

REDIMENSIONAMENTO DO MOINHO DE BOLAS DE SEIXOS DA COOPERATIVA DOS GARIMPEIROS DE PEDRA LAVRADA/PB

¹Gerson Ferreira da Silva, Doutorando (UFRGS), e-mail: gmineracao@hotmail.com
Elbert Valdiviezo Viera, Prof. Titular (UFCG), e-mail: elbertvaldiviezo@hotmail.com

Resumo: O circuito de cominuição da cooperativa dos garimpeiros do município de Pedra Lavrada-PB, opera na britagem e moagem do feldspato potássico e da albita. A etapa de moagem é realizada em um moinho de bolas de seixos, com a pretensão de alcançar as especificações de granulometria de feldspato albita em 200 #. Para realizar o redimensionamento do equipamento de moagem, foram usados os métodos desenvolvido pelo fabricante Metso, que é feito com auxílio de tabelas de operação, e a equação de Bond usada na determinação do cálculo da energia. Os resultados obtidos sugerem que o moinho tenha as seguintes características: diâmetro nominal de 2,44 m e comprimento nominal de 2,44 m, velocidade de operação do 21,30 rpm ou 76,1% da velocidade crítica, potência do motor instalada no valor de 237,0 HP, descarga do material por transbordo, e a percentagem de volume de carga de bolas de seixos correspondente a 45% do volume total.

Palavras-chave: Coomipel, Feldspato, Moinhos, Pegmatitos.

RESIZING THE PEBBLES BALLS MILL OF THE COOPERATIVE OF PROSPECTORS DE PEDRA LAVRADA/PB

Abstract: The comminution circuit of the prospector cooperative in the municipality of Pedra Lavrada-PB, operates in the crushing and grinding of potassium feldspar and of the albite. The grinding step is carried out in a pebble ball mill, with the intention of reaching the specifications of 200 # albite feldspar granulometry. To perform the resizing of the grinding equipment, the methods developed by the manufacturer Metso were used, which is done with the aid of operating tables, and the Bond equation used in determining the energy calculation. The results obtained suggested that the mill has the following characteristics: nominal diameter of 2,44 m and nominal length of 2,44 m, operating speed of 21,30 rpm or 76,1% of the critical speed, motor power installed in the amount of 237,0 HP, material discharge by overflow, and the percentage of load volume of pebble balls corresponding to 45% of the total volume.

Keywords: Coomipel, feldspar, Mills, Pegmatites.

1. Introdução

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

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB) é uma região de domínio de pegmatitos, abrangendo parte dos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, com presença de corpos mineralizados, principalmente em Ta-Nb, Be, Sn e Li. Outras áreas pegmatíticas também ocorrem no Estado do Ceará. A mineração de pegmatitos na Mesorregião do Seridó teve início na década de 1940, que teve incentivos resultado da cooperação do governo brasileiro com as Forças Aliadas durante a Segunda Guerra

Mundial (LUZ; LINS, 2003).

No Estado da Paraíba, as atividades mineiras que ocorrem nas cidades de Pedra Lavrada e Nova Palmeira, concentram-se principalmente na extração e beneficiamento de minerais de pegmatitos, que vêm sendo exploradas na região desde meados do século passado (LUZ; LINS, 2008).

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

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

Este trabalho realiza inicialmente uma análise preliminar do funcionamento do processo de moagem, e em seguida o redimensionamento do moinho de bolas de seixos da unidade de beneficiamento da Cooperativa de Mineradores do Município de Pedra Lavrada-PB. Para realização desta pesquisa que aborda o processamento mineral foi usado o manual da Metso, e o modelo de Bond, que aborda as relações entre a energia empregada e a redução de tamanho do feldspato albita. Este estudo é importante para termos uma posição aproximada da realidade operacional, servindo de orientação para melhorar a eficiência do funcionamento do equipamento.

O resultado do redimensionamento do moinho de bolas de seixos servirá para melhoria do processo de obtenção de produtos para atender o setor em termos de qualidade e quantidade. Este estudo também contribuirá para otimização do circuito de beneficiamento, e assim, irá agregar valor, e poderá servir de referência para outras cooperativas.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Pegmatitos

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

No século XX vários pesquisadores desenvolveram teorias sobre a formação e evolução de pegmatitos, tais como FERSMAN (1931), JOHNSTON Jr (1945), (CAMERON *et al.*,1949), SOLODOV (1962), GINSBURG (1979), e CERNY (1991). Os pegmatitos são rochas ígneas, de granulometria variável, alcançando em alguns casos, grãos com tamanho, de centímetros até decímetros, e que a textura associada se chama pegmatítica. Esses corpos têm os mesmos constituintes minerais que o granito (quartzo, feldspato e mica), porém os tamanhos dos cristais são maiores. Apresentam

composições variadas (dioríticas, gabroicas ou graníticas), sendo os pegmatitos graníticos os mais frequentes (JAHNS, 1955).

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

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

2.1.2 Mineralogia dos Pegmatitos da Borborema

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

O mineral quartzo abundante nos pegmatitos da região, não ocorre sob forma de cristais bem formados, distribui-se em todas as unidades, inclusive intercrescidos com os feldspatos. O quartzo do núcleo no corpo geralmente é leitoso (maioria dos pegmatitos), e mais raramente fumê, róseo ou citrino ou mesmo ametista. Em um mesmo núcleo podem ocorrer mais de um tipo de quartzo.

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

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

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

2.2 Feldspato

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

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

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

- **Cor:** Branco a róseo;
- **Aspecto óptico:** Translúcido e transparente;
- **Brilho:** Não metálico, vítreo;
- **Dureza:** Escala de Mohs: 6,0 a 6,5;
- **Peso específico:** 2,5 a 2,8;
- **Sistema de cristalização:** Monoclínico, triclínico;
- **Hábito:** Cristal prismático ou compacto;
- **Composição química:** $(\text{Na,K})\text{AlSi}_2\text{O}_3$, $\text{Ca.Al}_2\text{SiO}_3$, $\text{Ba.Al.Si}_2\text{O}_3$

2.3 Lavra e Beneficiamento de Feldspato

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

Uma grande parte da produção de feldspato no Brasil é realizada em pequenas minas, por garimpeiros, inclusive o pegmatito Alto Serra Branca, situado no município de Pedra Lavrada-PB, que fornece material para COOMIPEL. Nesses pegmatitos são usados métodos e equipamentos rudimentares, com pouca mecanização (Figura 1).



Figura 1 – Equipamentos usados na lavra de pegmatitos no Alto Serra Branca-PB.

Na unidade de beneficiamento da cooperativa COOMIPEL (Cooperativa de Mineradores de Pedra Lavrada-PB), o feldspato albita é beneficiado através das operações de britagem, moagem e classificação, produzindo um feldspato de boa qualidade e de boa aceitação no mercado. Em alguns casos, beneficiam o feldspato com alguma proporção de quartzo, porém com preço inferior, para atender potenciais compradores. O *Run of Mine* do minério vindo da lavra, é descarregado próximo à unidade de beneficiamento, e às vezes despejado diretamente no alimentador vibratório, do tipo grelha.

As etapas do processo de beneficiamento do feldspato na cooperativa constituem-se de dois percursos distintos no processo de cominuição, a depender do feldspato a ser

trabalhado. Na linha de britagem, são fragmentados tanto o feldspato albita como o potássico, apenas na etapa de moagem que seguem caminhos diferentes. A albita é moída no moinho de bolas de seixos (Figura 2), enquanto o feldspato potássico é moído no moinho de martelos. No caso do feldspato albita, a britagem é realizada com dois (02) britadores de mandíbulas, onde o material é submetido à britagem primária e secundária, sendo reduzido a uma granulometria menor que 50 mm. Após a fragmentação, segue em uma correia transportadora para formar uma pilha. Da pilha, o material é transportado por uma retroescavadeira para o silo, que alimenta o moinho de bolas de seixos, onde a granulometria do feldspato albita será reduzida a < 200 malhas (Figura 2).



Figura 2 – Moinho de bolas de seixos da COOMIPEL.

2.4. Equipamentos de Moagem

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

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

2.4.1 Moinhos Cilíndricos ou Rotativos

Os moinhos rotativos são basicamente cilindros constituídos por uma carcaça de ferro, revestida internamente com placas de revestimento de aço ou borracha, que giram sobre mancais e dentro da qual uma carga solta denominada corpos moedores (bolas, barras ou seixos) a qual se movimenta livremente (METSO, 2005). A Figura 3, mostra esquematicamente os componentes de um moinho rotativo.

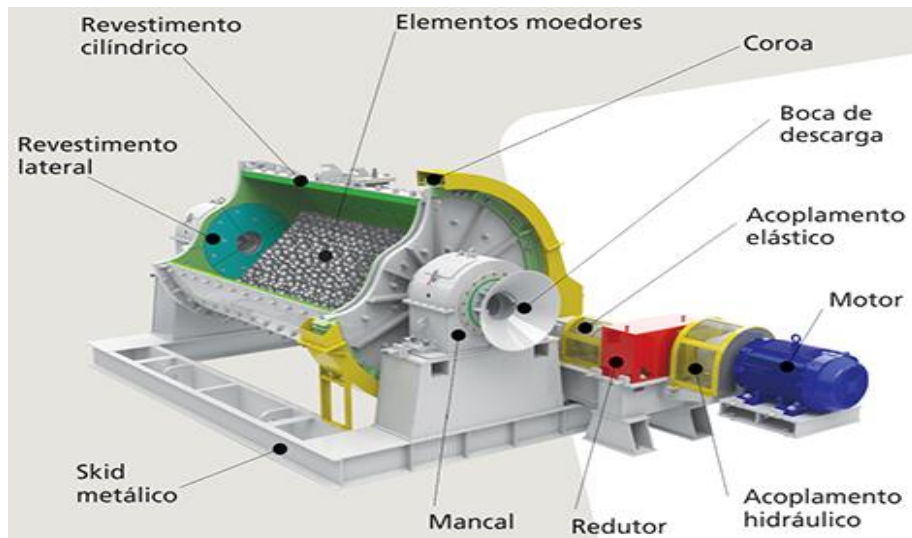


Figura 3 – Esquema de um moinho rotativo.
 Fonte: MÁQUINAS FURLAN (1970).

3. Materiais e Métodos

3.1 Dimensionamento do Moinho de Bolas de Seixos

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

O método de Bond baseia-se na equação por ele desenvolvida e no valor de Índice de Trabalho (WI-Tabela 1), cuja metodologia de determinação foi também por ele estabelecida.

Temos a seguinte equação:

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

Onde:

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

WI = Índice de trabalho; KWh/st;

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

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

Tabela 1 – WI kwh/t curta médios de alguns minerais e minérios.

Mineral	Moinho de barras			Moinho de bolas		
	Nº de testes	Média	Intervalo	Nº de testes	Média	Intervalo
Alumina	3	12,2	9-17	6	17,9	7-34
Barita	6	5,7	2-12	7	5,8	4-9

Argila	4	12,5	6-18	11	10,8	4-23
Feldspato	7	11,0	8-16	7	11,7	9-14

Fonte: Adaptada (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

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

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

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

EF_2 – Fator que corrige o tipo de circuito. Para o circuito aberto em moinho de bolas: Requer uma energia extra quando comparado ao circuito fechado. A Tabela 2 apresenta o fator de ineficiência recomendado.

Tabela 2 – Fator de ineficiência em circuito aberto

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

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

EF_3 – Fator que corrige o diâmetro do moinho. A Tabela 3 descreve os valores desses fatores para os moinhos mais comuns. Esse fator só pode ser calculado após a escolha prévia do moinho.

Tabela 3 – Fator de eficiência do diâmetro do moinho

Diâmetro do Moinho (m)		
Interno Carcaça	Interno Revestimento	EF_3
0,914	0,79	1,25
1,00	0,88	1,23
1,22	1,10	1,17
1,52	1,40	1,12
1,83	1,79	1,075
2,00	1,82	1,060
2,13	1,98	1,042
2,44	2,29	1,014
2,59	2,44	1,000
2,74	2,59	0,992
2,90	2,74	0,977
3,00	2,85	0,970

3,05	2,90	0,966
3,02	3,05	0,956
3,35	3,20	0,948
3,51	3,35	0,939
3,66	3,51	0,931
3,81	3,66	0,923
3,96	3,81	0,914
4,00	3,85	0,914

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

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

$$EF_4 = \frac{Rr + (WI - 7) \left(\frac{F - F_0}{F_0} \right)}{Rr} \quad (2)$$

R_r = razão de redução = $\frac{F}{P}$

F_0 = tamanho ótimo da alimentação para moinhos de bolas;

$$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{WI}} \quad (3)$$

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

$$EF_5 = \frac{P + 10,3}{1,145 \times P} \quad (4)$$

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

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

$$EF_7 = \frac{R_r - 1,22}{R_r - 1,35} \quad (5)$$

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

A partir da determinação da potência consumida por um moinho de bolas, é realizada a identificação das dimensões desse equipamento através da Tabela 4. Para comprimentos diferentes dos tabelados, a potência consumida varia na proporção direta do comprimento.

Tabela 4 – Características de moinho de bolas

Diâmetro Nominal		Compri. Nominal		Velocidade do Moinho			Potência do Moinho (HP)						Diâmetro (D) interno ao revest.	
							Descarga por overflow % vol. da carga			Descarga por diafragma % vol. da carga				
m	Pés	m	pés	rpm	% Vc	ft/min	35	40	45	35	40	45	m	pés
0,91	3,0	0,91	3,0	38,7	79,9	304	7	7	7	8	8	9	0,76	2,5
1,22	4,0	1,22	4,0	32,4	79,1	356	19	20	21	22	24	25	1,07	3,5
1,52	5,0	1,52	5,0	28,2	78,1	399	42	45	47	49	52	54	1,37	4,5
1,83	6,0	1,83	6,0	25,5	78,0	441	30	85	89	93	99	103	1,68	5,5
2,13	7,0	2,13	7,0	23,2	77,2	474	137	145	151	158	168	175	1,98	6,5
2,44	8,0	2,44	8,0	21,3	76,1	502	215	228	237	249	265	275	2,29	7,5
2,59	8,5	2,59	8,5	20,4	75,3	513	250	266	277	290	308	321	2,44	8,0
2,74	9,0	2,74	9,0	19,7	75,0	528	322	342	356	373	397	413	2,55	8,5
2,89	9,5	2,89	9,5	19,15	75,0	541	367	390	406	425	483	471	2,71	9,0

3,05	10,0	3,05	10,0	18,65	75,0	557	462	481	512	535	570	593	2,89	9,5
3,20	10,5	3,20	10,5	18,15	75,0	570	519	552	575	602	640	607	3,05	10,0
3,35	11,0	3,35	11,0	17,3	72,8	565	610	848	676	708	753	784	3,17	10,4
3,51	11,5	3,51	11,5	16,75	72,2	574	674	718	747	782	832	867	3,32	10,9
3,66	12,0	3,66	12,0	16,3	71,8	584	812	854	900	942	1003	1044	3,47	11,4
3,81	12,5	3,81	12,5	15,95	71,8	596	886	954	993	1040	1106	1152	3,63	11,9
3,96	13,0	3,96	13,0	15,60	71,7	607	1033	1130	1127	1233	1311	1365	3,76	12,4
4,11	13,5	4,11	13,5	15,30	71,7	620	1189	1269	1321	1379	1409	1532	3,93	12,9
4,27	14,0	4,27	14,0	14,8	70,7	623	1375	1464	1527	1595	1699	1771	4,08	13,4
4,47	14,5	4,47	14,5	14,55	70,8	635	1482	1598	1656	1730	1842	1921	4,24	13,9
4,57	15,0	4,57	15,0	14,1	69,8	638	1707	1817	1893	1980	2107	2196	4,39	14,4
4,72	15,5	4,72	15,5	13,85	69,6	648	1838	1956	2037	2132	2234	2363	4,54	14,9
4,88	16,0	4,88	16,0	13,45	68,9	651	2084	2217	2309	2417	2521	2678	4,69	15,4
5,03	16,5	5,03	16,5	13,20	68,7	659	2229	2370	2468	2585	2750	2803	4,85	15,9
5,18	17,0	5,18	17,0	13,0	68,7	670	2505	2764	2883	3010	3206	3344	5,00	16,4

Fonte: CHAVES; PERES (2003).

3.1.1 Tamanho dos Corpos Moedores

Na realização do processo de moagem é necessário identificar, e determinar o tamanho do meio moedor empregado na moagem e as respectivas porcentagens. Esse parâmetro é um dos principais fatores que afetam a eficiência e a capacidade do moinho. O tamanho pode ser calculado usando-se a equação (6) e posteriormente, com os devidos ajustes, se for o caso. A determinação do diâmetro máximo da bola é de grande importância, pois é usual se fazer a reposição periódica do peso dos corpos moedores desgastados, utilizando-se apenas esse tipo de meio moedor. A partir das fórmulas estabelecidas por Rowland, calculam-se os diâmetros máximos dos corpos moedores, pela fórmula a seguir:

Moinho de Bolas:

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{F}{k}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho W i}{\%V_c \sqrt{D}}} \tag{6}$$

Onde:

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

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

WI = índice de trabalho; em kwh/st;

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

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

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

K = fator que depende do tipo de moagem (ver Tabela 5)

Tabela 5 – Valores de K para diversos tipos de moinho e tipos de moagem.

Tipo de Moinho	Valores de K
Moinho de bolas, com descarga por transbordo, a úmido	350

Moinho de bolas, com descarga por grade, a úmido	330
Moinho de barras a seco	335

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

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

Ao se determinar o tamanho máximo do diâmetro da bola, consultam-se as tabelas fornecidas por Bond e determina-se a percentagem em peso de cada diâmetro que vai ser utilizado (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). A Tabela 6 apresenta a carga inicial de bolas.

Tabela 6 – Carga inicial de bolas (% peso)

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

Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010).

4. Resultados

4.1 Moinho de Bolas de Seixos

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

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

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

Cálculo da Energia (equação 1):

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

A determinação dos Fatores modificadores será realizada a seguir:

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

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

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

EF_4 = fator que corrige a alimentação com tamanho excessivo

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

$$F_0 = 4.000 \sqrt{\frac{13}{WI}} = 4.000 \sqrt{\frac{13}{11,7}} = 4.214,26, \text{ como } F < F_0, \text{ sendo } F_0 \text{ tamanho ótimo da}$$

alimentação e $F = 4.000$, então não se usa EF_4 .

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

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

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

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

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

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

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

Conversão de kw para HP: Fator = 1,341

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

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

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

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

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

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

A seguir foi consultada a Tabela 5 e foi selecionado um moinho de 2,44 x 2,44 m, de diâmetro nominal e comprimento nominal, respectivamente, com uma porcentagem de enchimento de 40 % do seu volume, e com potência do motor de 265 HP. Em seguida pode-se calcular EF_3 :

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

Onde D é o diâmetro interno ao revestimento em polegadas.

Então, a potência corrigida por esse fator será:

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

Consultando a Tabela 4, foi possível selecionar um moinho que apresenta o tamanho adequado para atender à potência anteriormente determinada. A Tabela 7 mostra o resumo das características do moinho para a cooperativa selecionado com base na Tabela 4.

Tabela 7– Características do moinho de bolas de seixos selecionado.

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

Fonte: CHAVES; PERES (2003).

Numa outra fase da pesquisa foram realizadas visitas técnicas à unidade de beneficiamento da cooperativa, e coletados dados dos equipamentos, inclusive do moinho de bolas. A Tabela 8 apresenta as informações atuais obtidas das dimensões do moinho da COOMIPEL.

Tabela 8 – Características atuais do moinho de bolas da COOMIPEL.

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

nd: informação não foi possível determinar.

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

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

Ao comparar as informações propostas do dimensionamento do moinho (Tabela 7) com os dados do tamanho do equipamento utilizado no presente momento (Tabela 8), tais como: diâmetro nominal de 1,20 m e comprimento nominal de 2,40 m, observa-se uma diferença entre essas dimensões (D x L). As dimensões do moinho da cooperativa foram determinadas empiricamente, ou foram indicadas sem orientação técnica.

4.1.1 Tamanho Máximo dos Corpos Moedores

A próxima etapa será a determinação dos tamanhos dos corpos moedores. A equação a seguir (6) permite determinar o tamanho máximo da bola a ser empregada:

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

$B_{\text{máx}}$ = diâmetro máximo das bolas em poelagdas; $F = 4.000 \mu\text{m}$ (Granulometria da alimentação do moinho); $W_i = 11,7$ (índice de trabalho, ver Tabela 1); $\rho = 1600$ g/cm³(massa específica do minério); $\%V_c = 76,1$ (velocidade crítica, ver Tabela 7); $D =$

7,5 ft (diâmetro interno ao revestimento da carcaça, ver Tabela 7); $K = 335$ (fator variável com o tipo de moagem, ver tabela 5).

Temos que,

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

O moinho de bolas gera um produto tão fino quanto se queira. Mas para se ter os resultados esperados é importante a utilização de bolas com tamanhos adequados. A Tabela 9 (CHAVES, 2003) mostra os tamanhos máximos de bolas em função da granulometria de alimentação. Observa-se que o tamanho máximo da bola, de 38,0 mm, determinado, é consistente com os valores recomendados na literatura.

Tabela 9 – Tamanho das bolas do moinho e a relação L/D

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

Fonte: CHAVES; PERES (2003).

A partir do tamanho máximo das bolas determinado foram estabelecidos os outros diâmetros dos corpos moedores que compõem a carga inicial da moagem. Com auxílio da Tabela 6 foram definidos os diâmetros e as porcentagens das bolas que serão empregadas no moinho redimensionado. A Tabela 10 apresenta as dimensões sugeridas para o equipamento de moagem.

Tabela 10 – Tamanho e porcentagens das bolas recomendadas para o moinho.

Diâmetro	$\frac{1}{15}''$	1''
%	51	49

5. Conclusões

O desenvolvimento desta pesquisa permitiu compreender o funcionamento do processo de moagem da COOMIPEL, e realizar o redimensionamento do moinho de bolas de seixos. Foi possível identificar que o equipamento apresenta dimensões não compatíveis para produção desejada, onde, se tem o diâmetro nominal de 1,20 m e comprimento de 2,40 m. Esses valores quando comparados ao moinho do manual da Metso, apresenta diferença significativa, e esta diferença, certamente está afetando o rendimento operacional.

Após a realização do estudo, é sugerido para a COOMIPEL-PB substituir o atual equipamento, com o propósito de melhorar a eficiência da produção de feldspato albita. Então, é indicado um moinho de bolas de seixos com a potência do motor elétrico trifásico de 228,0 HP, a moagem será a seco, em circuito fechado. As dimensões do diâmetro nominal e comprimento nominal de 2,44 x 2,44 m, com descarga do material por transbordo, porcentagem de volume de carga de bolas de 40% do volume total, e o tamanho máximo de bolas ($B_{\text{máx}}$) empregadas na realização da moagem é de 38,0 mm.

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

Referências

- ADUSUMILLI, M.S. **Contribuição a Mineralogia dos nióbio-tantalatos da Província Pegmatítica Nordestina**. Belo Horizonte, 254p. Tese para Livre Docência em Mineralogia. UFMG. 1976.
- COELHO, J.M. **Perfil do Feldspato** - Ministério de Minas e Energia – Recife, PE. 2009.
- DA SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A. **A Província Pegmatítica da Borborema-Seridó nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte**. In: **Principais Depósitos Mineraiis do Nordeste Oriental** - Série Geologia. Nº 04. DNPM, Brasília. 2004.
- CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 2ª edição, 425-563p, São Paulo, SP. 2003.
- FERSMAN, A.E. **Les Pegmatites, leur importance scientifique et pratique**. **Academy of Science of URSS** (Traduzido para o francês por R. du Trien de Terdonck e J.Thoureau, Universidade de Louvain, Bélgica). 3 vols. 675p. 1931.
- FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA S. L. M.; LUZ, A. B. **Cominuição**; In: **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, capítulo 4. 2004.
- JAHNS, R. H. **The study of pegmatites**: Economic Geology, 50th Anniver.p.1025-130. 1955.
- JOHNSTON Jr., W. D. **Pegmatitos ambligonita-berilo-tantalíferos do Ceará, Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: DNPM/ Divisão de Fomento da Produção Mineral, (Avulso, 66). 1945.
- LIMA, M.P. **Aspecto da Lavra de Feldspato em Pegmatitos da Província da Borborema**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas – Universidade Federal de Campina Grande – CCT, Campina Grande, PB. 2002.
- LUZ, A.B.; LINS, F.A.F. **Pegmatitos do Nordeste: Diagnósticos sobre o Aproveitamento Racional e Integrado**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ. 2003.
- LUZ, A.B; LINS, F.A.F. **Rochas e Mineraiis industriais**. 2ª edição, 990p, CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, RJ. 2008.
- LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de Minérios** (5ª edição), 960 p, CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, RJ. 2010.
- METSO. **Manual de Britagem**. 6ª Edição. 2005.
- SOARES, D. R. **Contribuição a petrologias de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gamológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado, UFPE, Recife, p.201. 2004.
- WAN, K. W. Feldspar's fallow future. **Industrial Minerals**, London, p. 52-59, Dec. 2008.