



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

AUDENNILLE MARINHO DE ALMEIDA

**TRATAMENTOS TÉRMICOS DE UM FELDSPATO POTÁSSICO DE UM
PEGMATITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE OBJETIVANDO A
ELEVAÇÃO DO TEOR DE ÁLCALIS**

Recife
2017

AUDENNILLE MARINHO DE ALMEIDA

**TRATAMENTOS TÉRMICOS DE UM FELDSPATO POTÁSSICO DE UM
PEGMATITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE OBJETIVANDO A
ELEVAÇÃO DO TEOR DE ÁLCALIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Minerais Industriais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos da Silva
Oliveira

COORIENTADOR: Prof. Msc. Marinésio Pinheiro
de Lima

Recife

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

A447t Almeida, Audennille Marinho de.

Tratamentos térmicos de um feldspato potássico proveniente de um pegmatito do Estado do Rio Grande do Norte objetivando a elevação do teor de álcalis / Audennille Marinho de Almeida. - 2017.

88 folhas, il., tabs. e simbs.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira.

Coorientador: Prof. Msc. Marinésio Pinheiro de Lima.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2017.

Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia mineral. 2. Tratamento térmico. 3. Moagem. 4. Feldspatos. 5. Teor de álcalis. I. Oliveira, José Carlos da Silva (Orientador). II. Lima, Marinésio Pinheiro de (Coorientador). Título.

UFPE

622.35 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-307

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

**“TRATAMENTOS TÉRMICOS DE UM FELDSPATO POTÁSSICO DE UM
PEGMATITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE OBJETIVANDO A
ELEVAÇÃO DO TEOR DE ÁLCALIS”,**
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do **Prof.**
JOSÉ CARLOS DA SILVA OLIVEIRA. Considera a aluna **AUDENNILLE**
MARINHO DE ALMEIDA, Aprovada.

Recife, 09 de junho de 2017.

Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira
- Orientador – (UFPE)

Prof. Dr. Belarmino Barbosa Lira
- Examinador Interno – (UFPB)

Prof. Dr. Ivson Ferreira dos Anjos
- Examinador Externo – (UFPB)

Aos meus amados pais, José Audenor e Helena (em memória), aos meus irmãos queridos Audenor e Audilene, a minha linda e amada sobrinha Alice e ao meu noivo e companheiro de todas as horas, Bruno.

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui só foi possível com a ajuda de muitos. Muitos que eu gostaria de registrar aqui os meus mais sinceros agradecimentos.

Agradeço...

À Deus, pela vida, oportunidade e merecimento em estar realizando mais um sonho.

A Helena (em memória), minha mãe, que durante sua jornada aqui neste plano, foi minha maior incentivadora de todos os planos e projetos profissionais e pessoais.

Aos meus familiares José Audenor, amado pai, Audenor, querido irmão, que com muito carinho se fez presente, orientando quais seriam os melhores planos a serem traçados na conclusão deste trabalho, a minha irmã querida, Audilene, que mesmo na distância física, sempre foi presente e compartilhou cada detalhe minucioso deste trabalho, sempre com palavras de incentivos e confiança, a minha sobrinha linda Alice e aos meus cunhados Ana Paula, Gean e Pedro.

A Bruno, amado noivo, que com paciência esteve ao meu lado boa parte deste trabalho, incentivando e dando sempre força para seguir.

Ao professor José Carlos da Silva Oliveira, meu orientador científico, por ter disponibilizado todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Marinésio Pinheiro de Lima, pela co-orientação, com valorosos ensinamentos durante este trabalho.

Ao professor Márcio Luiz Siqueira Campos Barros, pela amizade e pelas valorosas discussões do dia-a-dia.

Ao professor Pedro Luiz Guzzo, pela orientação profissional que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGMinas da Universidade Federal de Pernambuco, pelas condições oferecidas durante o mestrado.

Aos funcionários do PPGMinas, em especial a Secretária Edna Araújo.

A todos os colegas de curso, em especial, Alan, Amanda, Amaro e Saulo, os quais tive o privilégio de trabalhar e conviver durante alguns anos.

Aos meus amigos da universidade Glenda, Alfredo César e Arthur, pelas conversas e discussões do dia-a-dia no corredor do Departamento de Engenharia de Minas.

Aos amigos José Carlos Farias Madruga e Reinaldo do DNPM, pelo incentivo.

Aos amigos da Biblioteca do Centro de Artes e Comunicação da UFPE, Beth, Olga e Humberto pelo incentivo desde o tempo de graduação até os dias de hoje.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia Mineral - LTM, em especial, Marcelo, Técnico de Laboratório, Alan, Amanda e Felipe Marinho, pela grande ajuda nos experimentos que fazem parte deste trabalho.

Ao pessoal do NEGLABISE, laboratório associado que ajudou no desenvolvimento deste trabalho, em especial a Professora Emília Tomé.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro durante toda a realização deste trabalho.

“Obstáculo é aquilo que você enxerga, quando se tira os olhos do seu objetivo.”

Henry Ford

RESUMO

Os minerais de pegmatitos, entre eles os feldspatos, são muito utilizados nas indústrias cerâmicas, tintas e construção civil. Os feldspatos são silicatos de alumínio, sendo um dos principais constituintes dos pegmatitos. Em geral, os minerais de feldspatos de pegmatitos são liberados por fragmentação e concentrados por meio de peneiramento ou classificação. O tratamento térmico, sem destruição da estrutura cristalina, poderá ser uma ferramenta auxiliar na liberação de minerais de interesse econômico, uma vez que os materiais sofrem dilatação volumétrica diferenciada com o aumento da temperatura. Este trabalho teve como principal objetivo empregar o tratamento térmico, associado à energia de ação da moagem, para liberar o feldspato potássico de um pegmatito e elevar o teor de álcalis nos produtos concentrados. Neste sentido, uma amostra foi coletada, de uma pilha de minério de feldspato potássico, lavrado seletivamente de pegmatitos graníticos, do Estado do Rio Grande do Norte. Uma amostra da pilha de minério foi caracterizada por análises granulométricas, térmicas, fluorescência e difração de raios X. Alíquotas da pilha de minério foram aquecidas nas temperaturas de 200, 400 e 800 °C e depois, foram fragmentadas, cada uma, num moinho de bolas, para os tempos de 20, 40, 80 minutos. O tratamento térmico da pilha de minério, nas alíquotas moídas por 80 minutos, passou da cor branca, na temperatura ambiente, para um tom pastel, a 800 °C. Nas análises de ATD e TG, uma alíquota da pilha de minério perdeu uma pequena quantidade de massa, da ordem de 0,1 %, durante o aquecimento entre as temperaturas ambiente e 1.100 °C. Uma transformação de fase ocorreu na temperatura de 571 °C, quando o quartzo α mudou para β . Os resultados mostraram que o tratamento térmico não contribuiu para a liberação dos minerais de feldspatos potássicos. A moagem contribuiu para a redução de tamanho das partículas, porém não foi observada a elevação no teor de álcalis. Os concentrados obtidos por peneiramento na fração inferior a 65 malhas, após moagem em diversos tempos e temperaturas, ficaram um pouco superior ao da pilha de minério. O resultado desfavorável do tratamento foi atribuído aos seguintes fatores: a pilha de minério estava com um teor de álcalis elevado e; a moagem privilegiou a fragmentação por atrito e foi realizada sem um prévio choque térmico.

Palavras-chave: Tratamento térmico. Moagem. Feldspatos. Teor de álcalis.

ABSTRACT

Pegmatite minerals including feldspars are widely used in ceramics, paint and construction industries. Feldspars are aluminum silicates and the main constituents of pegmatites. In general, feldspar pegmatites are released by fragmentation and concentrated by sieving or screening. Thermal treatment without crystalline structure destruction could be an auxiliary tool to release economic interest minerals since materials presents differentiated volumetric dilation with the temperature increase. The main aim of this work was to use thermal treatment associated with grinding action energy, to release the potassic feldspar from a pegmatite and increase the alkali content in the concentrated products. Therefore, a sample was randomly collected from a potassium feldspar ore, selectively washed of granitic pegmatites from the Rio Grande do Norte, Brazil. An ore pile was characterized by granulometric, thermal, fluorescence and X-ray diffraction analyzes. Aliquots from this ore pile were heated at 200, 400 and 800°C and then each aliquot was milled in a ball mill at 20, 40 and 80 minutes. The aliquots in heat treatment milled at 80 minutes changed from white, at room temperature, to a pastel tone at 800°C. In ATG e TG analysis, an ore pile aliquot lost a small mass amount of the order of 0,1%, during the heating between room temperatures and 1,100°C. A phase transformation occurred at the temperature of 571°C, when the quartz α changed to β . The results showed that the thermal treatment did not contribute to release the feldspar potassic minerals. The milling contributed to reduce the particles size, however the alkalis content was not increased. The concentrates obtained by sieving in fraction less then 65 mesh, after milling in various times and temperatures, were a little higher than ore pile. Unfavorable result of the treatment was attributed to the following factors: the ore pile was with a high alkalis content and; the grinding privileged the fragmentation by friction and accomplished without a previous thermal shock.

Keywords: Thermal treatment. Grinding. Release. Alkali content.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área (IBGE, 2015).	18
Figura 2 – Delimitação da Província Pegmatítica da Borborema em base geológica simplificada (SOARES, 2004).	22
Figura 3 - Bloco diagrama de um pegmatito zonado (adaptado de LONDON, 2008).	25
Figura 4 - Estrutura interna dos pegmatitos (adaptado de JOHNSTO JR., 1945).	26
Figura 5 - Classificação estrutural dos pegmatitos (adaptado de JOHNSTO JR., 1945 e ROLFF, 1945).	26
Figura 6 - Feldspatos potássicos e calco-sódicos (https://pt.wikipedia.org/wiki/Feldspato , acesso em 08 mar 2017).	28
Figura 7 - Diagrama de fases do sistema leucita - SiO ₂ (HLAVÀC, 1983).	30
Figura 8 - Diagrama de fases do sistema Na ₂ O - SiO ₂ (HLAVÀC, 1983)... Erro! Indicador não definido.	
Figura 9 - Circuito de beneficiamento do feldspato da Província da Borborema (adaptado de LIMA, 2002).	32
Figura 10 - Funções densidade f (d') e distribuição F (d') (GALERY, 2011)... Erro! Indicador não definido.	
Figura 11 - Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição dos fragmentos resultantes (KELLY, et al., 1982).	42
Figura 12 - Regime catarata (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).	48
Figura 13 - Regime cascata (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).	Erro! Indicador não definido.
Figura 14 - Difusão por lacunas (MILAN, 2014).	56
Figura 15 - Difusão intersticial (MILAN, 2014).	Erro! Indicador não definido.
Figura 16 - Energia de ativação (MILAN, 2014).	57
Figura 17 - Britador de mandíbula de um eixo da DENVER.	59
Figura 18 - Amostra fragmentada pelo britador de mandíbulas de um eixo.	60
Figura 19 - O fluxograma de preparação das amostras.	61
Figura 20 - Forno usado para o aquecimento das alíquotas.	62
Figura 21 - Ciclo térmico de aquecimento das amostras.	62
Figura 22 - Moinho usado na redução granulométrica das alíquotas.	63
Figura 23 - Fluxograma dos ensaios de moagem das alíquotas na temperatura ambiente e depois do tratamento térmico.	63
Figura 24 - Conjunto de peneiras usadas para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas após os ensaios de moagem.	64
Figura 25 - Difrátômetro de raios X da Bruker modelo D2 Phaser.	65
Figura 26 - Equipamento usado para realização da fluorescência de raios X.	66
Figura 27 - Fluxograma das amostras analisadas por FRX na temperatura ambiente.	66

Figura 28 - Fluxograma das amostras aquecidas e analisadas por FRX.	67
Figura 29 - Equipamento usado na realização das análises térmicas termodiferencial e termogravimétrica.	67
Figura 30 - Difratoograma da pilha de minério com as principais fases minerais, muscovita, microclina, albita, ortoclásio e quartzo.	68
Figura 31 - Interface do aplicativo (TOPAS), usado na quantificação das fases minerais pelo método de Rietveld.....	69
Figura 32 - Análise termodiferencial da amostra de alimentação, mostrando a temperatura do evento térmico associado a mudança de fase do quartzo.	71
Figura 33 - Distribuição do tamanho das partículas da pilha de minério.....	71
Figura 34 - Alíquotas moídas por 80 minutos a temperatura ambiente (a), e aquecidas a 200 °C (b), 400 °C (c) e 800 °C (d), mostrando a variação da coloração provocada pelo aumento da temperatura.	72
Figura 35 - Distribuição granulométrica das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos a temperatura ambiente (a) e após tratamento térmico a 200 °C (b), 400 °C (c) e 800 °C (d).	73
Figura 36 - Distribuição granulométrica das alíquotas moídas por 20 minutos (a), 40 minutos (b) e 80 minutos (c) a temperatura ambiente (30 °C) e tratadas termicamente à 200, 400 e 800 °C.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 37 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos a temperatura ambiente (30 °C).	74
Figura 38 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos após tratamento térmico à 200 °C. .	75
Figura 39 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos após tratamento térmico à 400 °C. .	75
Figura 40 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos após tratamento térmico à 800 °C. .	76
Figura 41 - Diâmetros médios das partículas em cada temperatura estudada	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mineralizações das zonas pegmatíticas (Adaptado de SIMMONS, et al., 2003).	27
Tabela 2 - Série dos plagioclásios (SEGEMAR, 2000).	28
Tabela 3 - Principais especificações para uso industrial do feldspato (SILVA et al., 1996). 35	
Tabela 4 - Equações empíricas da distribuição granulométrica do processo de quebra (GALERY, 2011)	38
Tabela 5 - Tipos de descarga de moinhos de bolas	53
Tabela 6 - Composição química da mostra de alimentação obtida por fluorescência de raios X	70
Tabela 7 - Diâmetro médio das partículas em cada tempo de moagem e temperatura associada	76
Tabela 8 - Análises químicas do feldspato do Pegmatito da Província da Borborema	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

an - Abertura de ordem n (mm)

a_0 - Abertura de referência (mm)

ATD - Análise térmica diferencial

Be - Berílio

C - Constante de proporcionalidade

CaO - Óxido de cálcio

Cs - Césio

DRX - Difração de raios X

d_{50} - Tamanho médio das partículas

E - Energia de consumo em circuitos de moagem

E_r - Energia específica calculada por Rittinger

E_k - Energia calculada por Kick

E_b - energia calculada por Bond

E_0 - Energia inicial

F - Tamanho da alimentação

Fe_2O_3 - Óxido de ferro

FRX - Fluorescência de raios X

K - Potássio

K_2O - Óxido de potássio

Li - Lítio

MgO - Óxido de magnésio

MnO - Óxido de manganês

Na - Sódio

Na_2O - Óxido de sódio

Nb - Nióbio

P - Tamanho do produto

PF - Perda ao fogo

P₂O₅ - Óxido de fósforo

r - Razão de escala (mm)

Rb - Rubídio

RPM - Rotações por minuto

SiO₂ - Sílica

Sn - Estanho

Ta - Tântalo

Ta - Temperatura da amostra (Ta) (°C)

Ti - Titânio

TiO₂ - Óxido de titânio

TG - Análise térmica gravimétrica

Tr - Temperatura da referência (Tr) (°C)

ΔT - Temperatura registrada (°C)

WI - Work Index

f_i - vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (t/h)

p_i - vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (t/h)

r_j - função taxa de quebra correspondente à i-ésima fração granulométrica (h⁻¹)

s_j - massa da carga no interior do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (t)

a_{ij} - função distribuição de quebra, correspondente à fração da j-ésima faixa granulométrica que aparece na i-ésima faixa granulométrica devido à fragmentação

d_i - taxa de descarga do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (h⁻¹)

R² - fator de correlação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Pegmatitos	20
2.1.1	Pegmatitos graníticos	20
2.1.2	Pegmatitos da Província da Borborema	21
2.2	Classificação dos pegmatitos da Província da Borborema	23
2.2.1	Pegmatitos homogêneos ou não diferenciados	23
2.2.2	Pegmatitos heterogêneos ou diferenciados	23
2.2.3	Pegmatitos mistos	27
2.3	Potencial econômico dos pegmatitos	27
2.4	Feldspato	27
2.4.1	Mineralogia e geologia	27
2.4.2	Lavra e beneficiamento	31
2.4.3	Aplicações do feldspato	32
2.4.4	Produção de feldspatos no Brasil	36
2.5	Análise granulométrica	36
2.5.1	Distribuição de tamanho das partículas	37
2.5.2	Cálculo do diâmetro médio das partículas (d50)	40
2.6	Princípios de fragmentação	40
2.6.1	Mecanismos da fragmentação	41
2.6.2	Compressão	41
2.6.3	Impacto	41
2.6.4	Atrito ou Cisalhamento	42
2.7	Leis da fragmentação	42
2.7.1	Lei de Rittinger	42
2.7.2	Lei de Kick	43
2.7.3	Lei de Bond	44
2.8	Moagem	47
2.8.1	Regime de operação dos moinhos	47
2.8.2	Tipos de moinhos	49
2.8.3	Moinho de bolas	52
2.9	Tratamento térmico	54
2.9.1	Difusão	55
2.9.2	Difusão em materiais cerâmicos	58

3	METODOLOGIA	59
3.1	Coleta e preparação das amostras	59
3.2	Tratamentos térmicos das alíquotas	61
3.3	Ensaio de moagens	62
3.4	Análises granulométricas dos produtos das moagens	64
3.5	Análises mineralógicas	65
3.6	Análise química	65
3.7	Análises térmicas	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	Caracterização mineralógica da pilha de minério.....	68
4.2	Caracterização química da pilha de minério	69
4.3	Caracterização térmica da pilha de minério.....	70
4.4	Caracterização granulométrica da pilha de minério	71
4.5	Tratamento térmico e ensaio de moagem	72
4.6	Análises químicas	77
5	CONCLUSÃO	80
	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</u>	<u>81</u>
	<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>82</u>
	<u>ANEXO</u>	<u>88</u>

1 INTRODUÇÃO

Os feldspatos são silicatos de alumínio que podem ser encontrados em pegmatitos. Normalmente, os feldspatos são utilizados nas seguintes indústrias: cerâmicas, construção civil, tintas, farmacêuticas, plásticos, etc. Essa matéria prima é a base de estudo deste trabalho.

O aumento na utilização dos minerais de pegmatito nas indústrias cerâmicas e construção civil faz com que haja uma preocupação no sentido de que ocorra uma melhor organização produtiva destes minerais, na qual a quantidade e a frequência de fornecimento destes insumos possam continuar a suprir a demanda de mercado (LIMA, 2002).

Os principais pegmatitos da Região Nordeste são encontrados na Província Pegmatítica da Borborema. O nome desta Província provém do fato de que esta Região se encontra localizada no Seridó, na borda Ocidental do Planalto da Borborema, compreendida entre os Estados da Paraíba e o Rio Grande do Norte (LIMA, 2002).

Esta região possui uma reserva de minerais metálicos e não metálicos de considerável relevância no âmbito nacional e internacional, merecendo destaque pela grande quantidade de minerais industriais provenientes dos pegmatitos (LIMA, 2002).

Os feldspatos são silicatos que contêm diferentes proporções de cálcio, potássio, sódio e bário (raramente). Eles também ocorrem em rochas graníticas e são os principais minerais dos pegmatitos, associados a diversos outros minerais (DNPM, 2014).

No Brasil, a reserva medida de feldspato é da ordem de 316 milhões de toneladas, distribuída entre os Estados do Paraná (28,3 %), Minas Gerais (13,3 %), Paraíba (10,4 %), Rio Grande do Norte (10,2 %), Rio de Janeiro (10,2 %), Bahia (8,9 %), São Paulo (8,2 %), Santa Catarina (6,2 %) e Tocantins (4,3 %). A produção mundial de feldspato em 2013 atingiu aproximadamente 22,96 milhões de toneladas e os maiores produtores foram: Turquia (30,5 %), Itália (20,5 %), China (9,1 %), Tailândia (4,8 %), França (2,8 %), Irã (2,8 %), Japão (2,6 %), Espanha (2,6 %) e Índia (2,3 %). A produção brasileira responde por aproximadamente 1,2 % do total mundial (DNPM, 2014).

O material de estudo desta pesquisa foi oriundo do Estado do Rio Grande do Norte, onde se encontra as principais ocorrências de pegmatitos do Nordeste Oriental do Brasil, correspondente a Província Pegmatítica da Borborema. Pelo Estado da Paraíba, o acesso à região se faz pela BR-230, partindo de João Pessoa-PB no sentido oeste, percorrendo os Municípios de: Campina Grande-PB, Soledade-PB, Juazeirinho-PB e Junco do Seridó-PB. Pelo Estado do Rio Grande do Norte, a partir de Natal-RN, o acesso é pela BR-226, até Currais

O beneficiamento de pegmatitos contendo feldspatos potássicos no Nordeste do Brasil tem sido feito por fragmentação e peneiramento, quase que exclusivamente (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Segundo Sanzonowicks e Mieniczuk (1985), o tratamento térmico em temperatura elevada tem como objetivo a destruição da estrutura cristalina dos minerais de feldspatos para formação de compostos, nos quais o potássio se encontre numa forma mais disponível. Neste trabalho, o tratamento térmico do pegmatito será realizado em temperaturas que não promovam a destruição da estrutura cristalina dos feldspatos.

Desse modo, o objetivo principal desse trabalho é empregar o tratamento térmico, associado à energia de ação da moagem, para melhorar a liberação do feldspato potássico da lavra seletiva de um pegmatito da Região Nordeste do Brasil, com o intuito de elevar o teor de álcalis dos produtos concentrados.

Os objetivos específicos deste trabalho foram os seguintes:

- a) caracterizar a pilha de minério por difração de raios X, análise química através da fluorescência de raios X, análise térmica gravimétrica (ATG), análise térmica diferencial (ATD) e a distribuição do tamanho das partículas;
- b) avaliar as características físicas do minério para tempos de moagem de 20, 40 e 80 minutos e nas temperaturas de 200 °C, 400 °C e 800 °C;
- c) avaliar o teor de álcalis nas frações granulométricas para cada tempo de moagem nas diferentes temperaturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

INTRODUÇÃO

Esta seção foi desenvolvida com temas que pudessem fazer com que este trabalho fosse melhor compreensível e que serviram de embasamento para o desenvolvimento do mesmo.

2.1 Pegmatitos

São corpos de rocha de composição basicamente granítica (quartzo-feldspato-mica), de granulação geralmente grossa, muitas vezes exibindo cristais gigantes, encaixados em estruturas lineares desenvolvidas em terrenos metamórficos (HAMBERG, 1958).

Ainda, segundo Rolff (1945), os pegmatitos podem ser classificados em homogêneos, quando não exibem zoneamento mineralógico interno, em heterogêneos, quando exibem um zoneamento mineralógico e textural interno bem consistente, com zonas bem definidas e, em mistos, cujas características são intermediárias entre os pegmatitos homogêneos e heterogêneos.

2.1.1 Pegmatitos graníticos

Segundo London (1996), os pegmatitos graníticos são caracterizados pela presença de fases minerais de tamanho exageradamente grande, (que os distinguem das demais rochas intrusivas como granitos, dioritos, etc.) pela heterogeneidade, incluindo abrupta variação no tamanho do grão ou na mineralogia, anisotropia de fábrica e uma extensa gama de morfologia de cristais (esqueletal, gráfica, eudral), podendo ser gerado por magmas de todas as composições.

Segundo Solodov (1959), os pegmatitos graníticos podem ser divididos em quatro grupos, de acordo com sua mineralogia e composição química, sendo eles:

- a) Pegmatitos a microclina: contendo K e Be;
- b) Pegmatitos a albita - microclina: contendo K, Na, Ta, Be, Cs, Rb, Ti e Li;
- c) Pegmatitos a albita: contendo Na, Li, Be, Ta, Nb e Sn;
- d) Pegmatitos a albita - espodumênio: contendo Na, Li, Nb e Sn.

Os pegmatitos são ricos em minerais industriais e metálicos, tais como, feldspato, quartzo, mica, tantalita, columbita e em menores quantidades o espodumênio, as terras raras (Be, Ta-Nb) (Silva et al. 2010; Lima e Neves 2013), minerais radioativos e monazita (LIRA, et al. 2016).

2.1.2 Pegmatitos da Província da Borborema

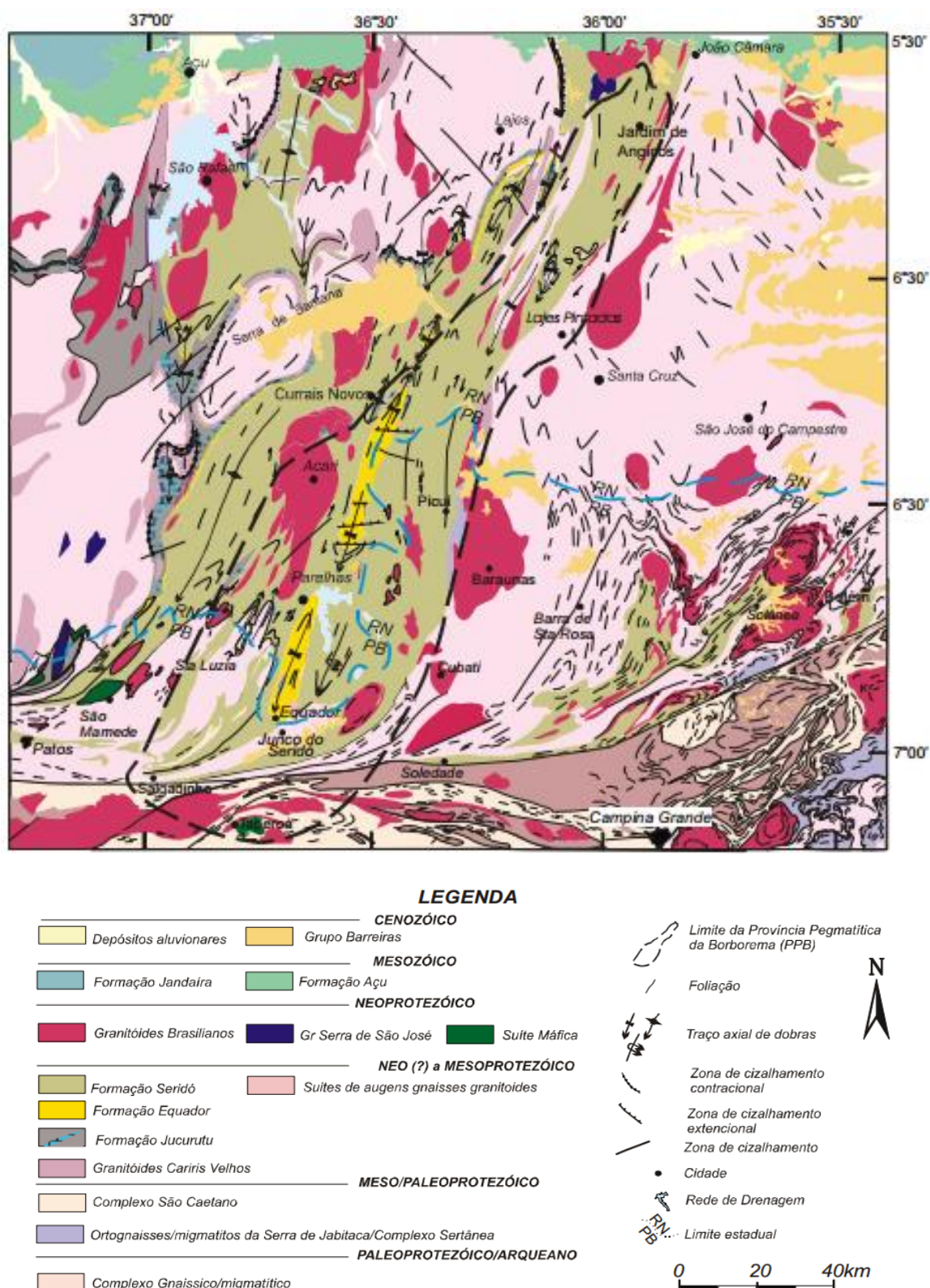
A localização da Província Pegmatítica da Borborema coincide em grande parte com a Faixa Seridó. Seu embasamento cristalino é dado através das rochas do Complexo Caicó, que estão representados por metassedimentos, migmatitos e ortognaisses granodioríticos, tonalíticos e graníticos, com idades arqueanas a paleoproterozoicas, segundo dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Angelim et al. (2006). As rochas da Faixa Seridó variam das fácies xisto verde a anfibolito alto.

A Província Pegmatítica da Borborema - Seridó compreende os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte (Figura 2). Atualmente, o processo de aproveitamento do feldspato na Província Pegmatítica está concentrado nos municípios de Frei Martinho, Nova Palmeira, Pedra Lavrada, Picuí, São Mamede e Seridó, no Estado da Paraíba, e em Alexandria, Currais Novos, Equador e Parelhas, no Estado do Rio Grande do Norte (ANGELIM, et al., 2006).

Aproximadamente quatrocentos corpos pegmatíticos encontram-se intrudidos em micaxistos, quartzitos e gnaisses. Em proporções bem menores, nos gnaisses e migmatitos do complexo gnáissico - migmatítico (ANGELIM, et al., 2006).

Os pegmatitos são divididos em simples (plagioclásio, quartzo e mica não zonados) e complexos (maior variedade de minerais e fortemente zonados). Os pegmatitos simples são homogêneos ou não diferenciados. Os pegmatitos complexos, ao contrário, são heterogêneos ou diferenciáveis. Nesses últimos podem ser encontrados cristais gigantes de diversos metros (ANGELIM, et al., 2006).

Figura 2 – Delimitação da Província Pegmatítica da Borborema em base geológica simplificada.



Fonte: SOARES, 2004.

2.2 Classificação dos pegmatitos da Província da Borborema

Segundo Rolff (1945), os pegmatitos dessa região podem ser classificados como: homogêneos, heterogêneos e mistos.

2.2.1 Pegmatitos homogêneos ou não diferenciados

São constituídos principalmente por quartzo, feldspato, muscovita, biotita, schorlita e almandina, que estão distribuídos de forma regular em todo o pegmatito, com granulometria que pode variar de centímetros a decímetros, com comuns intercrescimentos gráficos de quartzo e feldspato. Possuem formas tabulares, com dimensões que podem atingir quilômetros de extensão e pequenas larguras.

2.2.2 Pegmatitos heterogêneos ou diferenciados

Segundo Johnsto Jr. (1945), os pegmatitos caracterizam-se por formarem zoneamento, onde é possível a identificação dos seus minerais essenciais. Eles são compostos basicamente por quatro zonas a partir do contato até o centro do pegmatito, que são identificadas como Zona I, Zona II, Zona III e Zona IV.

Zona I - Chamada também de Zona de Borda ou Marginal, corresponde à zona de contato entre o pegmatito e a rocha encaixante e caracteriza-se pela espessura fina (poucos centímetros ou metros) e pela textura aplítica na maioria dos pegmatitos. Composta normalmente por muscovita em placas bem desenvolvidas, intercrescidas com quartzo, feldspato sódico e potássico. Podem ser encontrados minerais acessórios como afrisita, cassiterita, e raramente granada. Quando o pegmatito se encontra encaixado em xisto, esta zona apresenta-se mais desenvolvida.

Zona II - Chamada de Zona Mural ou de Parede, é muito semelhante a um pegmatito homogêneo quanto à granulação, composição e estrutura. Possui granulação grosseira e espessura maior que a zona de borda. São compostas por k-feldspato, albita, muscovita, turmalina, quartzo e pertita. Biotita, apatita (e outros fosfatos), columbita-tantalita, granada e berilo são menos comuns. Mica e berilo são os principais minerais econômicos dessa zona.

Os feldspatos são de dois tipos: k-feldspatos pertítico e albita, e quando estão em corpos de substituição, normalmente encontram-se associados a micas tardias. O k-feldspato ocorre normalmente nas zonas I e II intercrescidos com quartzo e micas ou formando grandes cristais na zona III.

Zona III - Fica localizada entre a zona mural e o núcleo. Normalmente é a área mais desenvolvida do pegmatito. Composta essencialmente por feldspatos em cristais gigantes, quartzo, espodumênio, tantalita e outros minerais acessórios. Na parte externa dessa zona encontra-se a maior parte do berilo. Esta zona inclui a maior parte dos minerais metálicos.

Zona IV - É constituída por um núcleo localizado na parte central do pegmatito podendo ser descontínuo em relação ao eixo central. Sua mineralização é composta por quartzo leitoso estéril, sendo o mais habitual, porém havendo ainda o róseo ou citrino ou ametista e fumê associado a outros minerais, tais como: plagioclásio, pertita, turmalina, espodumênio e também por quartzo de alta pureza.

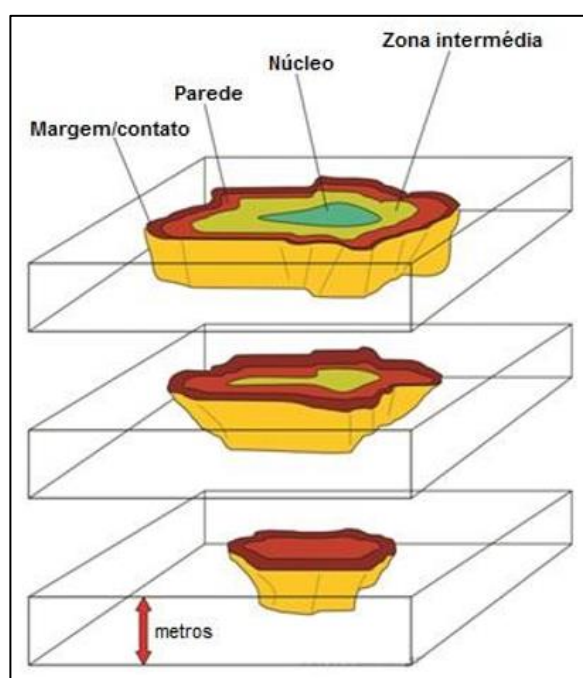
Todas estas zonas, num total de quatro, são raras de estarem presentes nos pegmatitos. Os pegmatitos zonados são os mais importantes economicamente. Na Tabela 1 e nas Figuras 3, 4 e 5 podemos verificar a estrutura de um pegmatito zonado, suas texturas, minerais principais e acessórios de acordo com cada zona.

Tabela 1 - Mineralizações das zonas pegmatíticas.

Zona	Textura	Minerais principais	Minerais acessórios
Margem/Contato	granulometria fina	plagioclásio/microclina, quartzo ± muscovita	turmalina negra, granada, microclina/plagioclásio
Parede	grosseira	quartzo, plagioclásio, microclina, ± muscovita, ± biotita	turmalina negra, granada, berilo, apatita
Zona intermediária externa	progressivamente mais grosseira com cristais maiores, desenvolvimento de cavidades	microclina, quartzo	turmalina negra - elbaíta, plagioclásio sódico, muscovita, fosfatos
Zona intermediária interna	tanto grosseira como fina, alguns cristais maiores, desenvolvimento de cavidades	quartzo, microclina, plagioclásio sódico, ± muscovita, ± biotita	turmalina negra - elbaíta, berilo, fosfatos, minerais Nb – Ta
Núcleo	...	quartzo	berilo, espodumênio

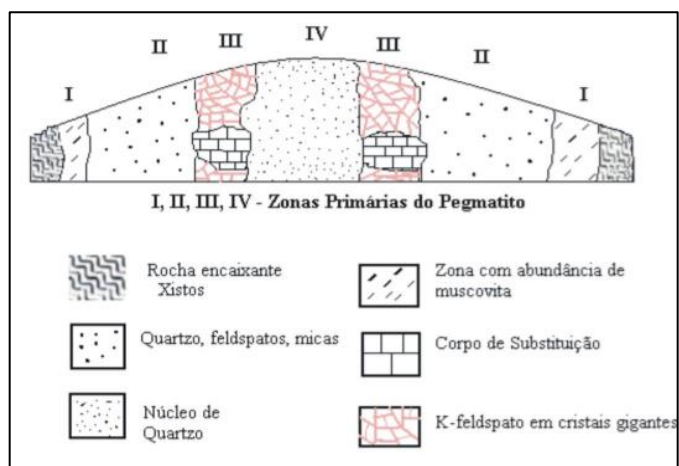
Fonte: Adaptado de SIMMONS, et al., 2003.

Figura 3 - Bloco diagrama de um pegmatito zonado.



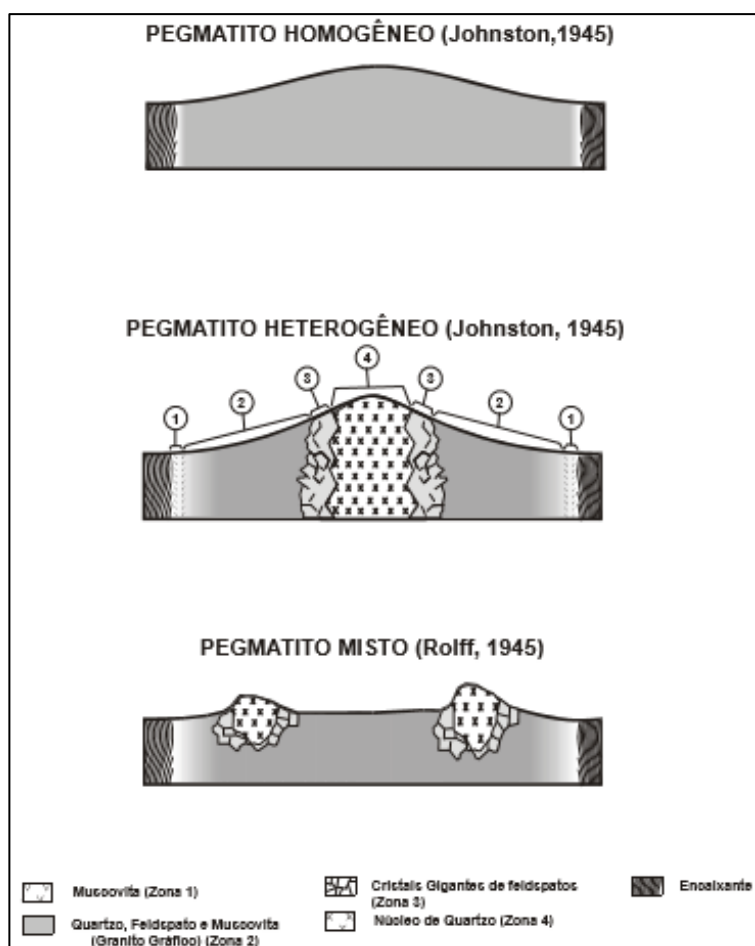
Fonte: Adaptado de LONDON, 2008.

Figura 4 - Estrutura interna dos pegmatitos.



Fonte: Adaptado de JOHNSTO JR., 1945.

Figura 5 - Classificação estrutural dos pegmatitos.



Fonte: Adaptado de JOHNSTO JR., 1945 e ROLFF, 1945.

2.2.3 Pegmatitos mistos

São pegmatitos intermediários entre os tipos homogêneos e heterogêneos que apresentam núcleos irregulares de cristais de quartzo e região semelhante em torno desses núcleos, com as Zonas II e III dos pegmatitos heterogêneos. Ocorrem em pequeno número e podem conter lítio, cobre, tântalo e berilo (ROLFF, 1945).

2.3 Potencial econômico dos pegmatitos

Os pegmatitos heterogêneos da Província da Borborema são responsáveis pelo maior volume de produção, sendo os minerais metalíferos, micas, pedras coradas e feldspatos para fins cerâmicos e indústria de vidros. Porém, existem registros no Estado da Paraíba de pegmatitos homogêneos com alta produção de tantalita, cassiterita, espodumênio e berilo, extraídos a partir de lavra garimpeira (LUZ, et al., 2003).

2.4 Feldspato

2.4.1 Mineralogia e geologia

Os feldspatos são silicatos de alumínio apresentando quantidades diferentes de cálcio, potássio, sódio e bário (raramente). Eles ocorrem em rochas graníticas e são os principais minerais dos pegmatitos, encontrando-se associados a outros tipos de minerais (DNPM, 2014).

Os feldspatos são divididos em três grupos: feldspatos potássicos (ortoclásio, microclina, sanidina, adulária), feldspato de bário (celsiana) e o feldspato calco-sódico (plagioclásio, este por sua vez é formado pela associação da albita, um feldspato sódico, com a anortita, que é um feldspato cálcico) (SEGEMAR, 2000). A Figura 6 mostra os feldspatos potássicos e calco-sódicos. E a Tabela 2 mostra a série dos plagioclásios.

Figura 6 - Feldspatos potássicos e calco-sódicos.



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Feldspato>, acesso em 08 mar 2017.

Tabela 2 - Série dos plagioclásios.

Plagioclásio	% Albita	% Anortita
Albita ($\text{Na}_{1-0,9}, \text{Ca}_{0-0,1}$)Al($\text{Al}_{0-0,1}, \text{Si}_{1-0,9}$)Si ₂ O ₈	100 – 90	0 – 10
Oligoclásio (Ca,Na)Al (Al,Si)Si ₂ O ₈	90 – 70	0 – 30
Andesina ($\text{Na}_{0,7-0,5}, \text{Ca}_{0,3-0,5}$)Al($\text{Al}_{0,3-0,5}, \text{Si}_{0,7-0,5}$)Si ₂ O ₈	70 – 50	30 – 50
Labradorita ($\text{Na}_{1-0,9}, \text{Ca}_{0-0,1}$)Al($\text{Al}_{0-0,1}, \text{Si}_{1-0,9}$)Si ₂ O ₈	50 – 30	50 – 70
Bitownita ($\text{Na}_{0,3-0,1}, \text{Ca}_{0,7-0,9}$)Al($\text{Al}_{0,7-0,9}, \text{Si}_{0,3-0,1}$)Si ₂ O ₈	30 – 10	70 – 90
Anortita Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈) (Na _{0,1-0} , Ca _{0,9-1})Al(Al _{0,9-1} , Si _{0,1-0})Si ₂ O ₈	10 – 0	90 – 100

Fonte: SEGEMAR, 2000.

O sódio pode substituir o potássio. Na variedade sanidina essa substituição pode chegar até 50 % (DANA, 1970).

Os feldspatos potássicos costumam ser róseos e os cálcicos ou sódicos brancos (BARBATO; OGASAWARA e SAMPAIO, 2008).

Há ainda um grupo de minerais quimicamente semelhantes aos feldspatos, denominados de feldspatóides e que contém uma menor quantidade de sílica. Os feldspatóides são aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio, como elementos principais, porém com menores quantidades de outros íons (DANA, 1970).

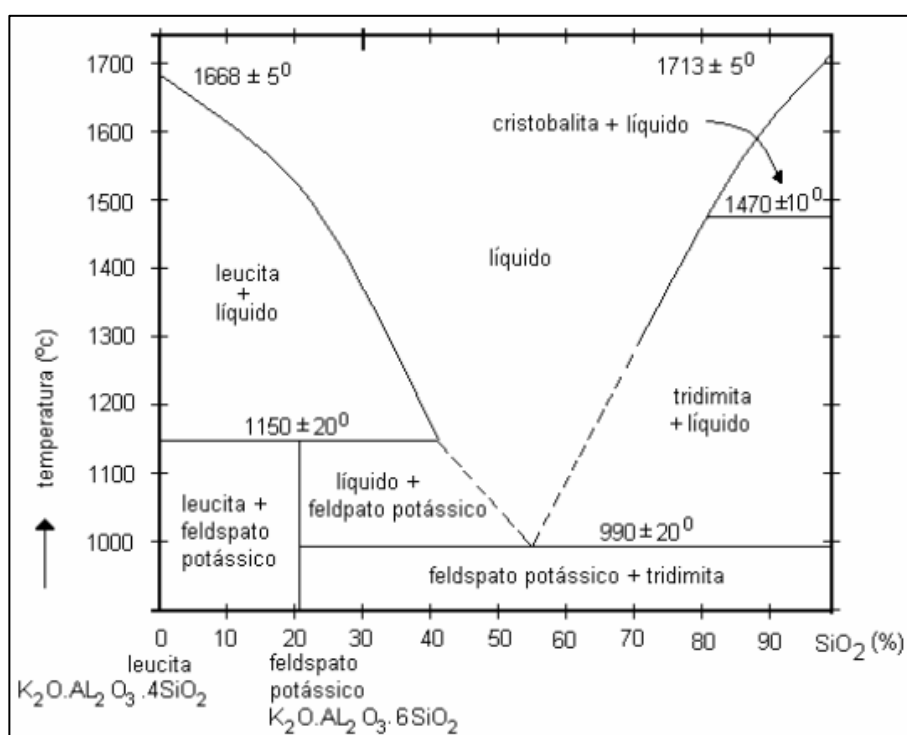
Os feldspatóides possuem cerca de dois terços de sílica existente nos feldspatos alcalinos e, por isso, tendem a formar soluções ricas em álcalis (sódio e potássio) e pobres em sílica (DANA, 1970).

Os feldspatóides mais frequentes são a leucita (KAlSi_3O_6) e a nefelina $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$. Os feldspatóides sodalita e lazurita são raros. A nefelina é a espécie mais comum dos feldspatóides, podendo ocorrer em rochas ígneas, tanto plutônicas quanto vulcânicas (SEGEMAR, 2000).

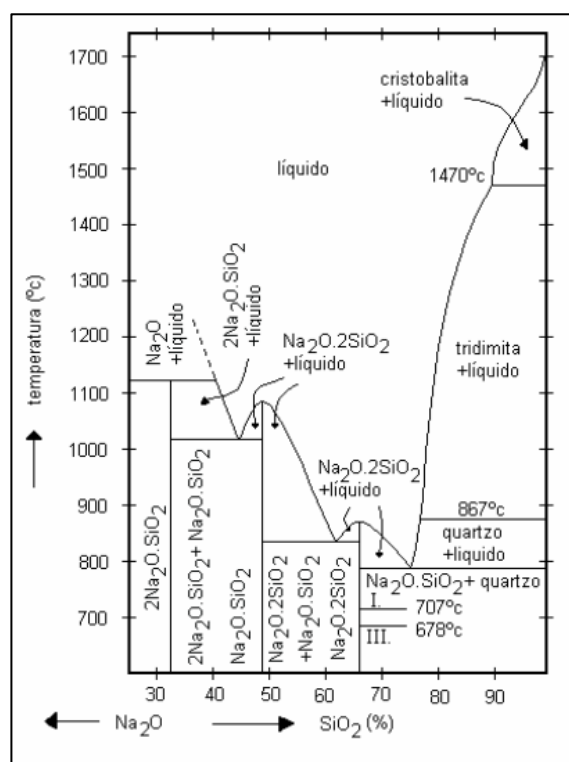
A presença de grandes cristais, pureza e abundância dos pegmatitos fazem com que eles sejam a principal fonte de feldspato. Na Província da Borborema, nos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, e na Província Oeste, no Estado de Minas Gerais, encontram-se os principais depósitos de pegmatitos do Brasil. Essas províncias fornecem feldspatos potássicos e algum feldspato sódico para as indústrias cerâmicas (MOTA, et al., 2002).

Os feldspatos possuem uma característica típica que é seu comportamento próximo ao ponto de fusão. As transformações polimórficas são de menores importâncias porque os feldspatos alcalinos tornam-se normalmente líquidos e vitrificam-se após o resfriamento. Em relação às características fundentes, os feldspatos potássicos fundem-se incondicionalmente a 1.150°C . A Figura 7 mostra o diagrama de fases do sistema $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ (leucita) - SiO_2 . A presença de Na_2O nos feldspatos baixa significativamente o ponto de fusão, conforme mostra o diagrama de fases do sistema $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ (Figura 8). O conteúdo natural de álcalis, nos feldspatos, varia entre 10 % a 15 % (HLAVÁČ, 1983).

Ainda de acordo com o autor anterior, o conteúdo natural de álcalis, nas rochas alcalinas (fonolitos, nefelina, sienitos, etc), feldspatóides, pode ultrapassar 15 %, principalmente o de Na_2O .

Figura 7 - Diagrama de fases do sistema leucita - SiO_2 .

Fonte: HLAVÁČ, 1983.

Figura 8 - Diagrama de fases do sistema Na_2O - SiO_2 .

Fonte: HLAVÁČ, 1983.

2.4.2 Lavra e beneficiamento

Os métodos de exploração e lavra dos pegmatitos nas principais regiões produtoras do País são ainda pouco desenvolvidos tecnologicamente, fato este muitas vezes associado ao baixo preço alcançado pelos bens minerais de feldspato e quartzo, que inviabiliza a aplicação de sistemas de suporte mecânico para estabilização das escavações (LIMA, 2002).

Como visto, os pegmatitos podem ser zonados. Os feldspatos lavrados terão valores econômicos diversificados de acordo com a zona que se encontram. A extração das três zonas principais deste pegmatito implica numa lavra total. As operações unitárias, de perfuração e desmonte, de carregamento e transporte, deverão ser realizadas com finalidade de não contaminar, sempre que possível, os produtos de características e valores comerciais diversos (LIMA, 2002).

O beneficiamento de feldspato geralmente envolve flotação reversa de quartzo e separação magnética para remover os minerais acessórios tais como mica, granada, ilmenita e quartzo. No caso de depósitos de pegmatitos e de areia feldspática, o quartzo ocorre como coproduto. Em algumas aplicações, a presença da sílica é vantajosa, no entanto, em outras requer um feldspato bastante puro e moído (LUZ, et al., 2005).

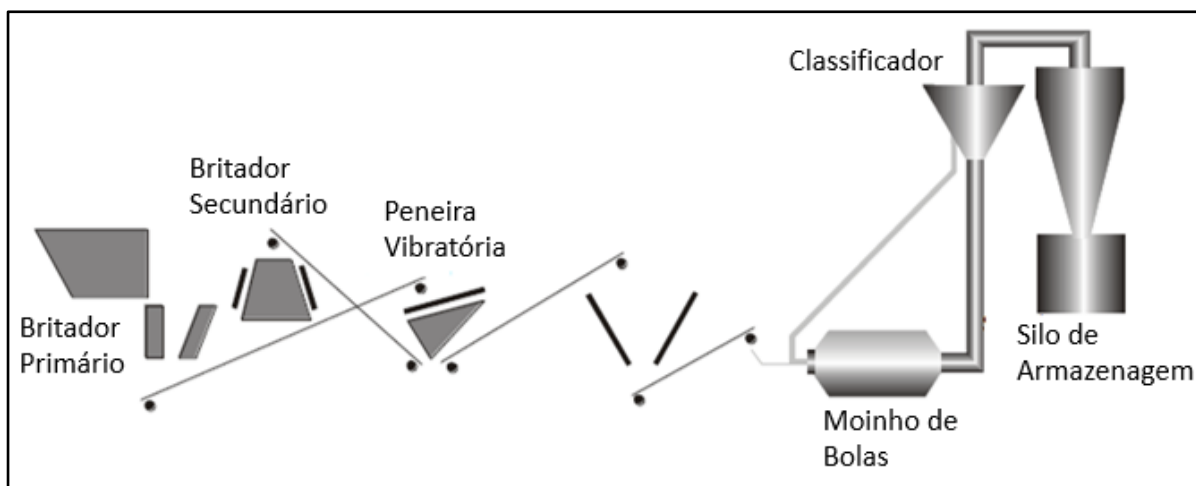
Ainda segundo o autor acima, a lavra é seletiva, constando das seguintes operações: perfuração e desmonte realizados com explosivos, catação e carregamento manuais, transporte para o pátio, muitas vezes com guinchos e carros de mão, estocagem de cada produto produzido em pilhas com granulometria distintas, de até 400 mm. O feldspato é transportado para o abastecimento das plantas de beneficiamento locais, onde são colocados no mercado nacional ou internacional. O feldspato também é vendido diretamente da mina em forma bruta para as Regiões Sul e Sudeste do País.

O processo de beneficiamento é realizado através de um circuito de britagem, sendo a britagem primária composta por um britador de mandíbulas e a britagem secundária por um britador cônico trabalhando em circuito fechado, produzindo-se um feldspato com uma granulometria que seja adequada a alimentação da moagem ou que pode ser vendido diretamente para determinados seguimentos que consomem o feldspato a granel.

O circuito de moagem é composto por moinhos de bolas que produzem o feldspato com granulometria variando de 30 a 325 malhas, sendo o produto ensacado e estocado.

A Figura 9 mostra o fluxograma básico de uma planta de beneficiamento de feldspato utilizadas pelas empresas localizadas na Província da Borborema (LIMA, 2002).

Figura 9 - Circuito de beneficiamento do feldspato da Província da Borborema.



Fonte: Adaptado de LIMA, 2002.

2.4.3 Aplicações do feldspato

Os usos dos feldspatos potássicos e sódicos estão intrinsicamente associados à sua composição química e as suas características. Estes parâmetros são de extrema importância, para determinação do fim a que vai ser destinado o seu uso, se para os segmentos de revestimentos cerâmicos, colorifícios ou vidros. Os componentes químicos de maiores influências são: a alumina (Al_2O_3), os álcalis (K_2O e Na_2O) e o óxido de ferro (Fe_2O_3). Em se tratando da Província Pegmatítica Borborema-Seridó, os feldspatos potássicos apresentam teores de alumina entre 18 % a 20 %, álcalis maiores que 14 %, com K_2O superior a 11 %, a razão $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ com valores 2,5 a 10,1 e o óxido de ferro variável entre 0,09 % a 0,13 % (ANGELIM, et al., 2006).

Ainda segundo Angelim et al. (2006), os feldspatos que estão encaixados nos quartizitos são menos impuros, seus teores de óxido de ferro são muito baixos, menores que 0,05 % ou até mesmo não identificados. Já os feldspatos sódicos possuem teor de alumina entre 18 % a 20 %, álcalis maiores que 10 %, Na_2O superior a 10 % e óxido de ferro inferior a 0,11 %. A maior parte dos feldspatos com estas características, também são utilizados nas industriais de revestimentos cerâmicos, colorifícios ou vidros.

De acordo com a composição do feldspato, dividimo-los em três categorias: feldspato com utilização em massa ou corpo cerâmico, sendo o percentual de sílica e a relação soda-potassa as bases da sua classificação; feldspatos com utilização em materiais vidrados e esmaltados, de acordo com o teor de sódio neste caso e; o feldspato utilizado na fabricação de vidros, para este, o teor de sílica, alumina e ferro são os fatores determinantes (NORTON, 1973).

A indústria de cerâmica para porcelanas e azulejo branco exige feldspato com pequenas quantidades de ferro (menos que 0,2 %), pouco quartzo (menos de 10 %) e ponto de fusão próximo de 1.200 °C (ABREU, 1973).

Dentre as características físicas, podemos destacar os testes de fusibilidade e os ensaios de cone, os quais indicam um provável uso da amostra na massa e no esmalte, a partir do aspecto superficial após a queima de cones moldados com o feldspato moído e do escorrimento (fusibilidade) de corpos de prova queimados. Estes ensaios definem, após a queima, uma série de parâmetros positivos, como a tonalidade esbranquiçada, brilho e fusibilidade nos ensaios de cone e com valores de escorrimento maiores que 35 mm, sem ocorrência de fervura (ANGELIM, et al., 2006).

De acordo com Cordeiro (2012), o feldspato é considerado indispensável na composição dos esmaltes cerâmicos, sendo misturado com outros principais óxidos que formam o esmalte, ou seja, sílica, alumina e óxidos alcalinos. Além disso, o feldspato é o fundente mais comum usado na composição dos esmaltes, principalmente pela quantidade de sódio e potássio. O feldspato pode ser empregado em diversas composições de massas cerâmicas e, conseqüentemente, obter diversos tipos de produtos, dependendo do seu teor de ferro.

O consumo de feldspato no Brasil está concentrado principalmente em dois setores: indústrias cerâmicas e vidro. Na indústria cerâmica, encontramos o uso de feldspatos como fundente (diminuindo a temperatura de fusão) e como fornecedor de SiO_2 (sílica), enquanto que na fabricação de vidros, o feldspato além de ser utilizado como fundente, também é uma fonte de produção de Al_2O_3 , Na_2O , K_2O e SiO_2 . A alumina (Al_2O_3) tem a função de aumentar a durabilidade, a dureza e a resistência à corrosão química. Os álcalis, área de interesse deste estudo, (Na_2O e K_2O) atuam como fundentes, substituindo parcialmente a barrilha (carbonato de sódio comercial) (SOUSA, 2012).

Na fabricação de porcelanatos, os feldspatos são utilizados como fundentes proporcionando as primeiras fases líquidas durante o processo de queima do porcelanato, sendo

responsáveis pelo processo inicial de densificação, contribuindo assim para a redução da porosidade no porcelanato. Com relação à fusibilidade e a formação de eutéticos com outros elementos presentes, o processo de gresificação pode ser alcançado ainda que as temperaturas sejam relativamente baixas, características estas dos minerais feldspáticos (BIFI, 2000).

As indústrias de vidro, cerâmica e coloríficos, no Brasil, ainda são as maiores responsáveis pelo consumo de feldspatos beneficiados. Segundo Luz et al (2003), o consumo chega a ser de 88 %, sendo o restante consumido pelas indústrias de louças sanitárias, de mesa e porcelanas elétricas. Já o preço do feldspato pode variar em virtude dos diferentes segmentos industriais, de suas características granulométricas, dos teores de K_2O , Na_2O e Fe_2O_3 , entre outros.

Segundo Abreu (1973) os feldspatos possuem aproximadamente a seguinte composição: 65 % a 70 % de SiO_2 ; 15 % a 19 % de Al_2O_3 ; 0,05 % a 0,10 % de Fe_2O_3 ; 8 % a 12 % de K_2O ; 3 % a 5 % Na_2O ; e menos de 1 % de CaO . Dentro destes parâmetros, os feldspatos utilizados aqui no Brasil se aproximariam destes limites, com exceção do teor de ferro, que normalmente é mais alto.

Considerando os parâmetros avaliados para a classificação do uso dos feldspatos, normalmente são usados os sódicos e potássicos, sendo que existem também os carbonáticos, porém sua utilização não é muito difundida devido a sua elevada refratariedade. Existindo ainda inserções de outros óxidos, como o lítio. O ponto de fusão dos feldspatos pode variar de acordo com o percentual do teor de sílica e álcalis presente no mesmo, podendo ir da faixa de 1.100 °C a 1.400 °C (ABC, 1994). A Tabela 3 mostra as principais especificações para uso industrial do feldspato.

Tabela 3 - Principais especificações para uso industrial do feldspato.

Indústria	Composição química								Granulometria	Perda ao fogo	Observações
Cerâmica	1ª Qualidade		Na ₂ O + K ₂ O ≥ 13,0% Al ₂ O ₃ > 18% SiO ₂ ≤ 67% Fe ₂ O ₃ ≤ 0,1% TiO ₂ < 0,2% CaO e MgO ≤ 0,3%						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,
	2ª Qualidade		Na ₂ O + K ₂ O ≥ 10,0% Al ₂ O ₃ ≥ 15,0% SiO ₂ << 71,0% Fe ₂ O ₃ ≤ 0,51%						Varia desde 100% passante na malha 10# até 100% na malha 200#	1,0% máx	ladrilhos cerâmicos, cerâmicos elétricos, cerâmica técnica e industrial, canelos, cadinhos, velas e filtros
Vidreira ATBIAV		K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO			Os feldspatos são utilizados em todos os tipos de vidros (embalagem, plano, iluminação, cinescópio doméstico e vidros especiais). Sua função é fornecer alumina, além de incorporar o sódio e potássio.
	A	11,0 a 12,6	2,5 a 3,5	64,5 a 65,5	19,0 a 20,0	0,10	0,04	Tr	100% passante em #16 mesh	1,0% máx	
	B	13,5	—	67,0	17,5	0,10	—	—	2% retido em # 20 mesh	1,0% máx	
	C	12,0	—	70,0	15,0	0,30	—	—	10% a 80% retido em # 140 mesh	1,5% máx	
	D	11,5	—	70,5	14,5	0,35	—	—		—	
Tintas e vernizes	Potássico	SiO ₂ ≤ 65,0%; Al ₂ O ₃ ≥ 20,0%; Na ₂ O < 10,0%; K ₂ O > 9 a 12,0%; Fe ₂ O ₃ ≤ 0,20%							100% passante na # 200 mesh	1,0% máx	Os feldspatos são utilizados na formulação de esmaltes porcelanizados (fitas metálicas) atuando como fundente
	Sódico	SiO ₂ ≤ 65,0%; Al ₂ O ₃ ≥ 20,0%; Na ₂ O < 10,0%; K ₂ O > 3%; Fe ₂ O ₃ ≤ 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 à 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%									
	CaO ≤ 1,2%; Fe ₂ O ₃ < 0,35%; MgO ≤ 1,2%										
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 arco voltáico, como escorificante e para transferência de cromo, molibdênio, níquel e manganês para o material base.
	Potássico	65 –70%	12–13%	15–20%		12–13%					
	Sódico	62–67%	03–06%	17–19%		03–06%		05–10%			

Fonte: SILVA et al., 1996.

2.4.4 Produção de feldspatos no Brasil

No Brasil, existem cerca de 40 pequenas e médias empresas, responsáveis pela produção de feldspato. Dentre as que mais se destacam estão: Armil (RN), Estrela do Sul (SP), Cerâmus (BA), Incopebra (SP), Remina (SP), M.C.I. (SP), Nossa Senhora da Luz (PR), Pegnor (PB), Prominex (MG), Quartzomex (MG) e Santa Suzana (SP). Deve-se destacar também a produção garimpeira que é estimada em cerca de 30 % da oficial (BEZERRA, et al., 1994).

As reservas oficiais de feldspatos podem ser encontradas nos municípios de Currais Novos-RN, Parelhas-RN e Equador-RN. As reservas de garimpo de feldspato não são incluídas na contagem oficial (ANGELIM, et al., 2006).

Ainda segundo Angelim et al. (2006), em seus estudos, verificaram que as reservas medidas entre os anos de 2000, avaliadas em 283.784 t e em 2004, decresceram de 36,2 %. Aspecto esse, o qual evidencia que não só na época dos estudos, mas também nos dias atuais a ausência de investimentos em pesquisa e a reavaliação das reservas. Assim como, o baixo investimento em novas tecnologias na extração e beneficiamento dos feldspatos da Província da Borborema.

2.5 Análise granulométrica

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), a análise granulométrica tem como objetivo a separação de partículas com relação ao tamanho, em duas ou mais frações. Normalmente, utilizam-se peneiras com uma série de aberturas padronizadas que possuem uma relação constante entre si, com ou sem a adição de água. A primeira escala granulométrica foi proposta por Rittinger onde temos na equação (1):

$$a_n = a_0 r^n \quad (1)$$

Em que a_n é a abertura de ordem n , a_0 = abertura de referência ($a_0 = 1 \text{ mm}$), r = razão de escala ($r = \sqrt{2} = 1,414$).

Em seguida, U.S. Tyler Company, alterou a escala de Rittinger, tomando como abertura de referência (a_0) 74 μm . Esta escala tornou-se de uso geral em todo o mundo. A (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), uma segunda escala foi criada por Richards, onde passou a usar a razão de escala $r = \sqrt[4]{2} \approx 1,19$. O número de mesh que é o número de aberturas de uma mesma dimensão contido num comprimento de 25,4 mm, está relacionado com as aberturas das peneiras para as duas escalas (Tyler e Richards). A escala ISO (International Standard Opening) adotou como abertura de referência (a_0) 1 mm, que representa 18 malhas, e como razão de escala (r) $\sqrt{2} = 1,414$.

2.5.1 Distribuição de tamanho das partículas

Existem várias formas de descrever matematicamente a distribuição granulométrica de uma amostra. A Tabela 4 mostra algumas das equações mais importantes que foram escritas na tentativa de melhor apresentar a distribuição de tamanho das partículas de uma amostra.

$$F(d') = \int_{d' \min}^{d' \max} f(d') d(d') = 1,0$$

$$f(d') = \frac{dF(d')}{d(d')}$$

$$\int_{d' \min}^{d' \max} f(d') d(d') = 1,0$$

Em que $F(d)$ é a fração acumulada passante (abaixo do tamanho d), d^* é o módulo de tamanho da distribuição. Os demais parâmetros são constantes a serem determinadas gráfica ou numericamente. Nas equações, (d/d^*) representa uma normalização entre os tamanhos de aberturas de peneiras consecutivas, ou seja, $r = (d/d^*) = \text{constante}$. Essas relações fornecem uma representação compacta de dados de distribuição de tamanho permitindo que análises estatísticas e tratamentos matemáticos possam ser realizados. As funções de distribuições, $F(d)$, apresentadas são monotonicamente crescentes (GALLERY, 2011). As identidades matemáticas a seguir são válidas quando se lida com essas funções:

Tabela 4 - Equações empíricas da distribuição granulométrica do processo de quebra.

Denominação	Função de Distribuição
Gilvary	$F(d) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{d}{k_1}\right) - \left(\frac{d}{k_2}\right)^2 - \left(\frac{d}{k_3}\right)^3\right]}$
Rosin-Rammler	$F(d) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{d}{d^*}\right)^n\right]}$
Gaudin-Meloy	$F(d) = 1 - e^{\left[1 - \left(\frac{d}{d^*}\right)^n\right]}$
Klimpel and Austin	$F(d) = 1 - e^{\left\{\left[1 - \left(\frac{d}{d^*}\right)^{n_1}\right] \left[1 - \left(\frac{d}{d^*}\right)^{n_2}\right] \left[1 - \left(\frac{d}{d^*}\right)^{n_3}\right]\right\}}$
Gates-Gaudin-Schuhmann	$F(d) = \left(\frac{d}{d^*}\right)^n$
Broadbent-Callcott	$F(d) = \frac{1 - e^{\left[-\left(\frac{d}{d^*}\right)^n\right]}}{1 - e^{(-1)}}$
Austin	$F(d) = \varphi \left(\frac{d}{d^*}\right)^\gamma + (1 - \varphi) \left(\frac{d}{d^*}\right)^\beta$

Fonte: GALERY, 2011.

A função de Rosin-Rammler proporciona um ajuste para distribuição de tamanho de carvão quebrado e relativamente para os finos de minério. Se os valores de d^* e n para um material particular ao qual a equação de Rosin-Rammler é aplicável são conhecidos, a distribuição de tamanhos é completamente especificada. As constantes d^* e n são melhor determinadas a partir da curva linear resultante do gráfico de Rosin-Rammler. A constante de dispersão, n , mede a dispersão do material ao longo da variação de tamanho, desde pequenos valores de n , a curva de tamanho está próxima ao eixo de tamanho e o material é espalhado por uma ampla faixa de tamanho; enquanto que se n for grande, a curva é mais íngreme e o material é espalhado sobre uma gama mais estreita de tamanhos. Os produtos naturalmente britados raramente têm valores de $n < 0,6$. Quando n é cerca de 3,0, a função Rosin-Rammler deteriora-se, sendo, melhor, substituída pela função gaussiana (probabilidade normal) (TAGGART, 1945).

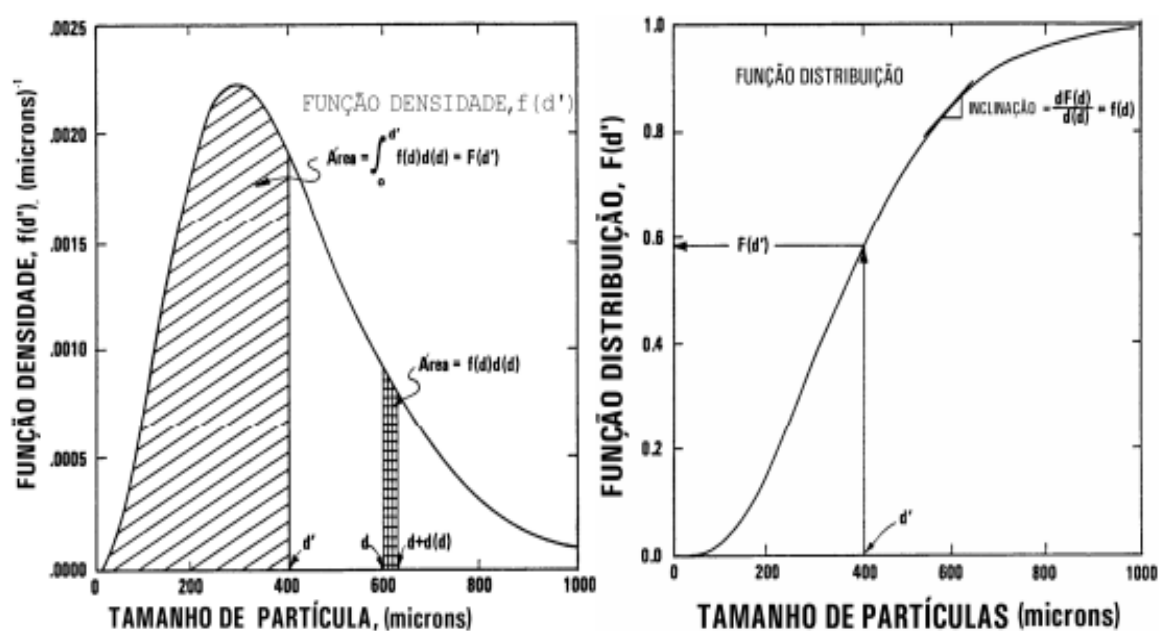
A função Gaudin-Meloy é geralmente aplicável a uma parte dos dados apenas. Sendo os tamanhos mais finos, portanto n mede a dispersão do material nos tamanhos finos. Comparando as funções de Rosin-Rammler e Gaudin, para tamanhos abaixo da constante de tamanho absoluto, as duas funções são idênticas (TAGGART, 1945).

O gráfico de um teste de dimensionamento retrata uma relação entre os tamanhos de partícula e os seus pesos numa mistura compreendendo grãos de vários tamanhos. Convencionalmente as funções de peso são traçadas como ordenadas e funções de tamanho

como abscissas. Diferentes tipos de gráficos são caracterizados pelo ponto de referência a partir do qual o peso é calculado, e pelas funções de peso e tamanho que são plotadas. Um gráfico do material retido acumulado é traçado contra uma abscissa de um dado tamanho do peso total (percentagem) da amostra que fica retida numa tela dessa abertura; um gráfico do acumulado passante é traçado contra uma abscissa particular, a percentagem do peso total da amostra que passa por um crivo de teste dessa abertura. As funções usuais de peso que são representadas graficamente são percentagens aritméticas e logarítmicas. As funções usuais de abertura são aritméticas, percentual de limitação, recíproco e, ocasionalmente, probabilidade (TAGGART, 1945).

Na Figura 10 são apresentados sob a forma de gráfico os valores da função densidade $f(d')$ e da função de distribuição $F(d')$ em relação à d' (GALERY, 2011).

Figura 10 - Funções densidade $f(d')$ e distribuição $F(d')$.



Fonte: GALERY, 2011.

O valor da função de distribuição $F(d')$ é preciso e representa a fração das partículas que se encontram abaixo de um determinado tamanho d' . O valor da função densidade $f(d')$ sozinho não tem nenhum significado preciso, a não ser o de representar o valor da função no ponto d' . Entretanto, a expressão $f(d') d(d')$ representa a fração de partículas que se encontra distribuída entre os intervalos de tamanho d e $(d + d)$ (GALERY, 2011).

2.5.2 Cálculo do diâmetro médio das partículas (d50)

O diâmetro médio de uma partícula é o diâmetro em que passam 50% do material moído. Nesta pesquisa, ele foi obtido através da leitura da curva de distribuição granulométrica realizada para cada tempo de moagem e temperatura associada.

2.6 Princípios de fragmentação

Na literatura referente à fragmentação, esta operação, compreende um conjunto de técnicas que tem por objetivo reduzir o tamanho dos minérios a serem tratados, por ação mecânica externa e, algumas vezes, interna de determinado tamanho, em partículas de tamanho menor (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Segundo Chaves e Peres (2003), a liberação das partículas minerais é uma das finalidades da fragmentação. Esta liberação ocorre com o intuito de separar os minerais de interesse econômico dos minerais de ganga. A escala granulométrica mais utilizada para separar os minerais está disposta no anexo.

A fragmentação dos minerais tem início na etapa de lavra, onde o desmonte da rocha ocorre normalmente com o uso de explosivos, tornando-as blocos menores, capazes de serem processados em equipamentos de britagem (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Após o desmonte, temos as etapas de cominuição, conforme, a saber:

Na britagem, a redução dos blocos de rochas ocorre em vários estágios e através de diversos tipos de equipamentos. Neste caso, a fragmentação é aplicada às frações de rochas mais grosseiras e intermediárias, variando de 1000 mm até 10 mm (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

A moagem, também tem a função de reduzir o tamanho das partículas, porém tem sua aplicabilidade em rochas de frações mais finas, visando obter um produto que possa ser concentrado ou adequado para outros processos industriais (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Ainda segundo Luz, Sampaio e França (2010), a fragmentação pode ter um papel muito importante dentro de uma unidade de mineração, tendo em vista que é uma das etapas onde ocorre o maior gasto de energia, e que de certa forma, os custos operacionais de uma usina de

beneficiamento se devem justamente a esta etapa. E, pensando em termos de custo e benefício, alguns estudos têm sido desenvolvidos na etapa de fragmentação, como modelos matemáticos, os quais visam a otimização e controle dos processos operacionais e, até mesmo, para o dimensionamento de uma unidade industrial.

2.6.1 Mecanismos da fragmentação

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), boa parte dos minerais possuem material cristalino, onde se encontram átomos de diversos tamanhos e ligados tanto fisicamente como quimicamente, o que os mantém juntos à rede cristalina dos minerais. Existem forças externas, produzidas por cargas de tensão ou de compressão, que podem tensionar e quebrar as ligações interatômicas.

A cominuição sofre ações de forças externas, capazes de realizar a quebra das redes cristalinas, podendo ser estas de compressão, impacto ou atrito (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

2.6.2 Compressão

Neste mecanismo, a força é aplicada de maneira lenta e com o aparecimento da fratura, o esforço é aliviado. Logo, esta força é um pouco maior que à resistência da partícula. Os blocos gerados a partir deste tipo de fratura são de grande diâmetro e encontrados em britadores de mandíbulas, giratórios, cônicos e também moinhos, através da compressão das partículas entre dois ou mais corpos moedores, ou em partículas maiores (BERALDO, 1987).

2.6.3 Impacto

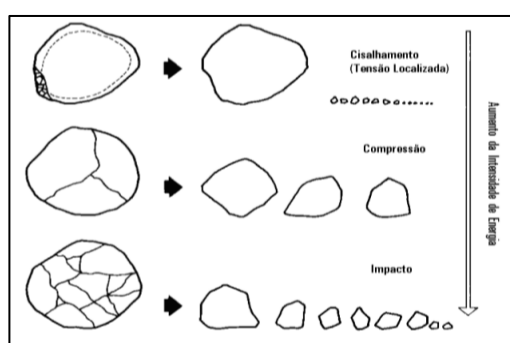
Neste mecanismo, a força é aplicada de maneira rápida e com intensidade bastante superior à resistência da partícula. Os fragmentos resultantes desta fratura possuem granulometria fina e podem ser gerados através de britadores de impacto ou de moinhos, em zonas de queda das bolas ou barras (BERALDO, 1987).

2.6.4 Atrito ou Cisalhamento

A força é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula, ocorrendo apenas o surgimento de pequenas fraturas. Este tipo de fratura pode ser provocado pelo atrito entre as partículas ou de bolas com as partículas (BERALDO, 1987).

Os diferentes tipos de fraturas podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 - Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição dos fragmentos resultantes.



Fonte: KELLY, et al., 1982.

2.7 Leis da fragmentação

De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), os estudos relacionados à uma correlação entre o alto consumo de energia na moagem e a quantidade de energia necessária à fragmentação das partículas minerais até determinado tamanho é bem antigo.

Os principais trabalhos desenvolvidos nessa área serão anunciados a seguir:

2.7.1 Lei de Rittinger

Conhecida como a Primeira Lei da Cominuição, estabelece que a área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Segundo Beraldo (1987), a quantidade de energia E_R seria inversamente proporcional ao tamanho da partícula do material de alimentação F e do tamanho do produto P , dada pela equação (2).

$$E_R = C \times \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (2)$$

Em que E_R = energia específica calculada por Rittinger, C = constante de proporcionalidade, P = tamanho do produto e F = tamanho da alimentação.

Observa-se que a superfície específica dos materiais granulares é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas (CHAGAS, 2008).

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), a Lei de Rittinger se aplica à fragmentação de partículas muito finas, como, por exemplo, à moagem de clínquer de cimento.

2.7.2 Lei de Kick

Sendo a Lei de Kick, a Segunda Lei da Cominuição, a energia necessária à fragmentação das partículas é proporcional à redução de tamanho das partículas envolvidas, onde podemos ver na equação (3) (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

$$E_K = C \times \left(\log \frac{F}{P} \right) \quad (3)$$

Em que E_K = energia calculada por Kick, C = constante de proporcionalidade, P = tamanho do produto e F = tamanho da alimentação.

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), a Lei de Kick se aplica normalmente a frações mais grosseiras, como, por exemplo, maticões.

Devido as Leis de Rittinger e Kick não satisfazerem todas as necessidades encontradas na prática e visando obter uma melhor resposta aos princípios da fragmentação foi proposto por Fred C. Bond, com base totalmente empírica, um novo postulado, posteriormente chamado de Terceira Lei da Cominuição (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

2.7.3 Lei de Bond

Propõe que, a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do seu tamanho, tal que esse tamanho é definido como a abertura da peneira, pela qual passam 80 % do material. A equação (4) é utilizada para expressar a proposta de Bond (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

$$E_B = C \times \left(\left(\frac{1}{\sqrt{P}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{F}} \right) \right) \quad (4)$$

Em que E_B = energia calculada por Bond, C = constante de proporcionalidade, P = tamanho do produto e F = tamanho da alimentação.

Bond propôs o uso de um índice conhecido como WI (Work Index) ou índice de trabalho, equação (5), que é definido como o trabalho necessário para reduzir a unidade de peso (tonelada curta = 907 kg) do material considerado, desde um tamanho inicial teoricamente infinito ($F = \infty$), até uma granulometria 80 % passante em 100 μm (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

$$\begin{aligned} WI &= E_0 \left[\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right] \\ WI &= \frac{E_0}{\sqrt{P}} \\ E_0 &= 10WI \end{aligned} \quad (5)$$

Substituindo na expressão da lei o valor de E_0 , temos:

$$E = 10WI \left[\left(\frac{1}{\sqrt{P}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{F}} \right) \right] \quad (6)$$

Esta equação (6), Bond propôs utilizar para calcular o consumo de energia em circuitos de moagem, é também muito utilizada em laboratórios para a determinação experimental do

WI. Outros estudiosos continuaram ainda desenvolver fórmulas mais abrangentes no que se diz respeito às leis da fragmentação (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Mesmo considerando o método de Bond uma ferramenta simples, funcional e precisa, se utilizada dentro dos parâmetros usuais da cominuição, vantagens estas que com a experiência em sua utilização mostrou que o método também possui algumas limitações (CHIEREGATI, 2001):

- Ineficiência na antecipação do que pode acontecer num circuito fechado quando a vazão de alimentação aumenta, a menos que o desempenho do classificador seja ajustado para estas condições;
- Não recomendado para sistemas que possuam formas de distribuições granulométricas diferentes entre alimentação e produto;
- Ineficiente na previsão correta da fragmentação de rochas com frações mais grossas;
- Não tem precisão para partículas com características incomuns de peneiramento (forma acicular), apesar de este ser um problema observado em qualquer técnica que utiliza o peneiramento na determinação do tamanho das partículas.

Devido a todas essas limitações, tem-se procurado estudar o processo de cominuição levando em consideração a cinética de fragmentação das partículas, de forma a buscar o desenvolvimento de modelos de processos, assim como o estudo da relação entre seus parâmetros e suas variáveis. Tais modelos podem ser utilizados em trabalhos de otimização e de controle de processos, bem como possuem grande utilidade no dimensionamento de instalações (NEVES, 2005).

Um dos modelos utilizados em processos de cominuição é o Modelo de W. J. Whiten (Modelo do Misturador Perfeito ou Perfect Mixing Model (PMM)), considerado um caso particular do PBM, é um dos dois principais modelos empregados em modelagem de circuitos industriais de moagem. O PMM baseia-se no equilíbrio de cada faixa granulométrica que compõe a carga do moinho, que está perfeitamente misturado. A carga do moinho está relacionada com o produto através de uma taxa de descarga para faixa granulométrica. Deste modo, as equações básicas do PMM são definidas pelas equações 7 e 8 apresentadas a seguir:

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^{i-1} r_j s_{j i} - r_i s_i (1 - a_{i i}) = 0 \quad (7)$$

$$p_i = d_i \quad (8)$$

Onde:

f_i = vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (t/h);

p_i = vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (t/h);

r_j = função taxa de quebra correspondente à i-ésima fração granulométrica (h^{-1});

s_j = massa da carga no interior do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (t);

a_{ij} = função distribuição de quebra, correspondente à fração da j-ésima faixa granulométrica que aparece na i-ésima faixa granulométrica devido à fragmentação;

d_i = taxa de descarga do moinho, correspondente à i-ésima fração granulométrica (h^{-1}).

Segundo Napier-Munn et al. (1996), uma limitação de ordem prática importante, sob o ponto de vista da modelagem matemática, é a impossibilidade de se quantificar diretamente a distribuição granulométrica do minério contido na câmara interna dos moinhos. Para tanto, as duas equações básicas do PMM foram associadas de forma a possibilitar a sua aplicação na modelagem de moinhos. Deste modo, chega-se à equação 9 que caracteriza o PMM.

$$f_i - p_i \left(1 - \frac{r_i}{d_i} (1 - a_{i i})\right) + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \left(\frac{r_j}{d_i}\right) p_j = 0 \quad (9)$$

Sendo assim, o quociente r/d torna-se o principal parâmetro do modelo, e pode ser determinado através da distribuição granulométrica da alimentação e do produto do moinho, além de uma função quebra que representa com fidelidade o minério processado (Napier-Munn et al. 1996). A divisão do quociente r/d pelo tempo de residência médio das partículas no interior do moinho leva à normalização do mesmo, independente das dimensões e condições operacionais do moinho estudado. O parâmetro r/d^* normalizado é representado por uma curva

quadrática definida por 3 ou no máximo 4 pontos. Para que se possa cobrir toda a faixa granulométrica estudada utiliza-se o método spline function.

2.8 Moagem

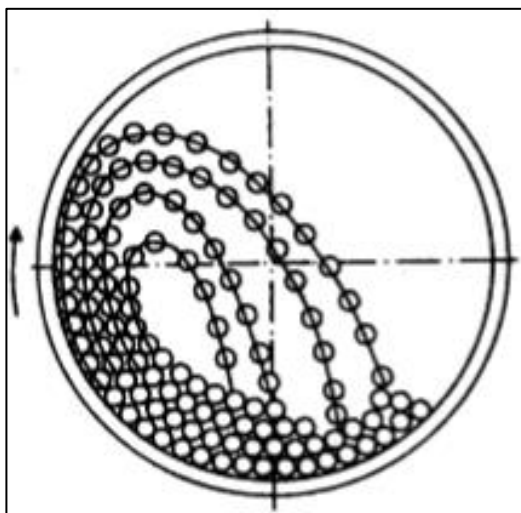
A moagem é a última etapa da fragmentação, na qual o tamanho do material a ser cominuído deve ser inferior à 3/4 pol, no geral as partículas são mais finas. Vários são os mecanismos para a redução do tamanho das partículas nesta etapa como, por exemplo, cisalhamento, compressão e impacto (CHAVES e PERES, 2003).

Segundo Luz, Sampaio e França (2010), neste estágio da fragmentação onde pode ocorrer uma série de fatores muito importantes que prejudiquem as etapas seguintes como, por exemplo, a concentração dos minérios, no caso de ocorrer uma submoagem, em que somente uma parte do mineral de interesse foi liberada, assim como uma sobremoagem, onde há uma redução exagerada das partículas e isso acaba também aumentando o consumo de energia e implicando em perdas no processo.

2.8.1 Regime de operação dos moinhos

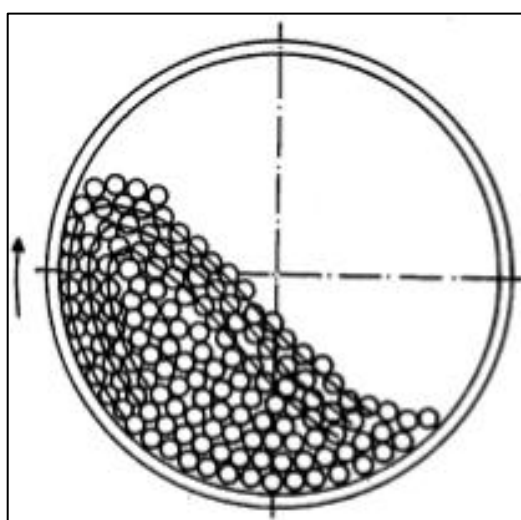
Segundo Luz, Sampaio e França (2010), existem dois regimes de operação para moinhos, sendo eles cascata e catarata (Figuras 12 e 13), que são determinados por fatores como, por exemplo, volume ocupado pelas bolas em relação ao volume do moinho.

Figura 12 - Regime catarata.



Fonte: LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010.

Figura 13 - Regime cascata.



Fonte: LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010.

a) Catarata: indicado para material mais grosseiro, onde não se deseja produção de finos. Neste regime, as bolas são elevadas a uma determinada altura e depois caem sobre as outras e sobre o material, ocorrendo assim a fragmentação das partículas por impacto. Devem-se utilizar bolas com diâmetro grande e em pouca quantidade (pequeno fator de enchimento) (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

b) Cascata: neste regime, a quantidade de bolas deve ser grande (um fator de enchimento maior), as bolas são elevadas até determinada altura e caem sobre as outras,

ocorrendo assim a fragmentação das partículas por abrasão e atrito, a velocidade de rotação do moinho neste caso é baixa. Indicado quando se deseja obter um material resultante com granulometria fina (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

2.8.2 Tipos de moinhos

Existe uma infinidade de equipamentos utilizados na moagem de minérios com especificações, características e tipos de corpos moedores variados, tais como: moinhos de barras, moinho de bolas, moinhos compeb, moinhos ballpeb, moinhos rodpeb, pebble mills e moinhos autógenos (moinhos rotativos), moinhos verticais, moinhos planetários, etc. Neste trabalho, será dado ênfase apenas ao moinho cilíndrico de bolas, sendo o mesmo utilizado nos ensaios laboratoriais desta pesquisa (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

➤ **Moinho Autógeno e Semi-autógeno**

A moagem autógena trata-se da fragmentação empregando blocos de grandes dimensões do próprio material como corpo moedor e eliminado, tanto quanto possível, a maior parte dos corpos moedores de aço ou ferro fundido (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

Existem algumas variações do processo de moagem autógena, sendo estas classificadas em moagem autógena completa (Full autogenous grinding – FAG), semi-autógena (Semi autogenous grinding – SAG) e autógena parcial. Os mecanismos de fragmentação dominantes são a abrasão e o atrito, porém as frações grossas devem se quebrar por impacto numa taxa adequada ao bom desempenho da fragmentação (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010)

Os materiais mais grosseiros tendem a serem mais propensos à moagem autógena (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015). A fragmentação das partículas no moinho autógeno tende a seguir as fronteiras dos grãos e o meio moedor mais leve produz menos partículas ultrafinas, resultando uma rápida fragmentação até ao tamanho do grão natural, sendo que pouca fragmentação se dá além deste tamanho, sendo uma vantagem quando se objetiva a utilização de um método de concentração posterior (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Uma melhor fragmentação e menos problemas com o tamanho crítico, ocorrem em minérios mais friáveis (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010). O tamanho crítico pode ser definido como “material muito grosso para ser moído e muito fino para moer” e é causado pela escassez de blocos grandes conjugados à presença de tamanhos intermediários duros (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

Alguns tipos de minérios não reagem bem à moagem autógena devido à facilidade de quebra das frações grossas, levando a carga do moinho a não ter mais meio moedor em pouco tempo. Nestes casos, o minério não tem competência para a moagem autógena (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010). Em determinadas situações, se faz necessário adicionar bolas para suprir a falta da quantidade suficiente de blocos maiores, nesse caso, o moinho é então chamado de semi-autógeno. Ainda nestas circunstâncias, usa-se também uma britagem (intercalada no circuito do moinho) para a quebra de corpos críticos, determinados pebbles (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

O custo de investimento e operação na moagem autógena é menor do que na convencional, devido à diminuição dos gastos com britagem ou eliminação desta, e a redução ou eliminação do gasto com bolas (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

➤ **Moagem Autógena Completa – FAG**

Na fragmentação autógena completa, ou FAG, o minério, que vem da mina sem nenhuma, ou com pouca britagem, é alimentado todo no moinho autógeno. O material é retirado na granulometria desejada pelo classificador que trabalha acoplado ao moinho. A pouca britagem referida acima diz respeito a técnicas de desmonte usadas na lavra que são capazes de fornecer minério abaixo de 10 polegada, próprio para ser alimentado no moinho autógeno, evitando o uso da britagem primária. Pode-se conseguir este balanço fazendo a alimentação do moinho autógeno com frações de tamanho diversas, alimentadas em proporções adequadas (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

➤ **Moagem Semi-Autógena – SAG**

Na fragmentação semi-autógena são empregados métodos auxiliares, tais como o uso de algumas bolas de aço, para facilitar a fragmentação de uma fração mais resistente à moagem e

com tendência a manter-se muito tempo no moinho, ou retornar várias vezes do classificador como carga circulante. Esta fração, denominada como fração de tamanho crítico, reduz a capacidade do moinho e aumenta o consumo de energia por tonelada (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

O uso de algumas bolas com os seixos moedores contorna bem o problema da fração de tamanho crítico, mas traz algumas desvantagens, tais como: aumento de desgaste no revestimento do moinho, consumo de bolas, diminuição da flexibilidade do circuito de moagem e contaminação pelo meio moedor. Como uma alternativa ao uso de bolas, existe a possibilidade da introdução de um britador de mandíbulas segundo a exigência da carga do moinho. A fração de tamanho crítico é classificada e removida continuamente do moinho como carga circulante. Com este dispositivo, certos minérios resistentes, que dificilmente se adaptam à moagem autógena, podem, com grandes vantagens econômicas, ser fragmentadas (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

➤ **Moagem Autógena Parcial**

Na fragmentação autógena parcial, só o moinho de bolas é substituído por um moinho autógeno. Este tipo de moagem é denominado muitas vezes como pebble milling, utilizando como corpos moedores como seixos ou pebbles. Neste moinho, o minério é primeiramente britado a um tamanho próprio para alimentar um moinho de barras. Durante a britagem, ou, antes dela, uma classificação separa parte do minério com tamanho adequado para servir de meio moedor (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

O minério moído no moinho de barras é alimentado, com os pedaços maiores do minério previamente separados, no moinho autógeno onde se dá a moagem final. Os pedaços maiores ou seixos, separados para uso na moagem autógena parcial, devem estar entre 25 e 75 mm e são escolhidos de forma a terem o mesmo peso que as bolas que eles devem substituir. Como a densidade do minério é mais baixa que a das bolas, estes moinhos necessitam de maiores volumes e/ou maiores velocidades do que os de bolas correspondentes (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010). São revestidos com placas de pedra de sílex ou de cerâmica. Giram usualmente a 75% da velocidade crítica ou mais e são carregados de 35 a 40% do volume. São

empregados quando não pode haver contaminação metálica do produto (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

2.8.3 Moinho de bolas

De acordo com o Manual de Britagem Metso (2015), essa designação se dá ao fato destes moinhos utilizarem corpos moedores esféricos de materiais diversos ou em alguns casos cilindros (cylpebs). O tamanho de suas bolas pode variar de acordo com o Work Index do material a ser cominuído e da granulometria da alimentação. Um mesmo moinho pode operar com carga de bolas de tamanhos variados, isso se faz essencial ao primeiro carregamento de corpos moedores, porém de forma meio grosseira, pode adotar como regra o maior tamanho das bolas sendo 4 a 5 vezes o tamanho da alimentação.

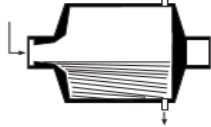
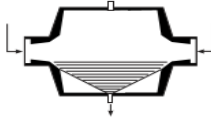
Ainda de acordo com o Manual de Britagem Metso (2015), em um mesmo intervalo de tempo as bolas sofrem um mesmo desgaste, independente do diâmetro inicial. Esse desgaste fica em torno de 1/8 pol.

De modo geral, os moinhos de bolas têm comprimento útil da câmara de moagem inferior a duas vezes o tamanho do seu diâmetro, podendo operar via úmida ou via seca e normalmente em circuitos fechados de moagem.

Para melhores resultados, a granulometria da alimentação deve ser passante nas malhas de 14 a 20 malhas, e não ultrapassar 80 % passante em 3/8 pol a 1/2 pol. Deste modo, utilizam-se equipamentos anteriores a moagem para uma fragmentação prévia desta alimentação, podendo ser: moinhos de barras ou britadores terciários e quaternários (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

Sua descarga pode ser dos tipos overflow, diafragma e compartimento. A Tabela 5 mostra os diferentes tipos de descargas dos moinhos de bolas.

Tabela 5 - Tipos de descarga de moinhos de bolas.

Arranjos de descarga			
	Overflow	Periférica de topo	Periférica central
Processo de moagem	Somente via úmida	Via úmida ou via seca	Via úmida ou via seca
Circuito	Usualmente fechado	Fechado	Fechado ou aberto
Produto típico	Fino - 200 malhas	Intermediário (via úmida) 65 - 100 malhas Fino (via seco) 325 malhas	Fino 150 - 325 malhas
Tamanho máximo de alimentação	10 - 14 malhas	$< \frac{1}{2}"$	$< \frac{1}{2}"$
Relação L / D	1 - 1,5:1	1 - 1,5:1	Circ. Aber. 3,5 - 5:1 Circ. Fech. 2,5 - 3,5:1
Velocidade típica – (%) de veloc. Crítica	65 - 70 %	68 - 78 %	Via úmida 65 - 75 % Via seca 70 - 78 %
Volume de carga	35 - 40 % (preferível 35 %)	35 - 40 %	30 - 40 %

Fonte: (MANUAL DE BRITAGEM METSO, 2015).

Outra utilização para os moinhos de bolas, além da fabricação de materiais em grandes volumes, é o uso em laboratório. Neste caso, normalmente é utilizado um material chamado alumina (óxido de alumínio), tanto para o cilindro quanto para as esferas, em função de sua grande densidade e com o objetivo de evitar a contaminação dos materiais que estão sendo processados (LIMA, 2006).

As esferas dos moinhos laboratoriais são de porcelana, pois exigem grandes esforços mecânicos e resistência ao calor, assim como também para evitar contaminação do material.

São resistentes à corrosão, à abrasão e tem baixa condutividade térmica, o que lhe confere um custo x benefício e favorece a sua utilização em moinhos de bolas. Podem ser fabricadas com materiais cerâmicos, como zircônio, carbetto de silício, alumina e nitreto de silício (LIMA, 2006).

2.9 Tratamento térmico

É a etapa onde os materiais são submetidos ao efeito do aumento de temperatura, podendo ser realizado através de várias metodologias. Para efeito deste estudo, utilizou-se os métodos de análise térmica diferencial (ATD), análise termogravimétrica (TG) e forno mufla.

De acordo com Ionashiro (2004), a análise ATD é uma técnica de medição contínua das temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte, à medida que ambos são aquecidos ou resfriados. A temperatura registrada é a diferença entre a temperatura da referência (T_r), e a da amostra (T_a), ou seja ($T_r - T_a = \Delta T$) em função da temperatura ou do tempo de aquecimento e/ou resfriamento. A análise TG é realizada por uma termobalança que permite a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura. Através dessas técnicas, podem-se acompanhar os efeitos do aquecimento associados com alterações físicas ou químicas da amostra, tais como transformações polimórficas, reações de desidratação, de dissociação, decomposição, óxido-redução, etc. Em geral, transições de fase, desidratações, reduções e certas reações de decomposição produzem reações endotérmicas, enquanto que cristalizações, oxidações, algumas reações de decomposição produzem reações exotérmicas (PADILHA e AMBROZIO FILHO, 1985).

Num processo de calcinação em torno de 600 °C ocorre totalmente à perda da água estrutural, tornando frágil a estrutura cristalina de alguns minerais, como a biotita, que propicia a solubilidade de cátions Na^+ e K^+ ao perder a sua cristalinidade. Nos feldspatos, a atividade catiônica ocorre em elevadas temperaturas devido à distorção da rede cristalina deste mineral, gerando defeitos que diminuem a intensidade das ligações químicas entre os cátions e os íons da estrutura do cristal, facilitando a solubilidade dos cátions, principalmente Na^+ e K^+ (HANLIE, 2006).

A princípio, o tratamento térmico pode indicar uma baixa viabilidade econômica devido ao elevado custo do processamento industrial, porém o grande aumento no consumo de feldspatos, principalmente no que se diz respeito ao incentivo à produção de biocombustíveis,

nos custos de produção de fertilizantes que é a base de sais de potássio, nas indústrias cerâmicas e outras, esses estudos podem tornar os processos térmicos cada vez mais plausíveis (NASCIMENTO E LOUREIRO, 2004).

Os feldspatos são minerais fundentes, porém exibem um comportamento diferenciado durante a queima de uma massa cerâmica a uma temperatura inferior a 1.100 °C. Eles apresentam-se inertes, ou seja, não sofrem nenhuma alteração (FACINCANI, 1993).

Com relação à condutividade térmica das rochas sedimentares, vulcânicas, plutônicas e metamórficas, verificam-se que as rochas sedimentares possuem fatores determinantes com relação à porosidade e a origem da partícula sedimentar, já as rochas vulcânicas o fator determinante é a porosidade, em rochas plutônicas o ponto principal é a fase mineral determinante e por fim as rochas metamórficas são influenciadas pela anisotropia e pela fase mineral predominante. Com relação a variável temperatura ocorre uma queda da condutividade térmica com o aumento de temperatura (0 a 1.000 °C), porém as variações são muito pequenas no intervalo de 0 a 100 °C mostrando que neste intervalo a condutividade térmica é praticamente a mesma sofrendo insignificante variação (FIGUEIREDO, 2006).

Ainda segundo o mesmo autor, a porosidade tem excelente correlação com a condutividade térmica, onde baixos valores de porosidade estão sempre correlacionados a altos valores de condutividade térmica e altas porosidades associados a baixas condutividades. Quanto a presença de quartzo, associa-se sempre um aumento da condutividade térmica, em contrapartida o aumento de plagioclásio (feldspato) está associado a uma diminuição da condutividade.

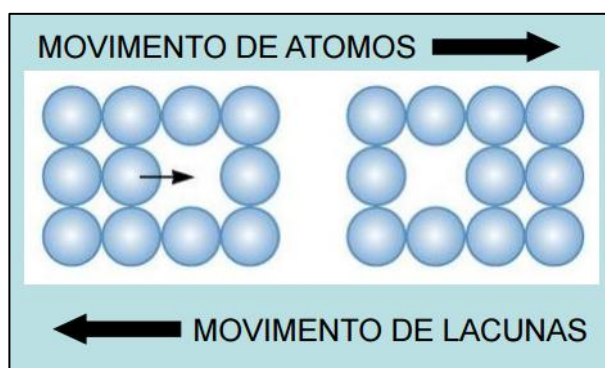
2.9.1 Difusão

O processo de difusão pode ser entendido como um fenômeno de transporte de material por meio do movimento dos átomos, cátions, ânions e macromoléculas. A difusão está relacionada com o gradiente de concentração e a temperatura, podendo ocorrer no interior de sólidos, líquidos e gases.

Os processos de difusão através dos movimentos de átomos podem ser entendidos de duas maneiras:

- Difusão por lacuna, em que o deslocamento de um átomo é de uma posição normal da rede cristalina para um sítio vazio do retículo, ou lacuna, adjacente. Uma vez que os átomos em difusão e as lacunas trocam de posições, a difusão dos átomos em uma direção corresponde ao movimento das lacunas na direção oposta. Este tipo de difusão pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Difusão por lacunas.



Fonte: MILAN, 2014.

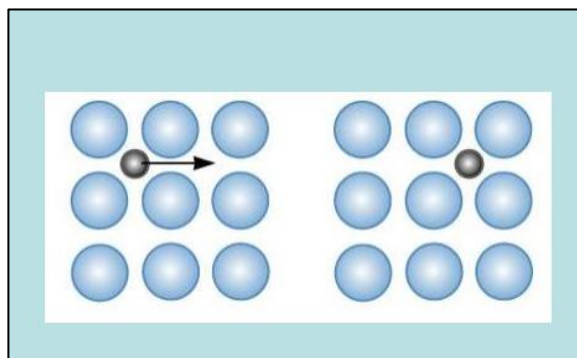
Podemos destacar ainda outros dois mecanismos neste tipo de difusão:

AUTODIFUSÃO: é quando os átomos hospedeiros se difundem. Ocorre em cristais “puros” quando os átomos de um mesmo metal mudam de posição. Não há variação na concentração.

INTERDIFUSÃO: é a difusão de átomos de espécies diferentes. É o processo mais comum, ocorre quando os átomos de um metal se difundem para o interior de um outro. Neste caso há variação na concentração.

A difusão intersticial é um processo onde os átomos migram de uma posição intersticial para outra vizinha que esteja vazia. Este tipo de difusão pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Difusão intersticial.

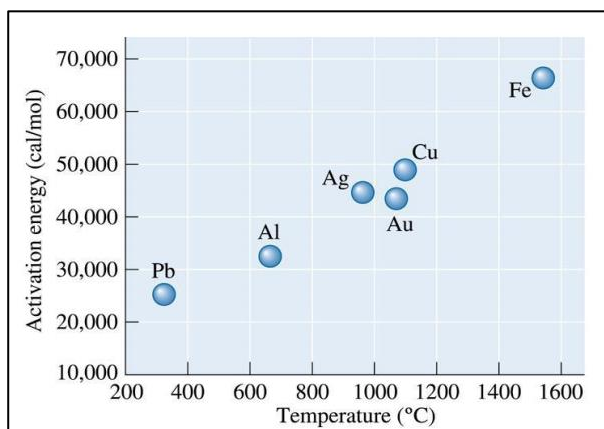


Fonte: MILAN, 2014.

A taxa de movimentação dos átomos e íons está relacionada com a temperatura ou energia térmica que contêm os átomos.

Já a energia de ativação para a difusão é a energia suficiente para que o átomo salte para sua nova posição, ou seja, é a barreira de energia que precisa ser superada pela ativação térmica. A energia de ativação para a difusão aumenta com o aumento da temperatura de fusão. Na Figura 16, podemos verificar a energia de ativação de diferentes elementos.

Figura 16 - Energia de ativação.



Fonte: MILAN, 2014.

2.9.2 Difusão em materiais cerâmicos

Os compostos cerâmicos podem apresentar defeitos atômicos envolvendo os átomos hospedeiros. Os processos de difusão nos materiais cerâmicos são possíveis, tanto por lacunas como interstícios, como acontece nos metais também; no entanto, uma vez que os materiais cerâmicos contêm íons de pelo menos dois tipos diferentes, podem ocorrer defeitos para cada espécie de íon (CALLISTER JR., 1999).

3 METODOLOGIA

INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão descritos os materiais e métodos usados na pesquisa. Os ensaios de difração de raios X, ATD, TG, moagem e peneiramento foram realizados no LTM - Laboratório de Tecnologia Mineral e os ensaios de fluorescência de raios X no NEGLABISE - Núcleo de Estudos Geoquímicos - Laboratório de Isótopos Estáveis, ambos localizados no Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco.

3.1 Coleta e preparação das amostras

A matéria prima utilizada neste trabalho foi proveniente da coleta realizada numa pilha de minérios de feldspatos potássicos, lavrados seletivamente a partir de um pegmatito granítico, por uma empresa de mineração localizada na Região Centro-Sul do Rio Grande do Norte. Esta é uma das regiões onde se encontram as principais ocorrências de pegmatitos do Nordeste Oriental do Brasil, correspondente a Província Pegmatítica da Borborema. A quantidade de material coletado foi de aproximadamente 10 kg, contendo fragmentos medindo entre 3 e 6 centímetros. A adequação granulométrica do material para os ensaios de moagem foi realizada num britador de mandíbulas de um eixo da DENVER (Figura 17).

Figura 17 - Britador de mandíbula de um eixo da DENVER.



Fonte: O autor, 2017.

O material coletado foi britado e analisado granulometricamente utilizando-se as peneiras de 4, 6, 8, 9, 10 e 12 malhas. Em seguida, foram retiradas 16 alíquotas, com aproximadamente 375 g, empregando-se um quarteador Jones, sendo 1 (uma) amostra destinada a caracterização da pilha de minério, 9 (nove) para o tratamento térmico, 3 (três) para uso na temperatura ambiente e 3 (três) para uso eventual. A Figura 18 mostra o material obtido após a britagem.

Figura 18 - Amostra fragmentada pelo britador de mandíbulas de um eixo.

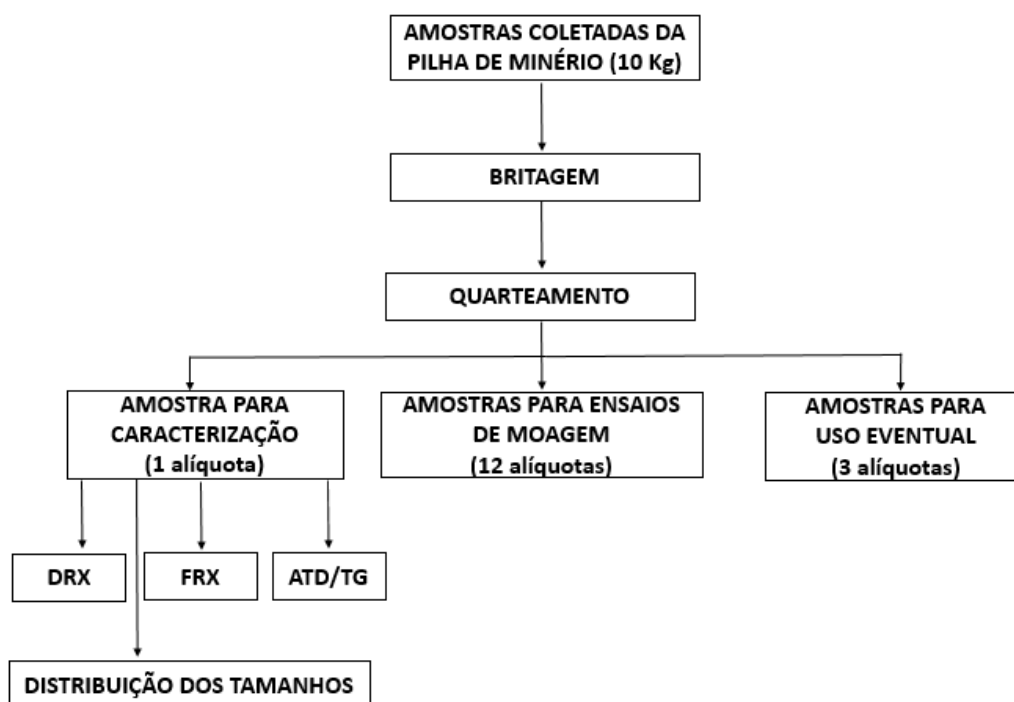


Fonte: O autor, 2017.

A pilha de minério foi caracterizada por fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), análise térmica diferencial (ATD), análise termogravimétrica (ATG) e realizada a análise granulométrica das partículas através de peneiramento em peneiras TYLER.

A Figura 19 apresenta, esquematicamente, os principais procedimentos adotados no desenvolvimento deste trabalho, onde estão contempladas as etapas de coleta, adequação e caracterização do material estudado.

Figura 19 - O fluxograma de preparação das amostras.



Fonte: O autor, 2017.

3.2 Tratamentos térmicos das alíquotas

O tratamento térmico foi realizado em mufla da marca Elektron Therm. As temperaturas usadas no tratamento térmico foram 200, 400 e 800 °C.

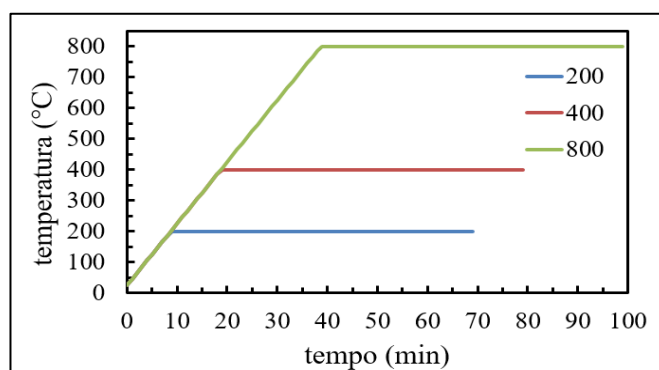
Essas temperaturas foram definidas neste trabalho com o intuito de não haver a destruição da estrutura cristalina do material, mas se buscando verificar a possibilidade de elevação do teor de álcalis através de um tratamento térmico associado à moagem em moinho de bolas, com corpos moedores esféricos e cilíndricos. Três alíquotas foram aquecidas para cada temperatura escolhida, empregando-se uma taxa de aquecimento de 20 °C/min, mantendo-se no patamar por uma hora. O resfriamento ocorreu no interior do forno por 24 horas. As Figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, o forno utilizado para o tratamento térmico e o ciclo térmico empregado para cada amostra.

Figura 20 - Forno usado para o aquecimento das alíquotas.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 21 - Ciclo térmico de aquecimento das amostras.



Fonte: O autor, 2017.

3.3 Ensaios de moagens

Os ensaios de moagem foram todos realizados sob as mesmas condições operacionais, tanto para as amostras na temperatura ambiente quanto para as que sofreram tratamento térmico.

As alíquotas foram moídas num moinho cilíndrico cerâmico, com dimensões internas de 13,5 x 14 cm. A carga de corpos moedores foi de 1.610 g, sendo empregadas 50 % de bolas e 50 % de peças cilíndricas, com diâmetros variando entre 16 e 5 mm. A velocidade de rotação do moinho foi de 90 rpm, o que corresponde a, aproximadamente, 75 % da velocidade crítica (122 rpm) (Figura 22).

Figura 22 - Moinho usado na redução granulométrica das alíquotas.

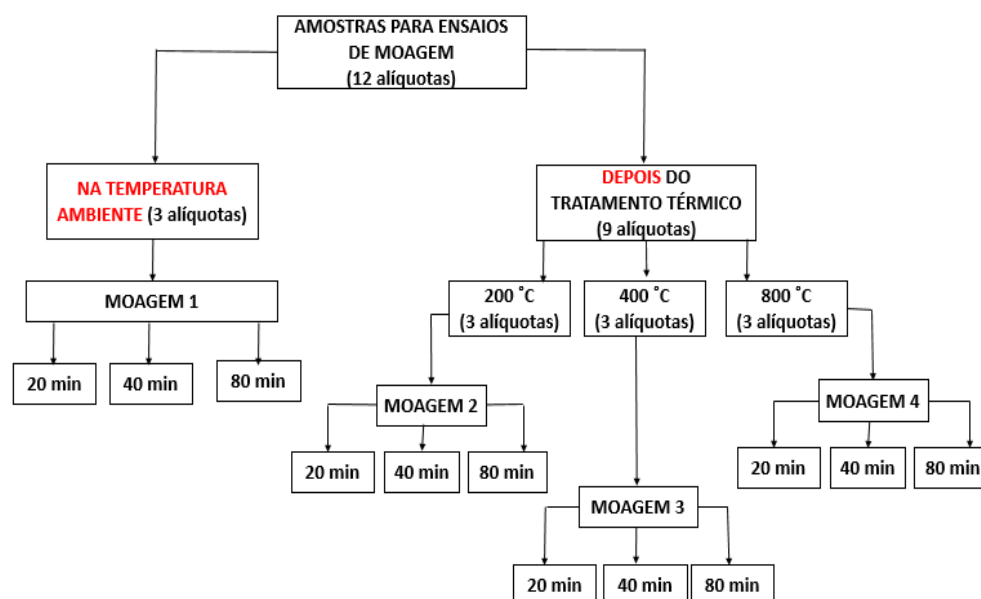


Fonte: O autor, 2017.

A Figura 23 mostra o fluxograma dos ensaios de moagem das alíquotas na temperatura ambiente e depois do tratamento térmico. As moagens foram realizadas para os tempos de 20, 40 e 80 min, sendo divididos em quatro etapas:

- Moagem 1: amostras na temperatura ambiente
- Moagem 2: amostras aquecidas a 200 ° C
- Moagem 3: amostras aquecidas a 400 ° C
- Moagem 4: amostras aquecidas a 800 ° C

Figura 23 - Fluxograma dos ensaios de moagem das alíquotas na temperatura ambiente e depois do tratamento térmico.



Fonte: O autor, 2017.

3.4 Análises granulométricas dos produtos das moagens

Os produtos resultantes do processo de moagem foram submetidos à análise granulométrica em peneiras da série Tyler com aberturas 20, 28, 35, 65, 200 malhas. A Figura 24 mostra o conjunto de peneiras usadas para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas.

Figura 24 - Conjunto de peneiras usadas para determinar a distribuição dos tamanhos das partículas após os ensaios de moagem.



Fonte: O autor, 2017.

As frações de todas as análises granulométricas foram pesadas numa balança de precisão. Após a determinação da curva de distribuição granulométrica, as alíquotas moídas foram fracionadas com objetivo de obter uma fração maior que 65 malhas e outra menor. A fração abaixo de 65 malhas foi usada nas análises de fluorescência de raios X para quantificar o teor de álcalis presente nas amostras. As frações acima de 65 malhas foram descartadas, tendo em vista que foi admitido que os minerais de feldspatos passassem para as frações mais finas.

3.5 Análises mineralógicas

A determinação das fases minerais presentes na amostra da pilha de minério foi realizada através da difração de raios X (DRX). O difratograma foi também usado para determinar a quantificação das fases minerais da alíquota, por meio do método de Rietveld.

A DRX foi realizada no equipamento Bruker D2 Phaser do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM), do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, com uma varredura 2θ entre 4° e 80° , passo de $1^\circ/\text{min}$, com radiação $\text{Cu-K}\alpha$, tensão de 30 kV e corrente de 10 mA. A identificação das fases cristalinas foi realizada usando o aplicativo Difrac.Eva com banco de dados Crystallography Open Database (COD), versão 2013. A Figura 25 mostra o equipamento Bruker D2 Phaser utilizado para a realização da análise de DRX.

Figura 25 - Difratômetro de raios X da Bruker modelo D2 Phaser.



Fonte: O autor, 2017.

3.6 Análise química

A fluorescência de raios X (FRX) foi utilizada para a determinação da composição química das diferentes amostras. O equipamento utilizado para o estudo da porcentagem de cada um desses elementos nas amostras foi um espectrômetro da Rigaku, modelo ZSX Primus II (Figura 26), do Núcleo de Estudos Geoquímicos - Laboratório de Isótopos Estáveis

(NEGLABISE). A metodologia seguida para a análise foi a seguinte: uma porção de cada amostra foi colocada em estufa para secar a 110 °C e então levada a uma mufla, a 1.000 °C, por 2 horas, para determinação da perda ao fogo. Foram feitas pérolas fundidas usando tetraborato de lítio como fundente. As pérolas foram analisadas no espectrômetro, equipado com tubo de Rh e sete cristais analisadores, pelo método de curvas de calibração, que foram construídas com materiais de referências internacionais.

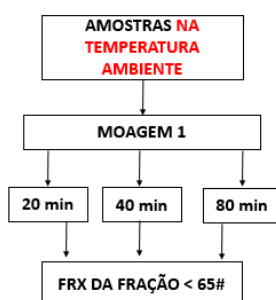
Figura 26 - Equipamento usado para realização da fluorescência de raios X.



Fonte: O autor, 2017.

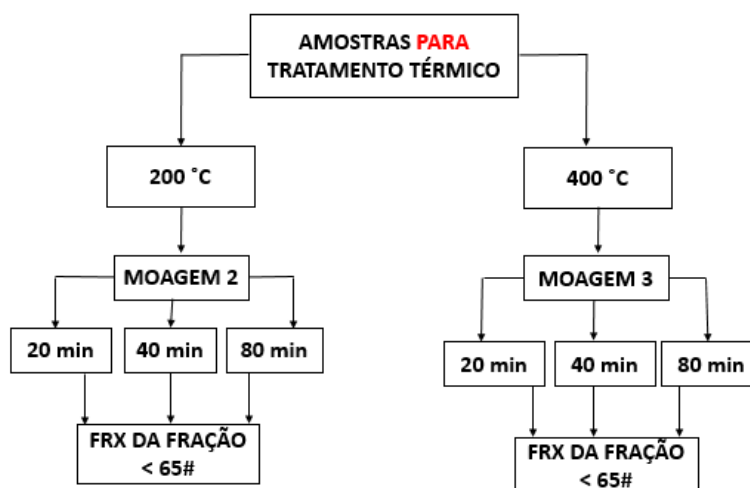
No total, foram analisadas 10 amostras, sendo: uma da alimentação; três nos materiais cominuídos em variados tempos de moagem a temperatura ambiente e; seis termicamente tratadas e cominuídas em diferentes temperaturas e tempos de moagem, respectivamente. As Figuras 27 e 28 mostram, respectivamente, os fluxogramas das amostras analisadas por FRX na temperatura ambiente e com tratamento térmico.

Figura 27 - Fluxograma das amostras analisadas por FRX na temperatura ambiente.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 28 - Fluxograma das amostras aquecidas e analisadas por FRX.



Fonte: O autor, 2017.

3.7 Análises térmicas

Neste trabalho, foram realizadas análises termodiferencial (ATD) e a termogravimétrica (TG), sendo estas utilizadas apenas para a alíquota da alimentação.

Os ensaios de análise térmica diferencial (ATD) e termogravimétrico (TG) foram realizados num analisador térmico simultâneo, Shimadzu DTG – 60H, sob atmosfera de nitrogênio, partindo da temperatura ambiente até aproximadamente 1.100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A Figura 29 mostra o equipamento usado.

Figura 29 - Equipamento usado na realização das análises térmicas termodiferencial e termogravimétrica.



Fonte: O autor, 2017.

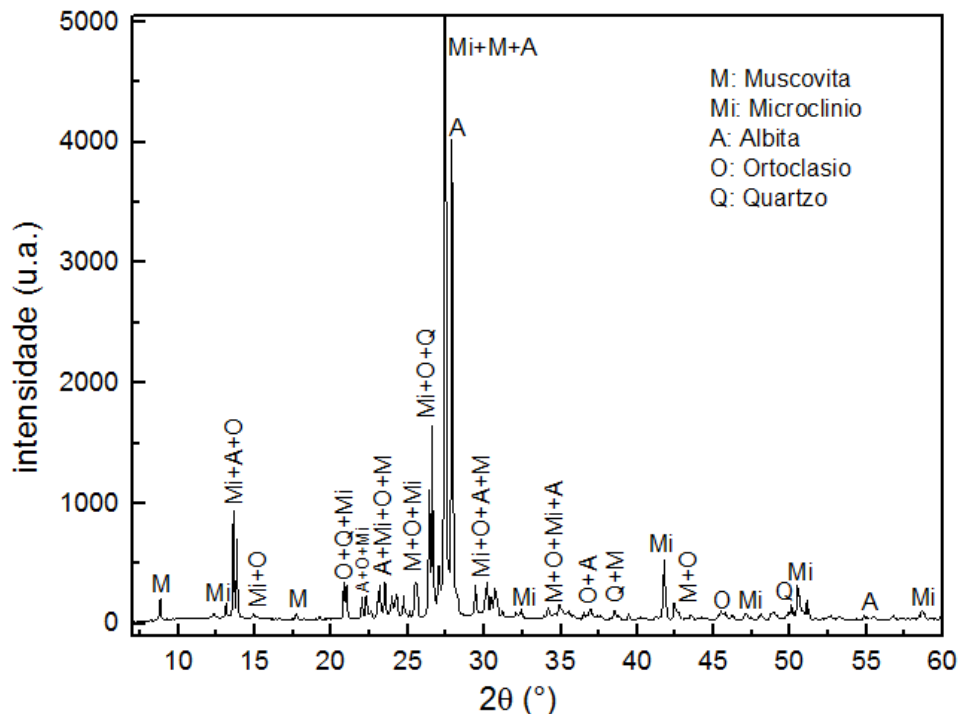
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos das análises granulométricas realizadas por peneiramento, bem como a caracterização mineralógica, química e térmica da amostra.

4.1 Caracterização mineralógica da pilha de minério

A Figura 30 mostra o difratograma de uma amostra da pilha de minério com os seus respectivos picos de difração referente aos planos cristalinos dos minerais identificados. O resultado da difração de raios X mostra que a pilha de minério é constituída predominantemente pelos seguintes minerais: muscovita ($\text{KAl}_2\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), microclina (KAlSi_3O_8), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), ortoclásio (KAlSi_3O_8) e quartzo (SiO_2).

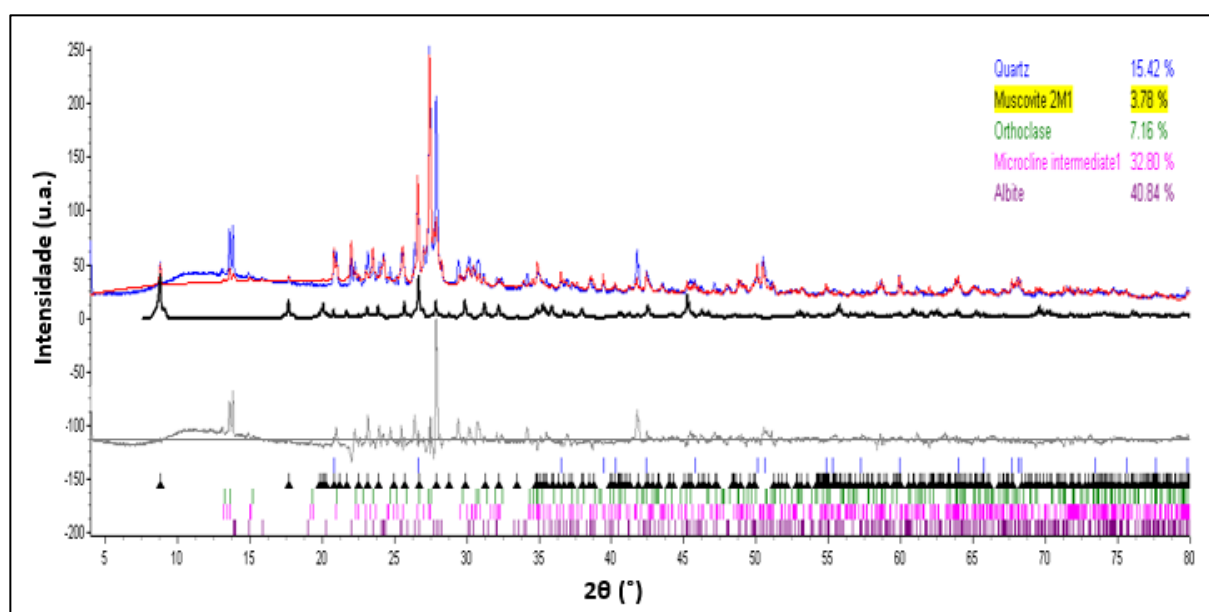
Figura 30 - Difratograma da pilha de minério com as principais fases minerais, muscovita, microclina, albita, ortoclásio e quartzo.



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 31 mostra a composição mineralógica obtida por meio do difratograma de raios X de uma amostra representativa da pilha de minério pelo método de Rietveld. As fases minerais encontradas foram as seguintes: 40,84 % de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), 7,16 % de ortoclásio (KAlSi_3O_8), 32,80 % de microclina (KAlSi_3O_8), 3,78 % de muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{11}$) e 15,42 % de quartzo (SiO_2).

Figura 31 - Interface do aplicativo (TOPAS), usado na quantificação das fases minerais pelo método de Rietveld.



Fonte: O autor, 2017.

A quantificação pelo método de Rietveld está associada a uma incerteza, porque a quantificação depende dos padrões de difração das fases minerais indexadas e da qualidade e complexibilidade da amostra analisada. Os feldspatos apresentam estrutura cristalina similar, o que acaba induzindo o software ao erro no ajuste entre uma variedade de feldspato e outra, o que torna a análise das variedades de feldspato separadamente um trabalho complicado e associado a certo grau de incerteza.

4.2 Caracterização química da pilha de minério

A Tabela 6 apresenta a composição química de uma amostra da pilha de minério. O resultado mostra que a pilha é composta essencialmente por SiO_2 , proveniente principalmente

dos minerais de quartzo, feldspatos e muscovita. A pilha de minério apresenta um teor de álcalis de 13,7 %, sendo 9,9 % oriundo do K_2O e 3,8 % do Na_2O .

Tabela 6 - Composição química da pilha de minério.

Composição	(%)
SiO_2	66,82
Al_2O_3	16,94
K_2O	9,9
Na_2O	3,8
Outros*	0,45
PF	1,24
TOTAL	99,15

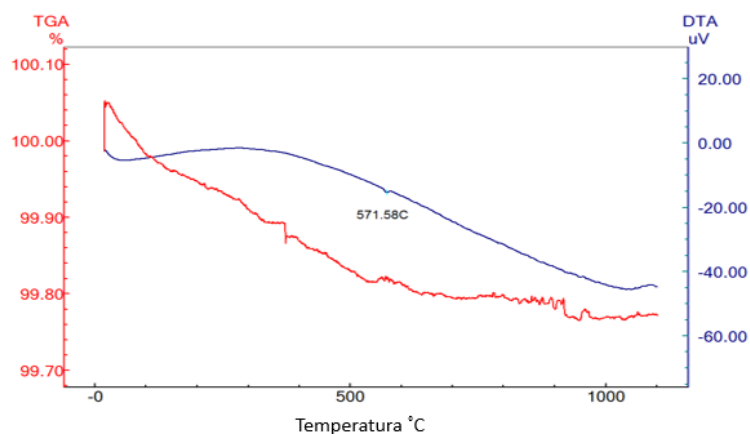
* TiO_2 , P_2O_5 , MgO , MnO , CaO , Fe_2O_3 .

Fonte: O autor, 2017.

4.3 Caracterização térmica da pilha de minério

A Figura 32 apresenta a análise termogravimétrica (TG) e térmica diferencial (ATD) de uma amostra da pilha de minério. A análise termogravimétrica mostra que a pilha de minério teve uma perda de massa muito pequena, da ordem de 0,1 %, durante o aquecimento entre as temperaturas ambiente e 1.100 °C. Este resultado indica que uma parte da água das moléculas de muscovita foi transferida, a partir de 400 °C, para a atmosfera. A análise térmica diferencial evidencia um pico de transformação de fases, que ocorre na temperatura de 571 °C, uma vez que o quartzo α mudou para o quartzo β , de conformidade com a literatura.

Figura 32 - Análise termodiferencial da amostra de alimentação, mostrando a temperatura do evento térmico associado a mudança de fase do quartzo.

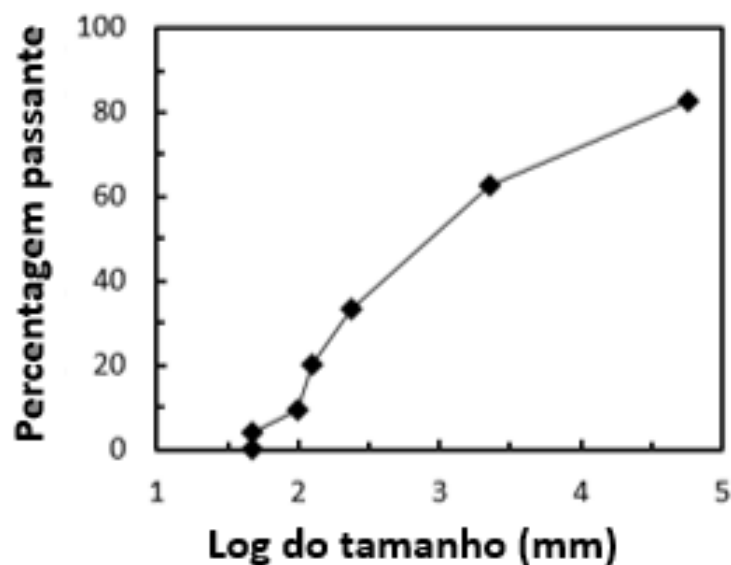


Fonte: O autor, 2017.

4.4 Caracterização granulométrica da pilha de minério

A Figura 33 apresenta a distribuição dos tamanhos das partículas da pilha de minério, depois que todo o material foi fragmentado num britador de mandíbulas de um eixo e em seguida classificado entre 4,76 e 1,68 mm.

Figura 33 - Distribuição do tamanho das partículas da pilha de minério.



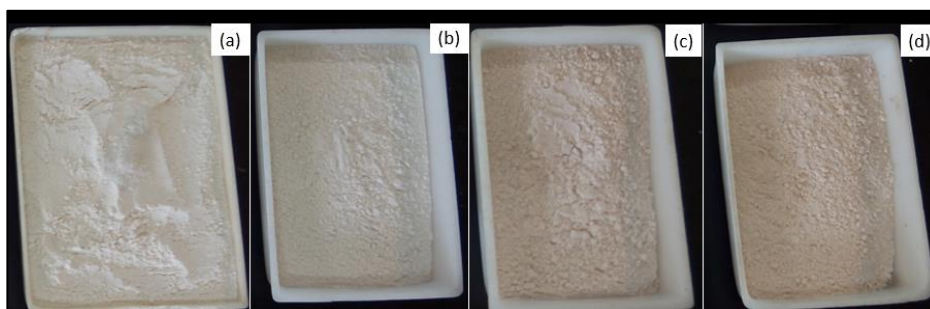
Fonte: O autor, 2017.

4.5 Tratamento térmico e ensaio de moagem

As alíquotas da pilha de minério foram aquecidas nas temperaturas de 200, 400 e 800 °C e depois foram moídas cada uma para os tempos de 20, 40 e 80 minutos num moinho de bolas.

A Figura 34 mostra as alíquotas da pilha de minério nas temperaturas ambiente, 200, 400 e 800 °C, depois que foram moídas por 80 minutos. O resultado mostra que as alíquotas passaram da cor branca, na temperatura ambiente, para um tom pastel, depois que sofreram o tratamento térmico. Porém, a alteração na cor não foi muito significativa. Essas mudanças de coloração podem estar associadas à presença dos contaminantes como TiO_2 e Fe_2O_3 e, como também a elevação da temperatura. De acordo com os resultados da FRX, a pilha de minério contém os óxidos TiO_2 , P_2O_5 , MgO , MnO , CaO e Fe_2O_3 , totalizando 0,45 % do seu peso, o que seria uma grande vantagem por ser um baixo teor de contaminantes (Fe_2O_3 , TiO_2), que influi diretamente na cor de queima, pois quanto menor o teor de contaminantes mais clara a cor de queima, possibilitando assim o uso mais nobre deste feldspato (LIMA, 2002).

Figura 34 - Alíquotas moídas por 80 minutos a temperatura ambiente (a), e aquecidas a 200 °C (b), 400 °C (c) e 800 °C (d), mostrando a variação da coloração provocada pelo aumento da temperatura.



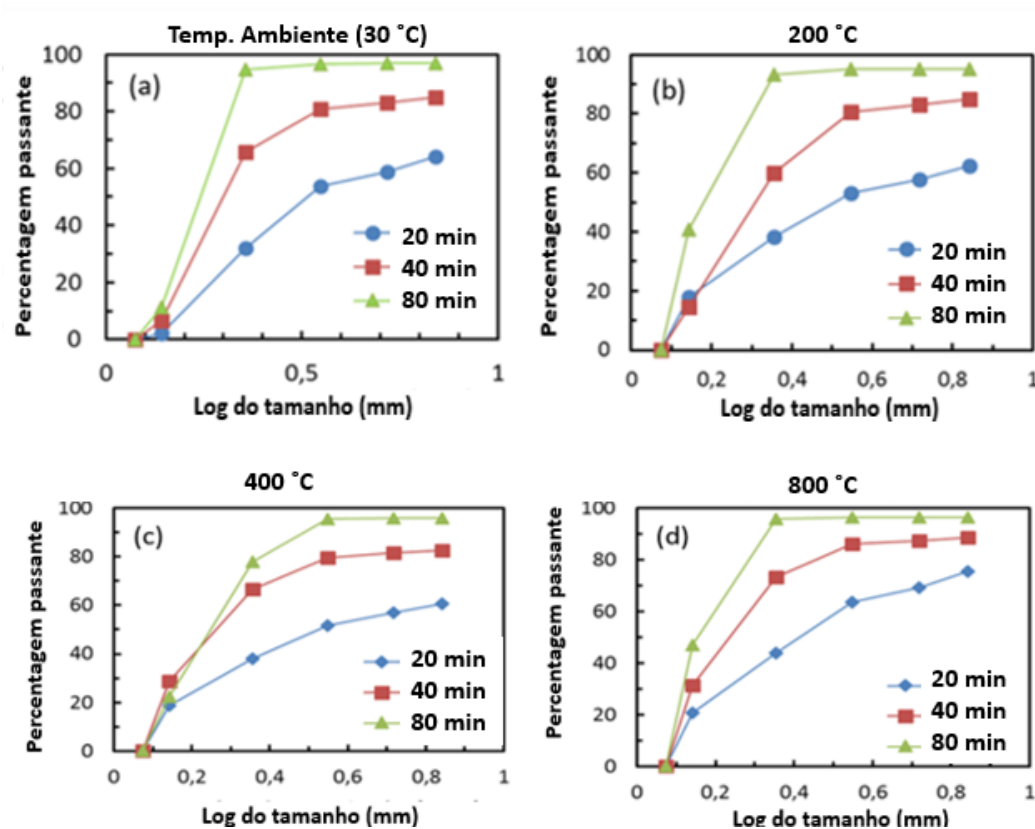
Fonte: O autor, 2017.

A cor clara nas peças de porcelanato é desejada por quem fabrica, não só pelo aspecto estético da peça em si, principalmente em porcelanatos polidos, como também pela interação do Fe_2O_3 e TiO_2 com os elementos dos pigmentos e corantes resultando em desvio de tonalidades em peças esmaltadas (OLIVEIRA, 2012).

A Figura 35 mostra as curvas de distribuição granulométrica das alíquotas da pilha de minério para cada temperatura depois de moídas por 20, 40 e 80 minutos, empregando-se um

moinho de bolas. A redução de tamanho das partículas aumenta significativamente com os tempos de moagens na mesma temperatura.

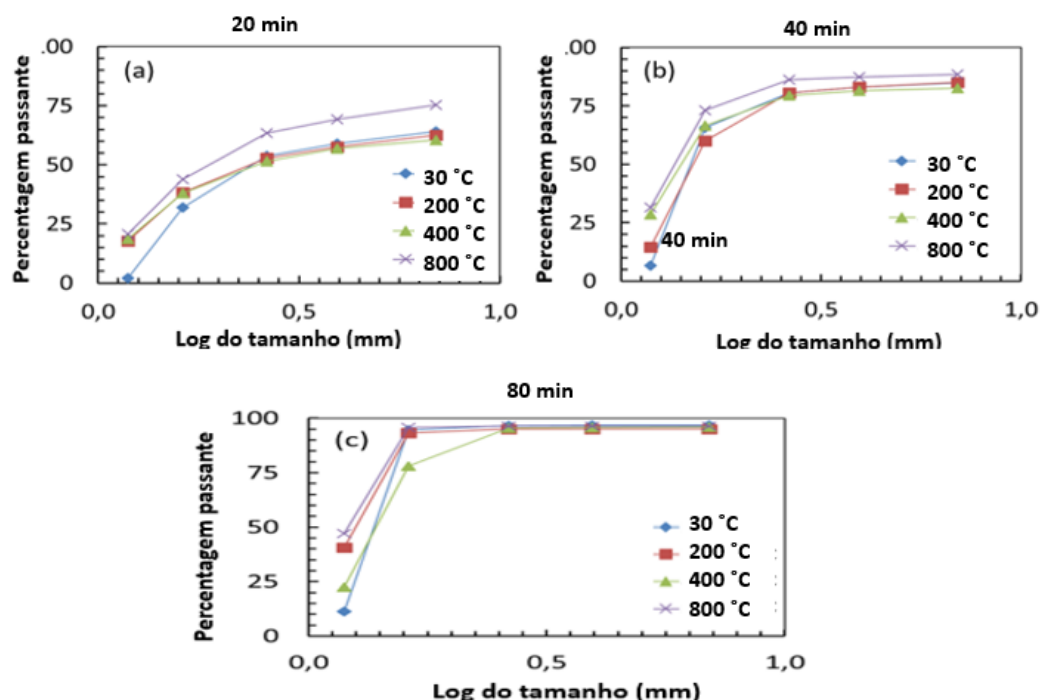
Figura 35 - Distribuição granulométrica das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos a temperatura ambiente (a) e após tratamento térmico a 200 °C (b), 400 °C (c) e 800 °C (d).



Fonte: O autor, 2017.

A Figura 36 mostra as curvas de distribuição granulométrica das alíquotas da pilha de minério para cada tempo de moagem nas temperaturas ambiente (30 °C), 200, 400 e 800 °C. Observa-se que o efeito da temperatura sobre a curva de distribuição granulométrica em todos os tempos de moagem é pouco significativo.

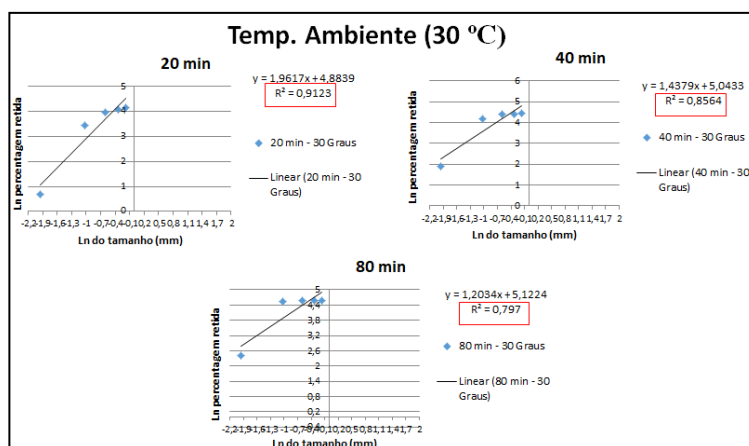
Figura 36 - Distribuição granulométrica das alíquotas moídas por 20 minutos (a), 40 minutos (b) e 80 minutos (c) a temperatura ambiente (30 °C) e tratadas termicamente à 200, 400 e 800.



Fonte: O autor, 2017.

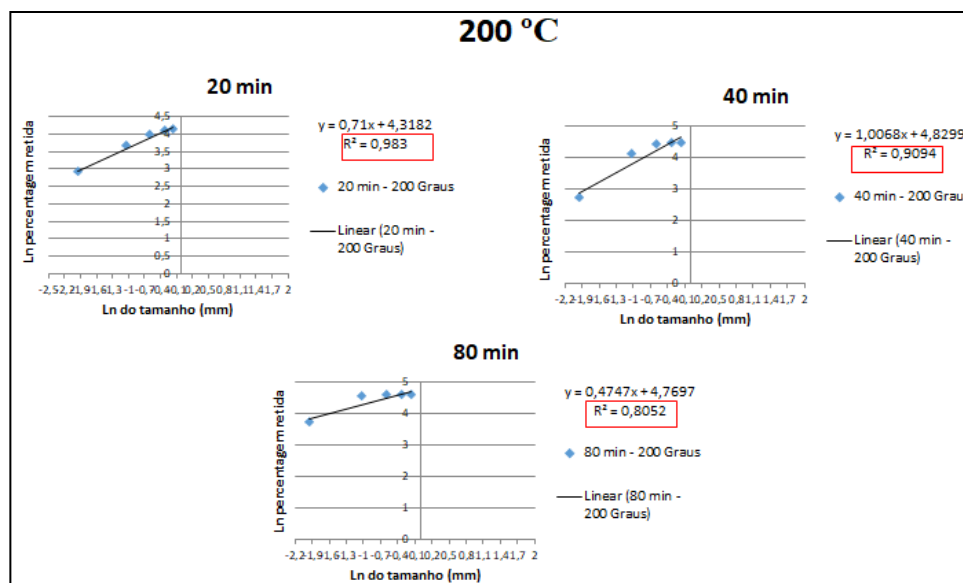
As Figuras 37, 38, 39 e 40 mostram as curvas de distribuição granulométrica das alíquotas da pilha de minério, segundo o modelo de Gates - Gaudin e Schumann. Podemos observar que para quase todas as curvas, o fator de correlação (R^2) tem um valor muito próximo de 1 (um), indicando assim um bom desempenho na distribuição granulométrica.

Figura 37 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos a temperatura ambiente (30 °C).



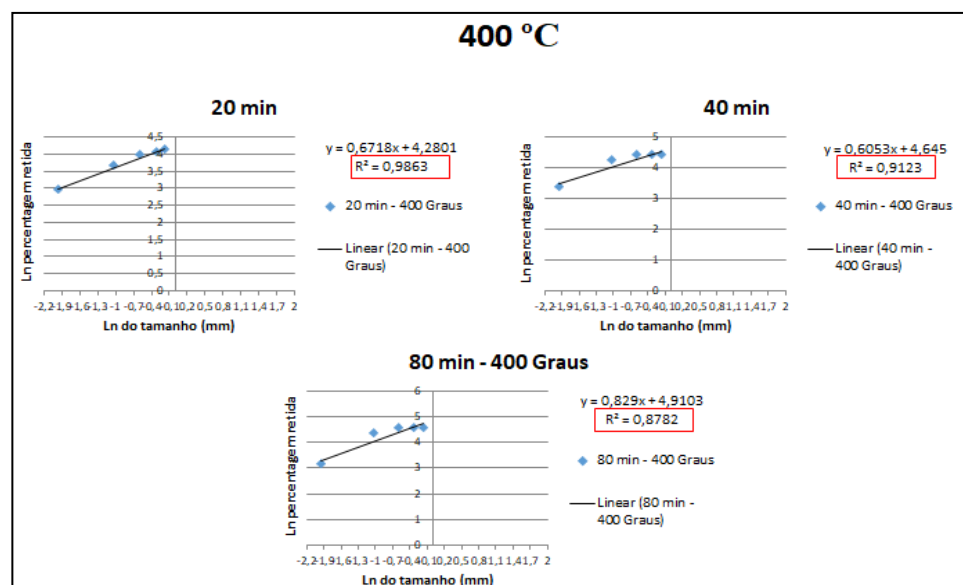
Fonte: O autor, 2017.

Figura 38 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos após tratamento térmico à 200 °C.



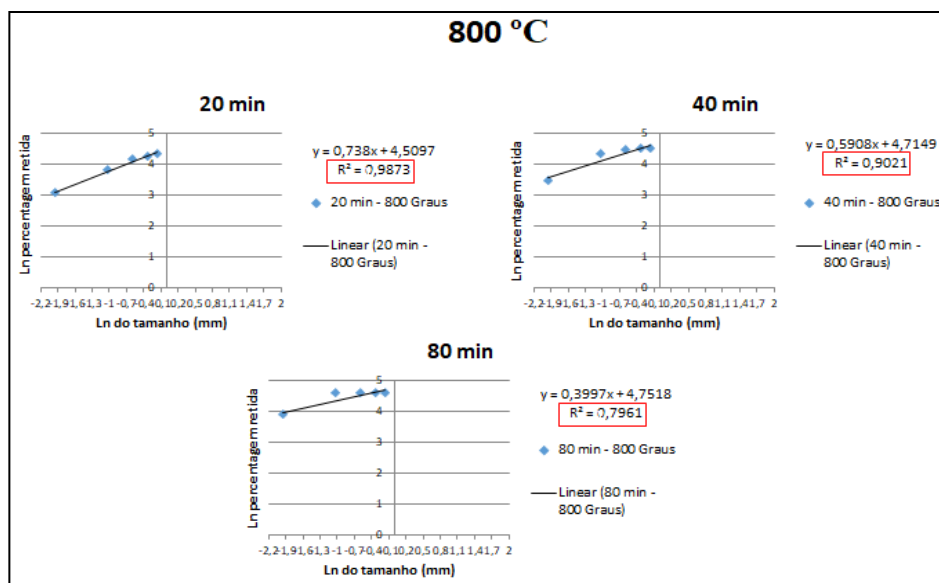
Fonte: O autor, 2017.

Figura 39 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos após tratamento térmico à 400 °C.



Fonte: O autor, 2017.

Figura 40 - Distribuição granulométrica segundo o modelo de Gates – Gaudin e Schuhmann (GGS) das alíquotas moídas por 20, 40 e 80 minutos após tratamento térmico à 800 °C.



Fonte: O autor, 2017.

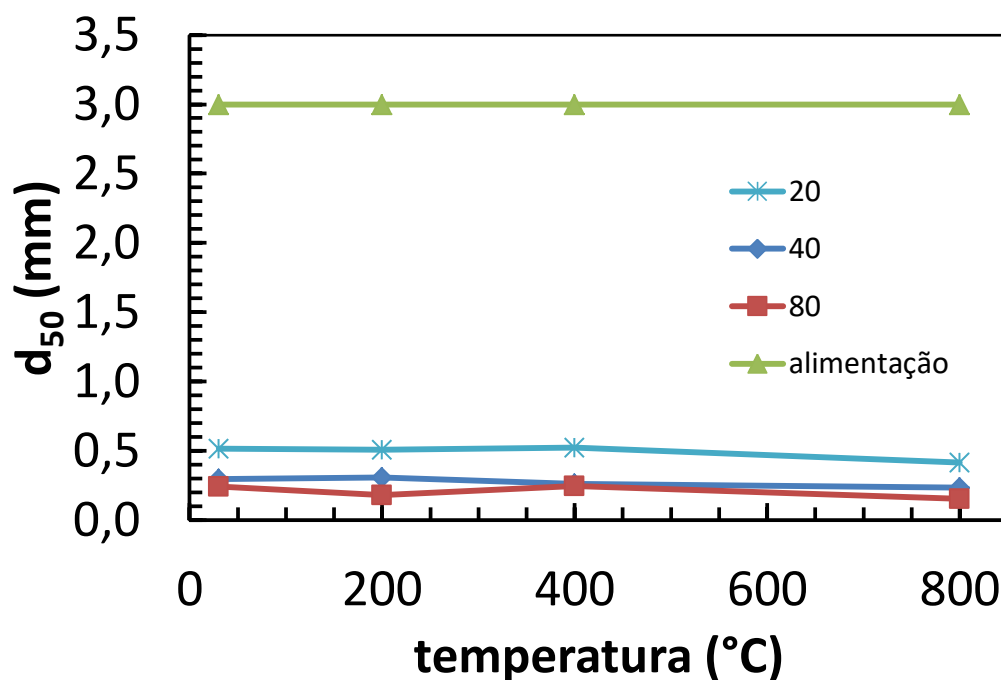
A Tabela 7 e a Figura 41 mostram o comportamento do diâmetro médio das partículas (d_{50}) para cada tempo de moagem e a temperatura associada. O tamanho do d_{50} corresponde à abertura que retém 50 % em peso das partículas.

Tabela 7 - Diâmetro médio das partículas (mm) em cada tempo de moagem e a temperatura associada.

Tempo de moagem (min)	Temperatura (°C)			
	30	200	400	800
0	3	3	3	3
20	0,51	0,51	0,53	0,42
40	0,30	0,31	0,26	0,24
80	0,24	0,18	0,25	0,15

Fonte: O autor, 2017.

Figura 41 - Diâmetros médios das partículas em cada temperatura estudada .



Fonte: O autor, 2017.

Observa-se que o diâmetro médio das partículas (d_{50}) para cada temperatura reduz significativamente à medida que se aumenta o tempo de moagem. Todavia, o tratamento térmico influenciou pouco na fragmentação das partículas em todos os tempos de moagem, ou seja, a redução dos diâmetros médios não foi significativa.

4.6 Análises químicas

A Tabela 8 mostra a quantificação dos elementos químicos presentes na amostra de alimentação e nas alíquotas a temperatura ambiente e aquecidas a 200, 400 e 800 °C, essas moídas por 20, 40 e 80 minutos. Para estas análises, as alíquotas foram fracionadas e analisadas apenas as frações menores que 65 malhas (212 μ m). A FRX é um tipo de análise que fornece uma maior precisão com relação à composição química da amostra e com isso podemos verificar com maior precisão se o teor de álcalis sofreu alteração pelo processo usado neste trabalho.

Tabela 8 - Análises químicas do feldspato do pegmatito da Província da Borborema.

Composição (%)	Alimentação (%)	30 °C			200 °C			400 °C		
		20 min	40 min	80 min	20 min	40 min	80 min	20 min	40 min	80 min
SiO ₂	66,8	65,1	64,9	66,7	65,4	65,3	66,3	65,1	65	66,2
Al ₂ O ₃	16,9	17,9	17,6	17,7	18,2	17,7	17,7	17,9	17,5	17,6
K ₂ O	9,9	9,8	10	10,3	9,8	10,1	10,3	9,7	9,9	10,3
Na ₂ O	3,8	3,7	3,9	4,8	3,8	3,5	3,5	3,7	3,7	3,4
Outros*	0,5	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4	0,8	0,6	0,5
PF	1,2	1,1	0,8	1	1,1	1,1	1,2	1,4	1,3	0,9
TOTAL	99,2	98,3	97,6	100	98,7	98,1	99,5	98,6	98,1	99
K ₂ O + Na ₂ O	13,7	13,5	13,9	15,1	13,5	13,6	13,8	13,4	13,7	13,7

*TiO₂, P₂O₅, MgO, MnO, CaO, Fe₂O₃.

Fonte: O autor, 2017.

Observa-se que na amostra de alimentação o teor de álcalis (K₂O + Na₂O) foi de 13,7 %, aproximadamente. Comparando as alíquotas moídas e aquecidas com a amostra de alimentação, destaca-se que não houve significativa variação no teor de álcalis. Esse teor de álcalis traz a essa amostra um elevado potencial fundente, alto brilho, e consequentemente uma baixa absorção d'água, quando usado na produção de cerâmicas. Cabe destacar também, que o feldspato, possui outros nutrientes, como o silício, ferro, cálcio, manganês e fósforo. Como ponto positivo, também foi diagnosticado o baixo teor de contaminantes (Fe₂O₃), que possui influência direta na cor de queima, de tal modo que quanto menor o teor dos contaminantes, mais clara será a cor de queima, possibilitando assim uma aplicação mais nobre para este feldspato.

Segundo Sah (2005), de acordo com a classificação química de rochas ígneas, este pegmatito é classificado como uma rocha ácida, já que o teor de sílica (SiO₂) contido no material é aproximadamente 66,82 %. A base para a classificação das rochas está relacionada com teor de SiO₂, onde as rochas com teores inferiores a 45 % SiO₂ são consideradas ultrabásicas; de 45 % a

52 % SiO₂, básica; de 52 % a 66 % SiO₂, intermediária; e para teores superiores a 66 % SiO₂, a rocha é classificada como ácida.

Analisando os resultados da Tabela 8, pôde-se observar que a amostra cominuída por 80 min e que não sofreu tratamento térmico, apresentou uma pequena elevação no teor álcalis, que pode estar associado apenas a variabilidade na análise devido a pequena quantidade de amostra

usada. É interessante também avaliar o comportamento dos elementos presentes na composição química do mineral antes e depois da queima, pois se percebe claramente que os conteúdos de SiO_2 e Fe_2O_3 variam muito pouco, e os conteúdos de K_2O sofrem pequenas variações e permanecem mais ou menos com o mesmo valor antes e depois da queima.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões:

- (i) O tratamento térmico da pilha de minério, oriunda de uma Empresa produtora de feldspatos no interior do Rio Grande do Norte, praticamente, não contribuiu para a fragmentação das partículas minerais. Em consequência, não houve a liberação dos feldspatos e a elevação no teor de álcalis nas frações menores que 65 malhas;
- (ii) As partículas minerais da pilha de minério sofreram redução de tamanho com o aumento do tempo de moagem. Todavia, esta fragmentação não foi suficiente para a elevação do teor de álcalis nas frações menores que 65 malhas;
- (iii) O teor de álcalis da pilha de minério permaneceu praticamente inalterado para todos os tempos de moagens e temperaturas. Isto foi atribuído ao teor elevado de álcalis na pilha de minério, a prevalência da moagem por atrito e sua realização na temperatura ambiente;
- (iv) A pilha de minério teve uma perda de massa, da ordem de 0,1 %, durante o aquecimento entre as temperaturas ambiente e 1.100 °C e uma transformação de fase em 571 °C, de quartzo α para β , em conformidade com a literatura;
- (v) A pilha de minério, após adequação granulométrica, possui propriedades para serem empregadas em revestimentos cerâmicos, indústrias de coloríficos ou vidros e carga, na produção de tintas, papeis e inseticidas, dadas ao seu elevado teor de álcalis (13,7 %) e o baixo teor de contaminantes (0,45 %).

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, apresentamos as seguintes sugestões:

- (i) A metodologia do tratamento térmico deve ser testada para outros minérios, visando à liberação do mineral de interesse econômico para a elevação de teor de um produto;
- (ii) O tratamento térmico deve privilegiar a fragmentação por impacto e ser realizado numa temperatura superior a do meio ambiente;
- (iii) O método do tratamento térmico deve ser testado para minérios de feldspatos que tenha potencial para se elevar o teor de álcalis, visando à melhoria do produto final;
- (iv) Deve-se realizar a cominuição com partículas sinterizadas de feldspatos.

REFERÊNCIAS

ABC ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA Cerâmica estrutural e de revestimento [Online]// abceram.- Panorama, 1994.- 06 de Dezembro de 2016.- <http://abceram.org.br/>.

ABREU S. F. Recursos Minerais do Brasil [Livro].- Edgard Blucher Ltda, 1973.- Vol. 1.

ANGELIM, L. A. A.; NESI, J. R.; TORRES, H. H. F.; MEDEIROS, V. C.; SANTOS, C. A.; VEIGA JR., J. P.; MENDES, V. A. Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1/500.000 [Artigo].- Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2006.

BARBATO C. N., OGASAWARA T. e SAMPAIO J. A. Aproveitamento de feldspato pegmatítico da região Borborema-Seridó para a produção de uma vitrocerâmica felspática reforçada com leucita [Seção do Livro]// SÉRIE ROCHAS E MINERAIS.- Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

BERALDO J. L. Moagem de minérios em moinhos tubulares [Livro].- São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1987.

BEZERRA M. S., CARVALHO V. G. D. e NESI J. R. Caracterização e mercado dos minerais de pegmatitos da Província da Borborema [Seção do Livro]// Série Recursos Minerais - Projeto pegmatitos do Nordeste Oriental/ A. do livro CPRM.- Recife- CPRM, 1994.- Vol. 5.

BIFFI G. O. Defeitos de fabricação das placas cerâmicas. Tradução Jaime Pedrassani [Livro].- São Paulo: Faenza Ed. do Brasil, 2000.

CALLISTER JR. W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução [Livro] - LTC, 5ª ED., 1999.

CHAGAS T. T. R. A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química, e microestrutura.- Ouro Preto: [Dissertação], Mestrado em Engenharia de Materiais. REDEMAT/UFOP-CETEC-UEMG, 2008.

CHAVES A. P. e PERES A. E. C. Teoria e prática no tratamento de minérios [Livro].- São Paulo: Signus, 2003.- 2: Vol. 3.

CHEIREGATI. A. C. Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios. [Dissertação], Mestrado. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 2001.

CORDEIRO T. S. Desenvolvimento de esmalte com matérias-primas cruas [Relatório].- SANTA CATARINA: Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2012.

CPRM - Mapa das províncias geológicas [Periódico].- 2013.

DANA J. D. Grupo dos Feldspatos. Manual de Mineralogia, vol..2, p.536- [Livro].- Rio de Janeiro: Editora ao Livro Técnico SA, 1970.

DNPM - Feldspato - Sumário Mineral [Periódico].- Minas Gerais: DNPM, 2014.

DNPM/CPRM - Principais Depósitos Minerais do Brasil [Livro]. - Brasília: DNPM/CPRM, 1997.- Vols. IV, parte B, capítulo 41, Província Pegmatítica da Borborema - Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte, pp. 441-467.

FACINCANI E. Tecnología cerámica los ladrillos [Livro].- Castellón: Faenza Editrice Ibérica, 1993.

FIGUEIREDO E. R. H. Condutividade térmica de rochas: Uma aplicação para granitos ornamentais - Natal: [Dissertação], Mestrado em Geodinâmica e Geofísica. UFRN, 2006.

GALERY, R. Fragmentação de Minérios: Primeira Parte. Belo Horizonte: UFMG, 2011.23 p.

HLAVÀC J. The technology of glass and ceramics. [Artigo]// Glass scienci and technology.- United States: Elsevier Science, 1983. - 4.

HANLIE, B; LIYUN, T.; QIUJUAN, B.; YONG, Z. Effect of Calcined Temperature on the Solubility of Trace Elements from Manifanshi [Periódico]// Journal of Wuhan University of Technology - Mater.- 2006.- pp. 146-149.

HAMBERG, H. The Origin of Metamorphic and Metasomatic Rocks. The University of Chicago Press, 1958.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:

<<http://mapas.ibge.gov.br/politico-administrativo/estaduais>> - 2015. Acesso em 04 maio 2017.

IONASHIRO, M. Princípios Básicos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial/ Calorimetria Exploratória Diferencial [Livro]. Araraquara, Giz Editorial, 2004.

JOHNSTO JR. W. D. Os Pegmatitos Berilo -Tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil [Livro].- Rio de Janeiro. DNPM, 1945.

KAUFFMAN R. A. e VAN D. D. Feldspars. In: Industrial Minerals and Rocks [Relatório].- Colorado: Senior, 1994.

KELLY E. G. e SPOTTISWOOD D. J. Introduction to mineral processing [Artigo].- 1982.- p. 491.

LIMA M. A. M. Introdução aos Materiais e Processos para Designers [Livro].- Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2006.

LIMA M. P. Aspectos da lavra de feldspato em pegmatitos da província da Borborema.- Campina Grande, PB: [Dissertação], Mestrado em Engenharia de Minas. UFCG, 2002.

LIRA, B. B., RODRIGUES, G., CAVALCANTI FILHO, L.L., MADEIRA, V. S., COMBOIM, J. E. L. Estudos dos Pegmatitos da Província da Borborema - Paraíba: Minerais e Minérios de Interesse Tecnológico. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 13, n. 1, p. 113-119, jan./mar. 2016.

LONDON D. Granitic Pegmatites. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences [Periódico].- Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1996.- Vols. 87: 305-319.

LONDON D. Pegmatites. [Periódico].- Assoc. Can.. Québec, Canadá: R. F. MARTIN, Mineral, 2008.- The Canadian Mineralogist: Vols. Special Publication 10, 347p.

LOUREIRO F.E.L e NASCIMENTO M. Importância e Função dos Fertilizantes numa Agricultura Sustentável [Seção do Livro]// Série Estudos e Documentos.- Rio de Janeiro: CETEM, 2003.

LUZ A. B. e COELHO J. M. Rochas e Minerais Industriais [Livro].- Rio de Janeiro: CETEM, 2005.

LUZ A. B., SAMPAIO J. A. e FRANÇA S. C. A. Tratamento de Minérios. [Livro].- Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

METSO MINERALS - Manual de Britagem [Livro].- São Paulo - Metso Minerals, 2015.

MOTA, J. F. M.; COELHO, J. M.; CABRAL JR., M.; ZANARDO, A.; TANO, L. C. Raw materials for porcelainized stoneware tiles [Artigo]// Tile & Brick.- 2002.- 6: Vol. 18.

NASCIMENTO, M e LOUREIRO, F. E. L. Fertilizantes e Sustentabilidade: O Potássio na Agricultura Brasileira, Fontes e Rotas Alternativas [Seção do Livro].- Rio de Janeiro: Série Estudos e Documentos. Coletânea Fertilizantes - V. CETEM-MCTI, 2004.- Vol. 61.

NAPIER-MUNN, T. J., MORRELL, S., MORRISON, R. D., KOJOVIC, T. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, vol. 2, University of Queensland, Brisbane.

NEVES, P. B. Características de Fragmentação e Microestruturais de Rochas e seu Comportamento na Britagem para a Produção de Agregados. [Dissertação], Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Rio de Janeiro, 2005.

NORTON, F. H. Introdução à tecnologia cerâmica. Tradução Jefferson Vieira de Souza [Periódico].- São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1973.

OLIVEIRA, C. F. Influência do teor de feldspato espodumênio e albita na sinterização de uma massa cerâmica triaxial. [Dissertação], Mestrado em Engenharia Mecânica. UFSJ, 2012.

PADILHA, A. F.; AMBROZIO, FILHO F. Técnicas de Análise Microestrutural. São Paulo: Hemus, 1985. 192p.

ROLFF P. A. M. A. Geologia da Província Tântalo-glucínifera da Borborema [Periódico].- Rio de Janeiro, 69p: Boletim 73. DNPM/DFPM, 1945.

SAH S. L. Petrography: Chemical and Quasi-chemical Classification. [Artigo]// Encyclopaedia of Petroleum Science & Engineering.- Índia: Kalpaz Publications, 2005.- Vols. p. 91 - 96.

SANZONOWICKS C. e MIENICZUK J. Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciado pela planta, fonte e métodos de aplicação de adubos [Periódico].- Campinas: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1985.- Vols. 9:45-50.

SEGEMAR - Feldspato y Mica, SEGEMAR-Serviço Geológico Minero, INTEMIN-Instituto de Tecnologia Minera, IGRM- Instituto de [Periódico].-: UNSAM, 2000.

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

SIMMONS, WM. B.; WEBBER, K. L.; FALSTER, A. U.; NIZAMOFF, J. W. Pegmatology - pegmatite mineralogy, petrology and petrogenesis [Periódico].- Nova Orleães, USA: Rubellite Press, 2003.

SOARES, D. R. Contribuição à Petrologia de Pegmatitos Mineralizados em Elementos Raros e Elbaítas Gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. [Tese]. Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco - Centro de Tecnologia e Geociências - Programa de Pós-Graduação em Geociências. Recife, 2004.

SOLODOV, N. A. Geochemistry of rare metal granite pegmatite [Livro].- Geochemistry, 1959.- Vols. 7: 778-792.

SOUSA, V. C. Plano de Pesquisa da Empresa Micromil-Micronização e Moagem LTDA [Relatório].- Forquilha, 2012.

TAGGART, A. F. Handbook of Mineral Dressing - Ores and Industrial Minerals.- [Livro]. New York; London; Sydney: John Willey & Sons, Inc., 1945.

WIKIPÉDIA - A enciclopédia livre. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Feldspato>> Acesso em: 08 mar 2016.

ANEXO

Escalas granulométricas (LUZ; SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Escala Tyler	
$r = \sqrt{2} = 1,414$	
$a_0 = 74 \mu\text{m}$	
Malhas	mm
3	6,680
4	4,699
6	3,327
8	2,362
10	1,651
14	1,168
20	0,833
28	0,589
35	0,417
48	0,295
65	0,208
100	0,147
150	0,104
200 (base)	0,074
270	0,053
400	0,038