrias de 20,0; 10,0; 4,0 e 2,0 mm, respectivamente. Essa tabela foi determinada a partir da Tabela 35.

Tabela 39 – Porcentagem passante (%) x granulometria do material que irá alimentar a peneira.

Tamanho (mm)	Passante (%)
20	100
10	82
4	42
2	27

A seguir foram determinados os fatores modificadores (Fm):

F = 0,80. O Fator de Finos foi determinado por interpolação (ver Tabela 13); considerando-se que o 27% do passante é menor que 2,0 mm (Tabela 39).

E = 1,00 (95% de eficiência de peneiramento); considerando-se eficiência máxima de peneiramento (Tabela 13);

D = 1,0 (Fator de deck, no caso peneira de um deck) (Tabela 15);

B = 1,0 (abertura da tela com forma quadrada) (Tabela 14);

Substituindo na fórmula abaixo, temos:

$$A = \frac{S}{C \cdot d \cdot F_m} = \frac{3,36 \text{ t/h}}{0,8 \times 1,0 \times 0,80 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0} = 5,25 \text{ft}^2 = 0,48 \text{ m}^2$$

O resultado obtido foi de 0,48 m², representa a área efetiva da peneira. A este valor, é acrescentado uma área adicional de 10% a fim de compensar as perdas de área devido aos suportes que sustentam a tela à peneira (LUZ *et al.*, 2010).

Neste caso, teremos $0,48 + 0,048 = 0,53 \text{ m}^2$

A etapa seguinte será selecionar uma peneira padrão com uma área de 0,53 m², mantendo-se uma razão comprimento/largura de 2:1 para que haja um peneiramento eficaz. Dessa forma, recomenda-se uma peneira de 1,0 m x 0,6 m com uma área total de 0,60 m². De acordo com o manual de britagem da Metso, a peneira com menor área disponível é a de modelo M 20008/1A (Tabela 40). Nesse modelo não está sendo contemplado o custo de aquisição do equipamento.

Essa peneira não se adequa aos requerimentos para o propósito desejado, que neste caso é de 0,60 m² de área de deck. Assim, a peneira vibratória inclinada M de referência 20008/1A, que possui apenas (01) um deck, e área útil de 1,6 m², apresenta especificações acima dos valores requeridos. Em função disso, pode-se encomendar junto ao fabricante um equipamento sob medida.

Tabela 40 – Especificações técnicas para peneira vibratória inclinada MS.

Peneira M	Nº de decks	Dimensões quadro (mm)	Área do deck (m ²)	Motor (Hp)	Compr. (mm)	Altura (mm)	Largura (mm)
20008/1A	1	2000x1800	1,6	4	2100	1150	1216
25010/1A	1	2500x1050	2,5	5	2600	1400	1410
30012/1A	1	3000x1200	3,6	12,5	3853	2039	1715
30012/2A	2	3000x1200	3,6	12,5	3400	1770	1715

Fonte: METSO (2005).

A seguir, verifica-se se essa peneira atende a condição de altura do leito no ponto de descarga do oversize. A recomendação para um peneiramento efetivo é a de que a espessura do leito não seja maior do que 4 vezes o tamanho da abertura da tela (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Nesse caso, para a abertura de 4,0 mm, a espessura do leito não deve ser superior a 16,0 mm, considerando-se uma densidade aparente de $1,6 \text{ t.m}^{-3}$ (Tabela 41).

Tabela 41 – Espessura máxima do leito em função da densidade do material.

Densidade aparente (t/m ³)	Altura máxima da camada
1,6	4 x a abertura da tela
1,6 – 0,8	3 x a abertura da tela
< 0,8	2,5 x a abertura da tela

Fonte: CHAVES (2003).

5.4.4 Moinho de Bolas de Seixos

Na proposta do dimensionamento do moinho de bolas a ser usado, inicialmente deve-se determinar a energia necessária para a moagem do material. A seguir são discriminados os dados para realização de uma proposta do moinho de bolas para a cooperativa.

O material que será moído é albita, 10,0 t.h⁻¹ em circuito fechado; sendo WI = 11,7; e considerando-se $F \leq 4$ mm ou 4.000 μ m; $P \leq 0,074$ mm ou ≤ 74 μ m (≤ 200 malhas).

A alimentação do moinho será preparada em britador secundário em circuito fechado.

Cálculo da Energia (equação 7):

$$E = 10 \text{ WI} \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) = \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{P}} - \frac{10 \text{ WI}}{\sqrt{F}} = \frac{10 \times 11,7}{\sqrt{74}} - \frac{10 \times 11,7}{\sqrt{4000}} = 11,57 \text{ kwh/st}$$

A determinação dos Fatores modificadores será realizada a seguir:

$EF_1 = 1,3$ (fator que corrige o tipo de moagem, no caso moagem a seco)

$EF_2 =$ só se aplica para o caso de circuito aberto, que não seria o caso.

$EF_3 =$ fator que corrige o diâmetro do moinho, só se determina após escolha preliminar do moinho

$EF_4 =$ fator que corrige a alimentação com tamanho excessivo

$$R_r = \text{razão de redução} = \frac{F}{P} = \frac{4000}{74} = 54$$

$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{\text{WI}}} = 4.000 \sqrt{\frac{13}{11,7}} = 4.214,26$, como $F < F_0$, sendo F_0 tamanho ótimo da alimentação e $F = 4.000$, então não se usa EF_4 .

EF_5 = fator que corrige finura, no caso não se aplica, usado apenas para moagem de partículas extremamente finas, inferiores a 325 malhas (0,044 mm).

EF_6 = não se aplica (fator que corrige a razão de redução para moinho de barras)

EF_7 = fator que corrige a razão de redução no moinho de bolas, é dada por:

$$EF_7 = \frac{R_r - 1,22}{Rr - 1,35} = \frac{54,0 - 1,22}{54,0 - 1,35} = 1,0$$

EF_8 = não se aplica (fator que corrige a ineficiência dos moinhos de barras)

A seguir define-se o valor da energia usando os fatores de correção, inicialmente fazendo-se as conversões de unidades.

Conversão de tonelada curta “short tonnage” para tonelada métrica: Fator = 1,102

Conversão de kw para HP: Fator = 1,341

Tem-se que o consumo de energia (E) será:

$E = 11,57 \text{ kwh/ st}$, fazendo-se as devidas conversões.

$E = 11,57 \times 1,102 \times 1,341 = 17,09 \text{ HP.t/h}$ e para 10 t/h, tem-se

$E = 10 \times 17,09 = 170,90 \text{ HP}$

Multiplicando-se pelos fatores de correção EF_1 e EF_7 , tem-se

$E = 170,90 \times 1,3 \times 1,0 = 222,17 \text{ HP}$ de potência.

A seguir foi consultada a Tabela 20 e foi selecionado um moinho de 2,44 x 2,44 m, de diâmetro nominal e comprimento nominal, respectivamente, com uma porcentagem de enchimento de 40 % do seu volume, e com potência do motor de 265 HP. Em seguida pode-se calcular EF_3 :

$$EF_3 = (8/D)^{0,2} = (8/7,5)^{0,2} = 1,01$$

Onde D é o diâmetro interno ao revestimento em polegadas.

Então, a potência corrigida por esse fator será:

$E \text{ corrigida} = 222,17 \times 1,01 = 224,4 \text{ HP}$.

Consultando a Tabela 20, foi possível selecionar um moinho que apresenta o tamanho adequado para atender à potência anteriormente determinada. A Tabela 42 mostra o resumo das características do moinho para a cooperativa selecionado com base na Tabela 20.

Tabela 42 – Características do moinho de bolas de seixos selecionado.

Diâmetro nominal		Comprimento nominal		Velocidade de operação do moinho			Potência do moinho (HP)			Diâmetro (D) interno ao revestimento	
							Descarga por overflow (transbordo) % vol. da carga				
m	pés	m	pés	rpm	%Vc	ft/min	35	40	45	m	pés
2,44	8,0	2,44	8,0	21,3	76,1	502	-	228	-	2,29	7,5

Fonte: CHAVES(2003).

Numa outra fase da pesquisa foram realizadas visitas técnicas à unidade de beneficiamento da cooperativa, e coletados dados dos equipamentos, inclusive do moinho de bolas. A Tabela 43 apresenta as informações atuais obtidas das dimensões do moinho da COOMIPEL.

Tabela 43 – Características atuais do moinho de bolas da COOMIPEL.

Diâmetro nominal		Comprimento nominal		Velocidade de operação do moinho			Potência do moinho (HP)			Diâmetro (D) interno ao revest.	
							Descarga por overflow (transbordo) % vol. da carga				
m	pés	M	pés	rpm	%Vc	ft/mi n	35	40	45	m	pés
1,20	4,00	2,40	8,00	nd	nd	nd	-	nd	-	1,10	3,60

nd: informação não foi possível determinar.

Na realização da proposta do dimensionamento do moinho de bolas de seixos da cooperativa, poderá se indicar as condições operacionais para uma provável instalação e funcionamento. O equipamento deverá ter as seguintes características: diâmetro nominal de 2,44 m e comprimento nominal de 2,44 m, se movimentado a uma velocidade de operação do 21,30 rpm ou 76,1% da velocidade crítica. A potência do motor instalada será no valor de 228,0 HP, a descarga do material será por transbordo, a percentagem de volume de carga de bolas de seixos correspondente a 40% do volume total.

O circuito deverá ser fechado, operando a seco com um classificador pneumático. Na descarga do moinho deve ser instalado um dispositivo, tipo ventilador pneumático que colete o material moído e o transfira diretamente à alimentação do classificador. O

classificador deverá ser ajustado com um diâmetro de corte de 0,074 mm (200 malhas) de forma que os produtos gerados, a fração fina ($\leq 0,074$ mm) constituirá o produto destinado a ensacamento. Enquanto que a fração grosseira ($\geq 0,074$ mm) retornará à alimentação do moinho, através de uma correia transportadora, para remoagem. Ainda para coleta do material particulado, remanescente no fluxo acima do classificador, fração fina, deverá ser instalado um filtro de mangas. Ressalta-se que uma classificação pneumática, dispositivos de transporte de material particulado, e filtro de mangas já são usados na cooperativa.

Ao comparar as informações propostas do dimensionamento do moinho (Tabela 42) com os dados do tamanho do equipamento utilizado no presente momento (Tabela 43), tais como: diâmetro nominal de 1,20 m e comprimento nominal de 2,40 m, observa-se uma diferença entre essas dimensões (D x L). As dimensões do moinho da cooperativa foram determinadas empiricamente, ou foram indicadas sem orientação técnica.

5.4.5 Tamanho Máximo dos Corpos Moedores

A próxima etapa será a determinação dos tamanhos dos corpos moedores. A equação a seguir (12) permite determinar o tamanho máximo da bola a ser empregada:

$$B_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho W i}{\%V_c \sqrt{D}}}, \text{ onde:}$$

$B_{\text{máx}}$ = diâmetro máximo das bolas em poelagdas; $F = 4.000 \mu m$ (Granulometria da alimentação do moinho); $W i = 11,7$ (índice de trabalho, ver Tabela 17); $\rho = 1600$ g/cm³(massa específica do minério); $\%V_c = 76,1$ (velocidade crítica, ver Tabela 42); $D = 7,5$ ft (diâmetro interno ao revestimento da carcaça, ver Tabela 42); $K = 335$ (fator variável com o tipo de moagem, ver tabela 21).

Temos que,

$$B_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho W i}{\%V_c \sqrt{D}}} = \sqrt{\frac{4.000}{350}} \cdot \sqrt[3]{\frac{1,6 \times 11,7}{76,1 \sqrt{7,5}}} = 1,5'' \text{ ou } 38 \text{ mm}$$

O moinho de bolas gera um produto tão fino quanto se queira. Mas para se ter os resultados esperados é importante a utilização de bolas com tamanhos adequados. A Tabela 44 (CHAVES, 2003) mostra os tamanhos máximos de bolas em função da granulometria de alimentação. Observa-se que o tamanho máximo da bola, de 38,0 mm, determinado, é consistente com os valores recomendados na literatura.

Tabela 44 – Tamanho das bolas do moinho e a relação L/D

$F(d_{80})$ – mm	Bola maior (mm)	Bola maior (")	Relação L/D
5 a 10	60 a 90	2,5 a 3,5	1:1 a 1, 25:1
0,9 a 4	40 a 50	2,5 a 2	1, 25:1 a 1, 75:1
Moagem fina Remoagem	20 a 30	$\frac{3}{4}$ a $1\frac{1}{4}$	1, 5:1 a 2, 5:1

Fonte: CHAVES (2003).

A partir do tamanho máximo das bolas determinado foram estabelecidos os outros diâmetros dos corpos moedores que compõem a carga inicial da moagem. Com auxílio da Tabela 22 foram definidos os diâmetros e as porcentagens das bolas que serão empregadas no moinho redimensionado. A Tabela 45 apresenta as dimensões sugeridas para o equipamento de moagem.

Tabela 45 – Tamanho e porcentagens das bolas recomendadas para o moinho.

Diâmetro	$\frac{1}{15''}$	$1''$
%	51	49

5.4.6 Fluxograma proposto para a unidade de beneficiamento da COOMIPEL

A Figura 51 apresenta o circuito de beneficiamento do feldspato albita que é empregado na atualidade na COOMIPEL.

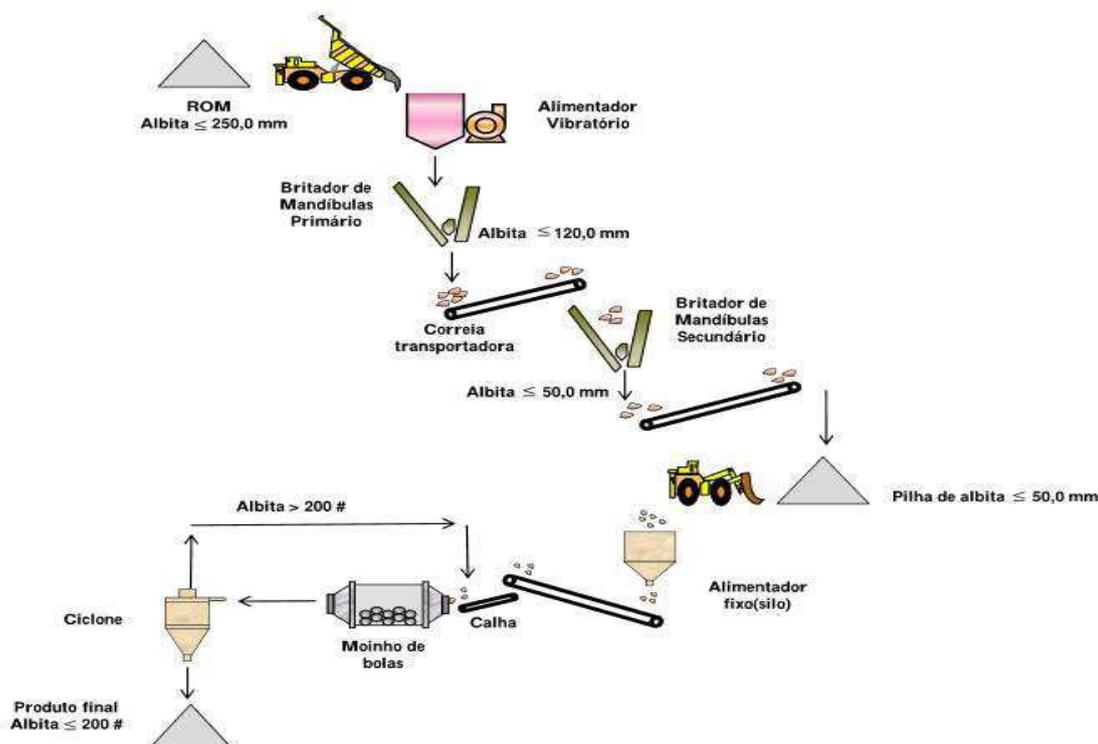


Figura 51 – Fluxograma atual do circuito de beneficiamento de Albita na COOMIPEL.

A partir desse fluxograma foram redimensionados cada um dos equipamentos, entre eles os britadores, as peneiras, e o moinho, ajustando o circuito para um aumento da produção de albita moída a uma granulometria $\leq 0,074$ mm. Na Figura 52 mostra o fluxograma proposto e recomendado para alcançar os objetivos almejados.

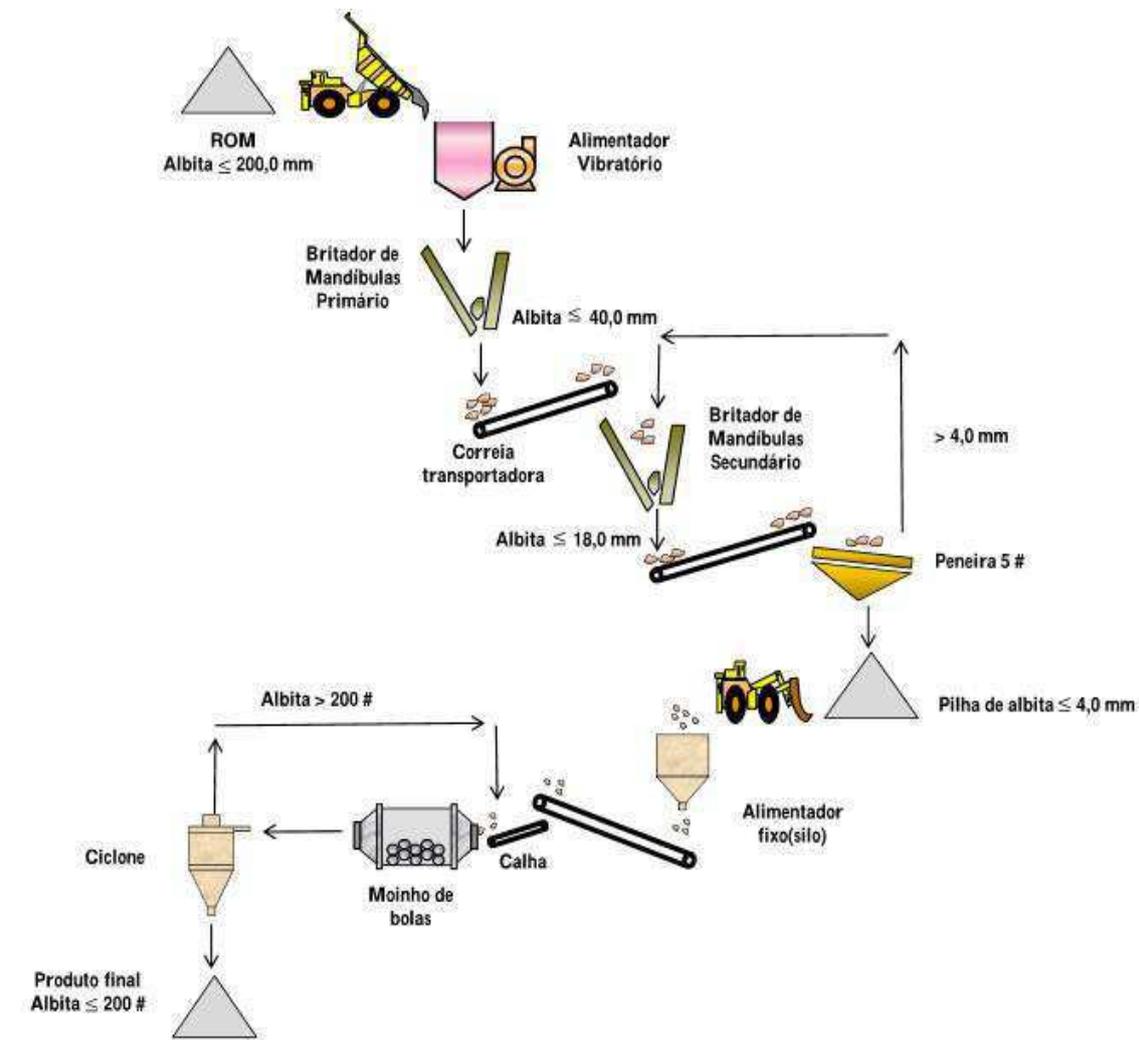


Figura 52 – Fluxograma do circuito proposto e recomendado para o beneficiamento de albita na COOMIPEL.

Este novo layout, se instalado ou readaptado, iniciaria o processo com o material sendo colocado no alimentador vibratório. Em seguida irá alimentar o britador de mandíbulas primário com o top size de 200,0 mm. O britador primário, operando em circuito aberto, deverá ser ajustado no gape de descarga, para uma redução granulométrica de 40,0 mm. Esse material deverá ser conduzido, por correia

transportadora, para o britador secundário ou rebitador. Essa segunda etapa de britagem, irá reduzir o material de 40,00 mm para 18,0 mm.

Esse rebitador deverá ser ajustado no gape de descarga, para uma redução granulométrica de 18,0 mm. O rebitador deverá operar em circuito fechado com uma peneira vibratória de 4,0 mm (5 malhas) de abertura de tela. O retido nessa peneira deverá ser recirculado ao rebitador. O passante na peneira compõe uma pilha de material com uma granulometria $\leq 4,0$ mm. Esse material alimentará o moinho de bolas de seixos, que irá gerar um produto moído com granulometria menor que 0,074 mm. Ressaltando-se que o moinho irá operar em circuito fechado com um classificador pneumático. A fração fina desse classificador, compõe o produto final e a fração grosseira irá para remoagem.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho gerou as seguintes conclusões:

O ensaio da determinação da retenção (% retida) mostrou que o percentual de retido na malha 100 (0,147 mm), corresponde a 1,65 %. No caso do percentual de retido na malha 200 (0,074 mm), apresentou um valor de 2,53%, sendo em ambos os casos, um valor inferior aos 8% exigidos pelas empresas compradoras do material, estando aptos a indústria de cerâmica e vidro.

O ensaio de cone de fusão da amostra de feldspato, apresenta a maior transformação visual após a queima, e também possui boa fusibilidade, verificado pela alteração do formato cônico (antes da queima). Esse comportamento deve-se, provavelmente, ao teor de sódio presente no mineral. Quanto maior o percentual de sódio na albita, menor será o ponto de fusão e maior a retração. Esse material, após a queima, apresentou coloração branca, brilho vítreo e superfície lisa, mostrando que se trata de feldspato albita.

A partir das medições da pastilha no ensaio de queima, foi observado que o corpo de prova apresentou uma pequena diminuição no peso e no diâmetro. De acordo com as especificações comerciais de feldspato beneficiado pode se observar que o resultado apresentado no ensaio de Perda ao Fogo, no valor de 0,47% é satisfatório em relação ao exigido pelas empresas consumidoras, que recomendam um PF de até 1,5 % para sua aplicação na indústria de vidro.

A realização dos ensaios de caracterização, por meio da DRX permitiu identificar e confirmar que a amostra do mineral estudado, trata-se efetivamente de feldspato albita. Enquanto que na amostra do minério, além de feldspato albita, também foi detectada a presença do mineral quartzo.

Os resultados da FRX apresentam que a amostra de feldspato albita tem os seguintes teores: 67,96 % SiO_2 ; 22,18% Al_2O_3 ; 8,59% Na_2O ; 0,090 % Fe_2O_3 . Esses valores mostraram que, o mineral estudado neste trabalho, trata-se de uma albita com qualidade e pureza suficiente para uso na indústria de vidro e outras.

A análise térmica diferencial e termogravimétrica, da amostra do feldspato albita, mostrou que, na faixa de temperatura de 0 a 1.000°C, a amostra apresentou perda de massa de aproximadamente 0,698 %. Na análise térmica diferencial observam-se um pico endotérmico, em torno de 100°C e outro pico, também endotérmico, em aproximadamente 568 °C.

Os ensaios de laboratório foram planejados com desenvolvimento de um ensaio de britagem primária, com razão de redução de 5:1, na qual a granulometria de alimentação foi de 12,5 cm e a granulometria do produto foi de 25,0 mm. Na britagem secundária, o material foi cominuído de 25,0 mm (1,0 polegada) até 5,0 mm. Em relação ao diâmetro das partículas, os resultados mostraram que 90% (d_{90}) do material é $< 4,69$ mm. Temos também que 50% (d_{50}) está no tamanho menor que 1,65 mm, e 25% (d_{25}) está com granulometria menor que 0,58 mm. Ressalta-se que a fração passante em 0,074 mm (200 malhas) foi de aproximadamente zero.

A velocidade de operação do moinho de bolas usado para os ensaios de moagem, em escala de laboratório, foi determinada. Assim, tem-se que o moinho possui uma velocidade crítica $nc=122,5$ rpm, e está operando com $Vop=70$ rpm, logo sua velocidade de operação é de 57% da velocidade crítica.

Observou-se que com o aumento do tempo de moagem, aumentou também a percentagem do passante na malha 200 (0,074 mm). Assim com 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min as porcentagens do passante foram 6,0; 10,0; 14,0; 18,0; 24,0; e 25,0%, respectivamente. Há uma tendência de linearidade dos pontos (tempo vs % passante). No entanto, verificou-se que com o tempo de moagem maior que 50 min, a percentagem do passante atinge valores com pequena variação. Nos ensaios constatou-se que a percentagem do passante aumentou de 24,0 para 25,0% (50 e 60 min). Provavelmente, com tempos maiores de moagem haja pouca variação da percentagem do passante na malha 200.

No caso da moagem da albita em escala de laboratório, das 500,0 g usadas na alimentação, obteve-se 125,0 g no tempo de moagem de 1 h, que corresponde a 25 % da alimentação. Em termos experimentais, esse valor (25%) está acima dos resultados alcançados no processo na unidade de beneficiamento da cooperativa, que atinge apenas 2,5% da alimentação.

No tocante ao redimensionamento dos equipamentos da unidade de beneficiamento os resultados mostraram que o britador primário opera com uma razão de redução de aproximadamente 2:1, sendo subutilizado. O redimensionamento dessa máquina propõe um ajuste da razão de redução (R) de 5:1, com as dimensões da boca de descarga, com um APA = 4,0 cm e um APF = 2,0 cm. Essas modificações aumentarão a eficiência do britador da cooperativa, produzindo um produto com menores granulometrias.

O rebritador da cooperativa com dimensões de 88 x 18 cm, e boca de descarga com APF = 3,0 cm, e APA = 5,0 cm deverá ser ajustado nas dimensões da boca de descarga,

para um APA = 18,0 mm e um APF = 6,0 mm. Essas modificações são possíveis no equipamento. Os resultados mostraram que o ajuste do rebitador irá produzir um material com 42% de sua granulometria $\leq 4,0$ mm. Esse tamanho de albita torna-se adequado para alimentar o moinho de bolas.

Para obtenção de uma granulometria $\leq 4,0$ mm, é necessário a implantação de uma peneira vibratória, operando em circuito fechado com o rebitador. Recomenda-se uma peneira de 1,0 m x 0,6 m com uma área total de 0,60 m².

Na escolha do moinho de bolas de seixos proposto para a cooperativa, a potência do motor elétrico trifásico para funcionamento do equipamento é de 228,0 HP, e a moagem será a seco, em circuito fechado. As dimensões do diâmetro nominal e comprimento nominal de 2,44 x 2,44 m, com descarga do material por transbordo, e a percentagem de volume de carga de bolas de 40% do volume total. O tamanho máximo de bolas ($B_{m\acute{a}x}$) empregadas na realização da moagem é de 38,0 mm.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se:

- ✓ Realizar os ensaios físicos (como de retenção, densidade, conde de fusão e pastilha) e de caracterização (difração de raios-x, fluorescência de raios x, e análise térmica diferencial e termogravimétrica) com amostras de albita de vários pontos distintos do Garimpo Alto Serra Branca.
- ✓ Realizar ensaios de moagem através do moinho de bolas em escala de laboratório, variando a percentagem da carga de enchimento entre 30 e 80%.
- ✓ Estudar a influência do tipo e tamanho do meio moedor empregado no moinho de bolas para moagem de feldspato albita.
- ✓ Realizar o redimensionamento do circuito de cominuição da COOMIPEL voltado para o feldspato potássico, focando o moinho de martelos.
- ✓ Realizar as simulações de britagem e moagem em software específico para cada etapa da cominuição após o redimensionamento.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. 2011. **Informações Técnicas: Matérias-Primas Naturais.** São Paulo – SP. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=47>>. Acesso em: 23 abril 2018.

ADUSUMILLI, M.S. 1976. **Contribuição a Mineralogia dos nióbio-tantalatos da Província Pegmatítica Nordestina.** Belo Horizonte, 254p. Tese para Livre Docência em Mineralogia. UFMG.

ARAÚJO, B. M. S. 2016. **Caracterização Tecnológica dos Concentrados Metálicos de Rochas Pegmatíticas e sua Extração no Semiárido Nordestino.** Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 21p.

BARBATO, C. N.; OGASAWARA. T; SAMPAIO, J. A. 2008. **Série Rochas e Minerais Industriais: Aproveitamento de feldspato pegmatítico da Região Borborema-Seridó para produção de vitrocerâmica feldspática reforçada com leucita – Rio de Janeiro: CETEM/MCT.**

BAYRAKTAR, I.; ÇAKIR, U. 2002. **Quality feldspar production at Çine Akmaden.** Industrial Mineral, n.416, May, p.56-59.

CAMERON, E.N.; JAHNS, R.H.; MCNAIR, A.H.; PAGE, E.L.R. 1949. **Internal structure of granitic pegmatites.** Economic Geology (Monograph, 2).115p.

CARVALHO, M. X. S. 2012. **Equipamentos de Fragmentação.** Monografia, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais,28p.

ČERNÝ P. 1991. **Rare-element granitic pegmatites.** Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geoscience Canada, 18: 49-67.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. 2003. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** 2ª edição, 425-563p, São Paulo, SP.

COELHO, J.M. 2009. **Perfil do Feldspato -** Ministério de Minas e Energia – Recife, PE.

COSTA-DE-MOURA, J. 2013. **Assinatura Geoquímica de columbita-tantalita e Levantamento Radiométrico de Pegmatitos Radioativos da região de Parelhas, Rio Grande do Norte, Brasil.** p. 128. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

Disponível em <<http://geobank.cprm.gov.br/>> Acesso em 20 abril de 2018.

DA SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A. 1984. **A Província Pegmatítica da Borborema-Seridó nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.** In: **Principais Depósitos Mineraiis do Nordeste Oriental - Série Geologia.** Nº 04. DNPM, Brasília.

DA SILVA, M.R.R. 1995. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. **Journal of South American Earth Sciences**, 8(3-4). p. 355-364.

DEER, W. A.; HOWIER R. A.; ZUSSMAN J. 1966. **Minerais Constituintes das Rochas:** Uma Introdução. Tradução. Ed. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. p. 547.

FERSMAN, A.E. 1931. **Les Pegmatites, leur importance scientifique et pratique.** **Academy of Science of URSS** (Traduzido para o francês por R. du Trien de Terdonck e J.Thoureau, Universidade de Louvain, Bélgica). 3 vols. 675p.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA S. L. M.; LUZ, A. B. 2004. **Cominuição;** In: **Tratamento de Minérios.** Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, capítulo 4.

FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. 2007.**Tratamento de minérios: Práticas Laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Capítulo 9, páginas 221-233.

GINSBURG, A. I.; TIMOFEYEV, I. N.; FELDMAN, L. G. 1979. **Principles of geology of the granitic pegmatites.** Nedra Publishing House, Moscow, 296p.

JAHNS, R. H. 1955.**The study of pegmatites:** Economic Geology, 50th Anniver.p.1025-130.

JOHNSTON Jr., W. D. 1945. **Pegmatitos amblygonita-berilo-tantalíferos do Ceará, Nordeste do Brasil.** Rio de Janeiro: DNPM/ Divisão de Fomento da Produção Mineral, (Avulso, 66).

- MOURA, O. J. M. 1981. **Programa Pegmatitos**. Metamig, Belo Horizonte, 95p.
- LIMA, M.P. 2002. **Aspecto da Lavra de Feldspato em Pegmatitos da Província da Borborema**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas – Universidade Federal de Campina Grande – CCT, Campina Grande, PB.
- LONDON, D. 2008. **Pegmatite**. The Canadian Mineralogist, Special Publication 10, 347p.
- LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. 2010. **Tratamento de Minérios** (5ª edição), 960 p, CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, RJ.
- LUZ, A.B; LINS, F.A.F. 2008. **Rochas e Minerais industriais**. 2ª edição, 990p, CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, RJ.
- LUZ, A. B.; COELHO, J. M. 2005. **Rochas e Minerais industriais**. CETEM. Rio de Janeiro, p. 413- 429.
- LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. 2003. **Pegmatitos do Nordeste: Diagnósticos sobre o Aproveitamento Racional e Integrado**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ.
- LUZ, A. B.; LINS F. F.; PIQUET B.; COSTA M. J.; COELHO J. M. 2002. **Pegmatitos do Nordeste – Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado**. CETEM, Rio de Janeiro, 49p.
- LUZ, A. B.; LINS F. F.; PIQUET B.; COSTA M. J.; COELHO J. M. 2002. **Aproveitamento Integral dos Pegmatitos do Nordeste: um tema recorrente**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, XIX, Recife, p. 642-650.
- MANNING, D. A. C. 1995. **Introduction to Industrial Minerals**. CHAPMAN & HALL. London.275p.
- MÁQUINAS FURLAN. 1970. **Equipamentos de mineração**. Disponível em <<http://furlan.com.br/moinho-de-barras-bolas/>> Acesso em 30 maio de 2018.

METSO. 2005. **Manual de Britagem**. 6ª Edição.

OLIVEIRA, F. A. N. 2001. **Caracterização Tecnológica do Feldspato Potássico e Estudo do Processo de Piroexpansão de Feldspatos**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 67p.

PINTO, C. S. 2006. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos.

RAMOS, L. J. 2001. **Balanço Mineral Brasileiro**. Feldspato, 15p. *In*: www.dnpm.gov.br

ROLFF, P. A. M. A. 1945. **Contribuição ao Estudo de Cassiterita no Nordeste**. Rio de Janeiro: DNPM.

ROLFF, P. A. M. A. 1946. **Minerais de Pegmatitos da Borborema**. Rio de Janeiro: DNPM.

SAMPAIO, J. A.; BARBATO, C. N. 2007. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM, Capítulo 9, páginas 169-176.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, A. N. G. 2007. **Tratamento de minérios: Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM, Capítulo 3, páginas 55-72.

SALLER, M. 1999. **Feldspar and Nepheline Syenite Reviewd**. *Industrial Minerals*. n.385, Oct., p.43-51.

SCORZA, E.P. 1944. **Província Pegmatítica da Borborema**. DNPM/DGM (Boletim 112). Rio de Janeiro, 55p.

SCHUMANN, W. 2006. **Gemas do Mundo**. Editora Disal, Barueri, 279 p.

SILVA, S. M. P.; CROSTA, A. P.; FERREIRA, F. J. F.; BEURLIN, H.; SILVA, A. M.; SANTOS, L. F. 2010. **Espectrometria de raios gama de granitos pegmatíticos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), nordeste do Brasil**. *Revista Brasileira de Geofísica*. v. 28, n. 4. São Paulo.

SILVA E. F. A. DA., CUNHA J. C., MARINHO M. M. 1996. **Pegmatitos da região de Itambé, Bahia: geologia e potencialidade econômica**. (Série Arquivos Abertos; 10). Salvador: CBPM. 30p.

SILVA, S. M. P.; CRÓSTA, A. P. 2011. **Mapeamento de pegmatitos da Faixa Seridó (FSe) com base na análise por componentes principais de imagens TM/Landsat-5 e Terra/ASTER e o apoio da espectroscopia de reflectância.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XV, Curitiba, INPE, p. 3597.

SOARES, D. R. 2004. **Contribuição a petrologias de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gamológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil.** Tese de Doutorado, UFPE, Recife, p.201.

SOLODOV, N. A. 1962. **Internal structure and geochemistry of rare- element granitic pegmatites.** Moscow: Academy of Sciences of the USSR, Moscow, p.243.

TAVARES S. T. P., CASTAÑEDA C., PEDROSA SOARES A. C. 2005. **A importância da Caracterização Química e Mineralógica do Feldspato para a sua Utilização na Indústria Cerâmica e Vidreira.** *Cerâmica Industrial*, 10 (4):22-27.

TREIN E. 1997. **Depósito de Feldspato de Colônia Castelhanos, São José dos Pinhais, Paraná.** In: Schobbenhaus C., Queiroz E. T. & Coelho C. E. S. Eds. **Principais Depósitos Minerais do Brasil: Rochas e Minerais Industriais.** Brasília, DNPM / CPRM. v 4. Parte B. p. 431-439.

VIDAL, F.; NOGUEIRA NETO, J. A. 2005 **Minerais de Pegmatitos.** Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará. Pg. 67-81. Rio de Janeiro-RJ.

VIAMICHELIN. 2001. **Itinerários, mapas, e reservas de hotel.**

Disponível em <<https://www.viamichelin.pt>> Acesso em 30 maio de 2018.

VIERA, E.V.; SILVA. G. F., VIDAL, F.W. H. 2016. O beneficiamento de feldspato na Província Pegmatítica da Borborema, região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente.** Volme 6, N° 1 – ISSN 2179-6203, 41pg.

WAN, K. W. 2008. Feldspar's fallow future. **Industrial Minerals**, London, p. 52-59, Dec. 2008.

WILLS, B. A.; NAPPIER MUNN, T. J. 2006. **Mineral Processing Technology.**

