



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia de Minas  
Curso de Graduação em Engenharia de Minas

---

**Adriene Gonçalves Lana**

# **PREVISÃO DE ENERGIA ESPECÍFICA DE MOAGEM DE BOLAS EM ESCALA DE BANCADA**

Ouro Preto

2023

# PREVISÃO DE ENERGIA ESPECÍFICA DE MOAGEM DE BOLAS EM ESCALA DE BANCADA

Adriene Gonçalves Lana

Trabalho de conclusão de curso como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 02 de maio de 2023.

Área de concentração: Processamento de minerais

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

Ouro Preto

2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L243p Lana, Adriene Gonçalves.  
Previsão de energia específica de moagem de bolas em escala de bancada. [manuscrito] / Adriene Gonçalves Lana. - 2023.  
43 f.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Moagem. 2. Moinhos e trabalhos em moinhos - Moinho de Bolas. 3. Energia - Consumo. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Adriene Gonçalves Lana**

### **Previsão de energia específica de moagem de bolas em escala de bancada**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas

Aprovada em 02 de (Maio) de 2023

#### Membros da banca

[Doutor] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Mestre] - Marco Aurélio Soares Martins - (CEMI)

[Mestre] - Marcus Vinícius Cunha Lopes - (Leonel Rabelo + Associados)

Dr. Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/05/2023, às 18:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0521570** e o código CRC **3293ADF4**.

*“Se eu consegui enxergar mais longe, foi porque eu estava sobre os ombros de gigantes.”*

**Isaac Newton**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por essa oportunidade e por ter me guiado ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Maria da Conceição Gonçalves Lana e Laércio da Silva Lana, por sempre me incentivarem a fazer o melhor.

Ao meu orientador, Vladimir Kronemberger Alves por todos os ensinamentos e orientações, contribuindo significativamente nos conhecimentos adquiridos.

À UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, principalmente ao Departamento de Engenharia de Minas, pelo ensino de qualidade.

Aos meus colegas de curso, Paulo Henrique Magalhães Silva e Mateus dos Anjos Silva, por todo apoio no laboratório.

Aos técnicos do Laboratório, Mariana Andrade e Antônio Pedro, por contribuírem e darem suporte técnico ao meu trabalho.

## RESUMO

O objetivo do presente trabalho é prever o consumo de energia de um moinho industrial, através de ensaios em moinho de bancada. Foi realizada uma amostragem em um circuito industrial da região de Mariana. A amostra colhida foi utilizada para os ensaios de moagem, que foram realizados em um moinho de bolas, conforme a figura 6 deste trabalho. A metodologia consiste em um procedimento para testes de moagem em diferentes tempos e condições, se trata de uma aplicação prática e que pode ser facilmente reproduzida em laboratórios de tratamento de minério. Para cada ensaio, a amostra foi homogeneizada sobre lona e quarteada em um quarteador do tipo Jones. A cada tempo de moagem, gerou-se uma porcentagem retida na peneira de malha 0,150mm. Os resultados obtidos, ainda podem ser melhorados, pois se atingiu 82% de aderência entre a potência demandada em laboratório e a potência requerida industrialmente. Para ter uma melhor acurácia e buscar atingir uma boa precisão nos resultados, é recomendado realizar um número maior de ensaios em diferentes condições, logo após, realizar uma análise estatística dos resultados.

**Palavras-chave:** Moinho; Consumo de Energia.

## ABSTRACT

The objective of the present work is to predict the energy consumption of an industrial mill, through tests in bench mill. A sampling was carried out in an industrial circuit of the Mariana region. The collected sample was used for the grinding tests, which were carried out in a ball mill, according to figure 6 of this work. The methodology consists of a procedure for grinding tests at different times and conditions, it is a practical application and can be easily reproduced in ore treatment laboratories. For each assay, the sample was homogenized on canvas and quartered in a Jones-type quarterator. At each grinding time, a percentage retained in the 0.150mm mesh sieve was generated. The results obtained can still be improved, since 82% of adhesion was reached between the power demanded in the laboratory and the power required industrially. To have a better accuracy and seek to achieve a good accuracy in the results, it is recommended to perform a greater number of tests in different conditions, soon after, performing a statistical analysis of the results.

**Keywords:** Mill; Power Consumption.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Moinho de Bolas .....	5
Figura 2 - Condições para a moagem via úmido.....	14
Figura 3 – Fluxograma do preparo e separação das amostras .....	16
Figura 4 - Quarteador do tipo carrossel.....	17
Figura 5 - Lona de homogeneização e quarteador do tipo Jones .....	18
Figura 6 - Construção de uma sequência de camadas de cargas de bolas, minério e água, no interior do moinho.....	19
Figura 7 - Fluxograma do procedimento de moagem.....	20
Figura 8 - Peneiramento via úmido .....	21
Figura 9 - Curva granulométrica dos peneiramentos nos tempos de 2,5 min, 5,0 min e 10,0 min .....	23
Figura 10 - Potência de laboratório adquirida.....	24
Figura 11 - Energia específica industrial e distribuição granulométrica.....	25

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 – % retida na peneira de 0,150 mm nos tempos especificados .....	22
---	----

## LISTA DE SIGLAS

D (m) - Diâmetro em metros do moinho de laboratório

L (m) - Largura em metros do moinho de laboratório

%VC - Porcentagem da velocidade crítica do moinho

RPM - Rotações por minuto

%SOL - Porcentagem de sólidos

KWh/ton curta - Quilowatt-hora por tonelada curta

kWh/t - Quilowatt-hora por tonelada

# - Unidade de medida em mesh

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>Moinhos de bolas</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2</b>	<b>Determinação da potência de moinhos</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Equação de potência do moinho de laboratório</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Equação de potência do moinho industrial</b> .....	<b>6</b>
<b>3.3</b>	<b>As teorias empíricas da cominuição</b> .....	<b>7</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Primeira teoria empírica da fragmentação</b> .....	<b>8</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Segunda teoria empírica da fragmentação</b> .....	<b>8</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Terceira teoria empírica da fragmentação</b> .....	<b>9</b>
<b>3.4</b>	<b>Dimensionamento de moinhos</b> .....	<b>10</b>
<b>3.5</b>	<b>Método de Donda</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>13</b>
<b>4.1</b>	<b>Condições de moagem</b> .....	<b>13</b>
<b>4.2</b>	<b>Preparo e separação das amostras</b> .....	<b>15</b>

<b>4.3</b>	<b>Procedimentos pré-moagem .....</b>	<b>18</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensaio de moagem .....</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>Peneiramentos pós-moagem .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise dos dados .....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fragmentação (cominuição), consiste na redução de partículas de determinados tamanhos, para uma granulometria específica, tem grande importância para a liberação do mineral minério e para as fases de concentração, devido ao fato de que mesmo em tamanhos menores, alguns tipos de materiais contêm associações em suas partículas, com espécies minerais não desejadas. (VASCONCELOS, JESUS E SANTOS, 2021; MAIA, 2022).

Cada vez mais, os teores do minério de ferro estão diminuindo, devido as ocorrências de associações entre partículas minerais / ganga, portanto, é preciso reduzir ainda mais a granulometria do material, para o melhor aproveitamento do bem mineral (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010). Além disso, existe a necessidade de diminuir os custos com o consumo energético na moagem (VASCONCELOS, JESUS E SANTOS, 2021; MAIA, 2022).

A partir desse argumento, faz-se necessária a formulação de novas metodologias de moagem, que objetivam aproximar a potência requerida em laboratório da potência esperada em moinhos industriais.

Segundo Alves (2006), a energia requerida no processo de moagem é bastante elevada em todas as técnicas de fragmentação usadas atualmente, o que representa um grande custo para o processo de extração. Portanto, é necessário investir em pesquisas e desenvolvimento de novas abordagens que possam melhorar a eficiência da moagem.

Nos próximos capítulos do presente trabalho, será abordada a aplicação de uma metodologia em escala de bancada. Foi realizada uma breve revisão bibliográfica

para o entendimento dos estudos já feitos por profissionais da área de pesquisa. Primeiramente, é descrito o que é um moinho de bolas e qual a sua performance quando aplicado na moagem de minério de ferro. Em seguida, foram apresentadas as teorias empíricas da moagem. Posteriormente, são descritas as equações de potência industrial e de laboratório. A equação de potência de laboratório foi utilizada neste estudo para estimar o percentual retido na peneira de 0,150 mm, obtida industrialmente, utilizando a mesma amostra coletada na alimentação do moinho.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo do presente projeto é prever o consumo energético de moinhos industriais por meio de ensaios de bancada.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar a meta geral deste trabalho, alguns objetivos específicos são mencionados abaixo:

- a) Discorrer sobre o método de Donda e comparar a eficiência de ambos os métodos;
- b) Definir o que é o moinho de bolas no contexto da moagem de minério de ferro;
- c) Descrever as duas equações de potência, industrial e de laboratório e quais são as suas aplicações;
- d) Mostrar as principais teorias empíricas e quais as suas contribuições na evolução dos métodos de moagem;
- e) Apresentar os resultados desta metodologia, afim de mostrar como ela impacta no dimensionamento de moinhos;



### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para atingir os objetivos específicos, foi feita uma pesquisa na literatura, dos temas que abordam sobre a moagem do minério de ferro em moinhos de bolas.

#### **3.1 Moinhos de bolas**

A cominuição do minério é executada pelo processo dinâmico dos corpos moedores encontrados no interior dos moinhos tubulares (BERALDO,1987). A extensa faixa de relações comprimento/ diâmetro é levada em consideração na fabricação dos moinhos de bolas (BERALDO,1987).

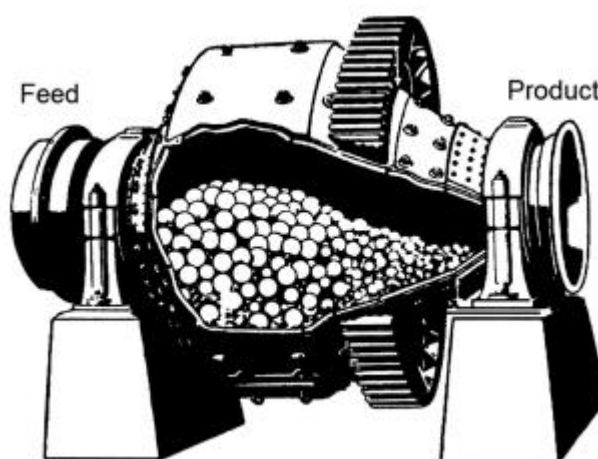
Conforme Weiss (1985), moinho de bolas é constituído por tambores com revestimentos, que giram em torno de um eixo horizontal. Existem moinhos com formatos cilíndricos e, em alguns casos, são cilindros modificados, possuindo uma ou as duas extremidades em seções cônicas (WEISS, 1985).

Em instalações de apenas um estágio, os moinhos de bolas são utilizados como moinhos primários, mas também podem ser utilizados na (re)moagem dos produtos das usinas de beneficiamento (BERALDO,1987; ROSA, 2019).

De acordo com Gomes (2014), Oliveira (2012), Souza, Assis e Alves (2019) as variáveis fundamentais para os moinhos são: o comprimento, diâmetro, velocidade de rotação, grau de enchimento, a porcentagem de sólidos presentes na polpa alimentada e a potência requerida. O grau de enchimento e a velocidade de rotação desempenham uma influência no movimento da carga no interior do moinho (GOMES, 2014; OLIVEIRA, 2012; SOUZA, ASSIS E ALVES, 2019).

Segundo o manual de britagem da FAÇO (Fábrica de Aço Paulista) (1985), as operações de moagem em moinhos de bolas devem iniciar-se com as cargas de bolas escalonadas, ou seja, com bolas de tamanhos abaixo da dimensão máxima da bola aferida no dimensionamento.

Figura 1 - Moinho de Bolas



Fonte: Wills, B. A.; Finch, J. A, (2016)

## 3.2 Determinação da potência de moinhos

De acordo com Alves (2006), é importante que se tenha conhecimento da energia consumida pelo moinho, para o posterior dimensionamento. Portanto, são apresentadas abaixo as equações que descrevem os cálculos de potência mais usuais.

### 3.2.1 Equação de potência do moinho de laboratório

Conforme Rowland (1986) *apud* Silva (2019), para moinhos de pequeno porte, foi desenvolvido um modelo de cálculo para prever o consumo energético, como descrita na equação 1.

$$KWb = 6,3 D^{0,3} \sin \left[ 51 - 22 \left( \frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right] (3,2 - 3Vp) Cs \left[ 1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 Cs)}} \right] \quad (1)$$

Onde:

KWb = potência no eixo do pinhão por toneladas de bolas (KW);

D = diâmetro do moinho medido internamente ao revestimento (m);

Vp = fração do volume que as bolas ocupam no moinho;

Cs = fração da velocidade crítica;

sin = função de cálculo de seno.

### 3.2.2 Equação de potência do moinho industrial

A seguir, tem-se a equação 2 que possibilita o cálculo da potência consumida pelo moinho em escala industrial, formulada por Bond (1960) *apud* Alves (2006):

$$KW = 7,33 A J \varphi_c (1 - 0,937 J) \left( 1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 \varphi_c)}} \right) \rho_b L D^{2,3} \quad (2)$$

Onde:

A = 1, em caso de moagem via úmida em moinho do tipo *over flow*;

$A = 1,16$ , se for a moagem via úmida contendo uma grelha;

$A = 1,08$ , em caso de moagem a seco;

$D$  = diâmetro medido do moinho (m);

$L$  = comprimento medido do moinho (m);

$J$  = fração da carga de enchimento no interior do moinho;

$\varphi_c$  = fração da velocidade crítica;

Equação de Rowland (1969) *apud* Alves (2006):

$$KW/t \text{ bolas} = 4,879D^{0,3} (3,2 - 3J)\varphi_c \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10\varphi_c)}}\right) + S \quad (3)$$

Onde:

$$S = 1,102 \left(\frac{b - 12,5 D}{50,8}\right);$$

$b$  = dimensão da bola de reposição, expressa em polegadas;

### 3.3 As teorias empíricas da cominuição

Conforme Alves (2006), durante a metade do século XIX, houve uma demanda por estabelecer condições operacionais padronizadas para equipamentos de moagem, devido ao aumento na produção de minerais. Vários grupos de pesquisadores dedicaram muitos esforços à formulação e verificação empírica de relações matemáticas que pudessem descrever os diferentes mecanismos de quebra que acontecem em moinhos de bolas (ALVES, 2006).

Para Bond (1952), uma teoria sólida deve apresentar resultados consistentes ao ser aplicada em diferentes operações de redução de tamanho, levando em conta as características específicas dos materiais, máquinas e faixas de tamanho envolvidas. É importante que a teoria permita corrigir as diferenças entre esses elementos e selecionar a operação mais eficiente em termos mecânicos (BOND, 1952). A teoria deve ser respaldada por uma grande quantidade de dados operacionais em diversos materiais, correlacionados com testes de laboratório nos mesmos materiais (BOND, 1952).

### 3.3.1 Primeira teoria empírica da fragmentação

A mais antiga das teorias sobre cominuição, criada por von Rittinger em 1867, descrita pela equação 4, que indica que a energia gasta durante esse processo é diretamente proporcional à área superficial gerada. É importante notar que a superfície específica dos materiais granulares é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas (BERALDO, 1987; ROSA, 2019).

$$E = K(S_1 - S_0) \quad (4)$$

Onde:

E = energia requerida;

K = fator de proporcionalidade;

S1 = área do produto;

S0 = área inicial;

### 3.3.2 Segunda teoria empírica da fragmentação

Criada em 1885, a Lei de Kick, representada na equação 5, estipula que a quantidade de energia usada durante o processo de cominuição é dependente apenas da relação de redução e não é afetada pela granulometria inicial das partículas (BERALDO, 1987).

$$E_k = C_k(\ln X_1/X_2) \quad (5)$$

Onde:

$E_k$  = energia específica para um determinado material;

$C_k$  = constante;

$X_1$  =diâmetro inicial;

$X_2$  =diâmetro final;

### 3.3.3 Terceira teoria empírica da fragmentação

A Lei de Bond, uma teoria empírica, foi desenvolvida em 1952 após uma série de testes em laboratório e correlações industriais (BERALDO, 1987). Bond tentou fundamentá-la teoricamente ao propor que a energia utilizada na cominuição é proporcional ao comprimento das fissuras iniciais que surgem durante a fratura (BERALDO, 1987). Ele também introduziu o conceito de Work-Index, que representa a energia necessária para reduzir um material de um diâmetro teoricamente infinito para uma granulometria em que 80% das partículas passam por uma peneira com abertura de 100 microns (BERALDO, 1987).

É importante considerar que a energia consumida durante a moagem é uma fração muito pequena do trabalho útil realizado pelos equipamentos de cominuição (BERALDO, 1987; MAIA, 2022). A maior parte da energia é perdida no processo, o

que limita a aplicabilidade das chamadas leis de cominuição (BERALDO, 1987). No entanto, para equipamentos semelhantes em condições semelhantes, essas leis ainda podem ter alguma utilidade, como é o caso da Lei de Bond para moinhos de barras e bolas (BERALDO, 1987).

A lei de Bond é expressa pela equação 6:

$$W = WI \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (6)$$

Onde:

W = energia aplicada (KWh/ton curta);

WI = índice de trabalho (*Work-index*) em KWh/ton curta;

P = diâmetro em microns da abertura da peneira com o passante de 80% da massa do produto;

F= diâmetro em microns da abertura da peneira com o passante de 80% da massa da alimentação;

### 3.4 Dimensionamento de moinhos

Quanto maior for a aderência entre a energia gasta industrialmente e a energia de consumo prevista em laboratório, maior as chances de não incorrer em erros no dimensionamento dos equipamentos de moagem, ou seja, evita-se o sobre dimensionamento ou o sub dimensionamento.

Segundo Beraldo (1987), os fatores de Rowland são baseados em observações práticas de moinhos industriais e foram obtidos através de regressões. Eles são considerados válidos nas condições em que foram estudados, mas podem não ser precisos em outras condições.

Rowland desenvolveu 8 fatores de ajuste da equação de Bond. Os fatores de Rowland são aplicáveis a diferentes tipos de moinhos, como moinhos de bolas em circuito aberto ou fechado, e moinhos de barras em circuito aberto (BERALDO, 1987).

Para o dimensionamento, é preciso definir alguns fatores de eficiência que são multiplicados à potência  $W$  para condições diferentes, são conhecidos como fatores de Rowland, que não serão abordados detalhadamente neste trabalho.

### **3.5 Método de Donda**

Donda (1999) *apud* Silva (2022), realizou pesquisas em uma metodologia que estava em estudo desde 1995 para prever o consumo específico de energia para moagem. O objetivo de Donda era desenvolver um teste simples e rápido que exigisse pequenas quantidades de amostras para permitir estudos geometalúrgicos. O método desenvolvido produziu resultados com baixa variação média em comparação com os resultados industriais, com variações entre 2 e 10%, demonstrando boa precisão (DONDA *et al.*, 1999 *apud* SILVA, 2022).

Como citado por Silva (2022), de maneira empírica, a partir da obtenção das curvas granulométricas, é possível determinar a energia específica necessária para reduzir o tamanho dos minérios do Quadrilátero Ferrífero no eixo do pinhão de um moinho de bolas. Segundo Donda e Rosa (2014) *apud* Silva (2022), essa energia específica pode ser expressa da seguinte forma:



$$R_p = R_f e^{-KE} \quad (7)$$

Onde:

E = A energia requerida para a moagem em moinhos tubulares com acionamento no eixo do pinhão em kWh/t;

K = Característica do minério que é usada como parâmetro;

R<sub>f</sub> = Percentual de partículas que são retidas na malha da alimentação do circuito;

R<sub>p</sub> = Percentual de partículas que são retidas na malha do produto do circuito;

De acordo com Silva (2022) K é uma característica do minério, que é usada como parâmetro e depende das condições de moagem. Esse parâmetro é comumente referido como "K de Donda".

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Esta pesquisa apresenta o procedimento para a realização de ensaios de moagem, em diferentes tempos e uma condição padrão (mais próxima possível da condição operacional do moinho industrial que se deseja prever o consumo energético), visando o aumento da área superficial do minério e, principalmente, uma melhor aderência entre a potência de laboratório e a potência industrial.

A metodologia utilizou o mesmo procedimento proposto por Donda (Donda, 2003), alterando-se as condições de operação do moinho, apresentando uma aplicação prática e que pode ser reproduzida em laboratórios.

Tanto nos testes industriais quanto nos ensaios laboratoriais, foram utilizadas amostras de itabirito. Foi feita uma amostragem no circuito industrial de uma usina da região de Mariana.

### **4.1 Condições de moagem**

Buscou-se utilizar as mesmas condições operacionais do moinho industrial, exceto o diâmetro das bolas, no circuito industrial, o moinho estava operando com uma bola de reposição de diâmetro de 63,4 mm.

Na figura 2 estão apresentadas as condições estabelecidas para os ensaios.

Figura 2 - Condições para a moagem via úmido

VKA Moabilidade					
D (m)	0,25	Volume (m3)	0,013	U (polpa)	1,07
L (m)	0,25	<b>kWb</b>	<b>Net w</b>	Dens. Minério (t/m3)	3,79
% VC	76,0	4,03	<b>53,0</b>	Dens. Bola (t/m3)	7,75
GE	22,0	<b>RPM</b>	<b>67</b>	% SÓL	79,3
carga de bolas kg	13,166	<b>Net Torque (Nm)</b>	<b>7,55</b>	Diâmetro Bola (mm)	25,4
massa minério g	1387	água L	0,361		
massa polpa g	1748	Densidade Polpa	2,404		

Fonte: Planilha VKA Moabilidade

A representação de cada termo da figura 2 estão descritos abaixo:

D (m) - Diâmetro em metros do moinho de laboratório;

L (m) – Comprimento em metros do moinho de laboratório;

%VC - Porcentagem da velocidade crítica do moinho;

GE - Grau de enchimento de bolas;

RPM - Rotações por minuto;

kWb - Potência no eixo do pinhão por toneladas de bolas (kW);

Net Torque (Nm) - Torque aplicado no eixo do pinhão (Nm);

U (polpa) - % de ocupação de espaços vazios entre as bolas pela polpa de minério;

%SOL - = Porcentagem de sólidos;

#### **4.2 Preparo e separação das amostras**

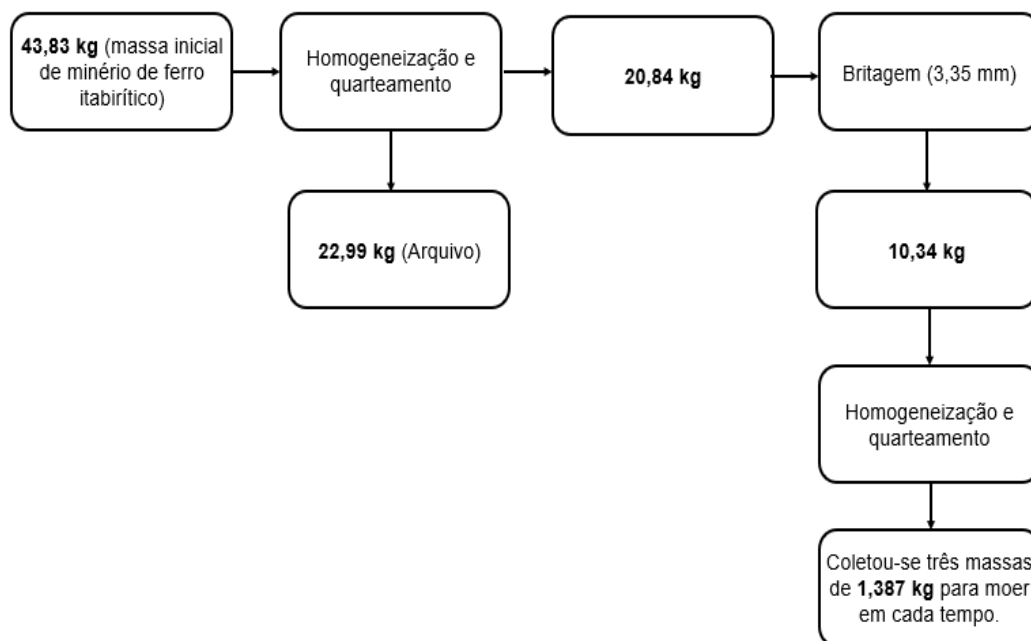
Para que se tenha uma confiabilidade nos ensaios, é preciso que a amostra seja representativa (SAMPAIO, FRANÇA E BRAGA, 2007) e, para isso, algumas técnicas de amostragem foram utilizadas para garantir que as amostras representassem a sua totalidade.

Utilizando uma amostra de minério itabirítico coletada na alimentação de um circuito de moagem industrial, foi realizada uma homogeneização sobre lona e um quarteamento no quarteador do tipo carrossel, conforme a figura 4, em seguida, foi separada uma massa de 20,84 kg da amostra de minério de massa inicial de 43,83 kg, a partir dos incrementos gerados.

A amostra de 20,84 kg, foi homogeneizada sobre a lona, conforme a imagem (a) da figura 5 e quarteadas no quarteador do tipo Jones, que está representado na imagem (b) da figura 5. Após quarteada, separou-se uma quantidade de 10,34 kg para a realização de todos os testes de moagem. Essa amostra foi britada abaixo de 3,35mm.

Foi obtida 1,387 kg de material para cada um dos quatro ensaios, da seguinte maneira, a amostra de 10,34 kg foi homogeneizada sobre uma lona e em seguida foi quarteada em um quarteador do tipo Jones. A amostra restante foi arquivada. O fluxograma do procedimento está representado na figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do preparo e separação das amostras



Fonte: Autora

Figura 4 - Quarteador do tipo carrossel



Fonte: Autora

Figura 5 - Lona de homogeneização e quarteador do tipo Jones



Fonte: Autora

### 4.3 Procedimentos pré-moagem

Para Sampaio, França e Braga (2007), a homogeneização sobre a lona consiste em se passar alternadamente as pontas da lona para a sua diagonal, até que se tenha um material completamente homogeneizado, depois, divide-se a pilha em quatro partes e retira-se os dois incrementos transversais para posterior quarteamento.

De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), o quarteamento no quarteador Jones é feito de forma contínua e lenta, a fim de evitar o entupimento das calhas. Para que se tenha as quantidades necessária para os ensaios, é preciso repetir as operações com o material contido nos recipientes coletores.

A quantidade de 13,166 kg de cargas de bolas de 1 polegada (25,4 mm), foi pesada para a realização dos ensaios. A quantidade de água que foi adicionada ao minério, foi de 0,361 L (361 mL) conforme descrito na figura 2. Inseriu essa quantidade

em uma proveta graduada, com o auxílio de uma pisseta e pesou-se em uma balança de precisão, cujo a unidade de medida é dada em gramas.

Foi realizado um ajuste na rotação do moinho, para que ele alcançasse o valor de 69 RPM. O moinho utilizado foi o apresentado na figura 6.

Donda (2003) sugere ir construindo uma sequência de camadas de cargas de bolas, minério e água, no interior do moinho. O procedimento de construção de camadas alternadas é visto na figura 6.

Figura 6 - Construção de uma sequência de camadas de cargas de bolas, minério e água, no interior do moinho



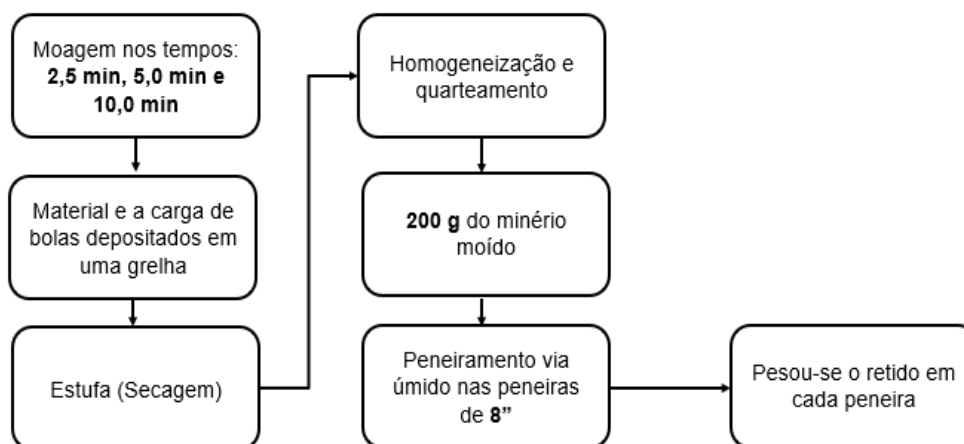
Fonte: Autora



#### 4.4 Ensaios de moagem

Na figura 7, tem-se o fluxograma do procedimento de moagem.

Figura 7 - Fluxograma do procedimento de moagem



Fonte: Autora

Para a realização dos ensaios de bancada, foram determinados 3 tempos de moagem, 2,5 min, 5,0 min e 10 min. Após cada moagem, o material com a carga de bolas e a polpa de minério foram depositados em uma grelha. A secagem do material foi realizada em uma estufa. Posteriormente, a amostra foi homogeneizada sobre a lona, quarteada no quarteador Jones e após esse processo, coletou-se aproximadamente 200 g de minério moído, que foram transferidos para as peneiras circulares de (8") e de malhas de 6#, 8#, 10#,14#, 20#, 28#, 35#, 48#, 65#, 100#, 150#, 200#, 270# e 400#, com o auxílio de uma calha, onde foi feito o peneiramento a úmido, conforme é mostrado na figura 8.

Figura 8 - Peneiramento via úmido



Fonte: Autora

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Peneiramentos pós-moagem

Peneirou-se o material em peneiras circulares e seguindo a razão entre as peneiras  $\sqrt{2}$ . A massa utilizada para realização do peneiramento da alimentação foi de 200g. O peneiramento foi feito via úmido e a porcentagem retida na malha de 100# (0,150 mm) na amostra inicial (alimentação do moinho de bancada) foi de 54,16 e para os demais tempos, conforme descritos na tabela 1.

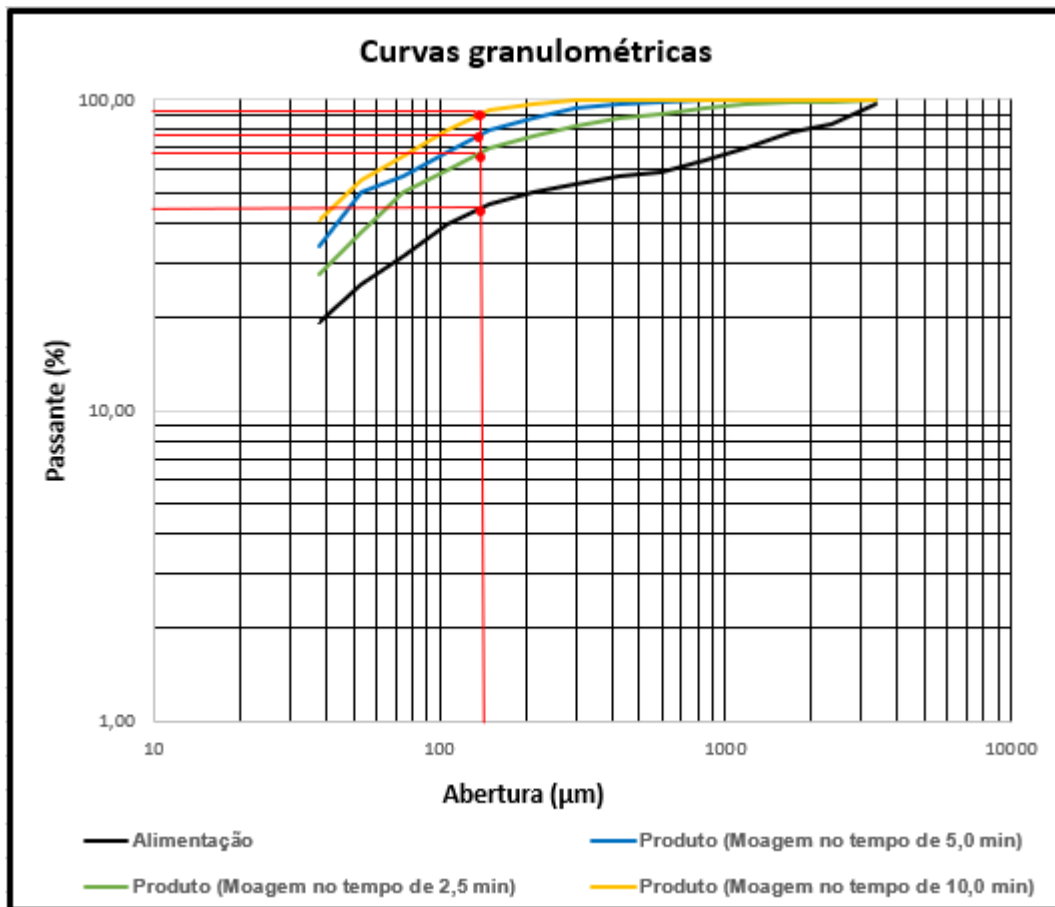
Tabela 1 – % retida na peneira de 0,150 mm nos tempos especificados

<b>Tempo (min)</b>	<b>% de retido na peneira de 0,150 mm em cada tempo</b>
0,0	54,16
2,5	30,41
5,0	20,48
10,0	7,54

Fonte: Autora

A figura 9 representa a curva da distribuição granulométrica, para os diferentes tempos de moagem.

Figura 9 - Curvas granulométricas dos peneiramentos nos tempos de 2,5 min, 5,0 min e 10,0 min



Fonte: Autora

## 5.2 Análise dos dados

Conforme observada na figura 10, a meta da porcentagem retida na malha de 0,150 mm é de 7,95 (obtida industrialmente). Na figura 10, tem-se o tempo necessário para atingir os 7,95% e em seguida a potência específica necessária.

A potência consumida no moinho de bolas em escala laboratorial foi de 6,14 kWh/t, de acordo com a figura 10.

Figura 10 - Potência de laboratório adquirida

%ret. 0,149 mm	tempo min	kWh/t		Meta	kWh/t
54,16	0,00	0,00	% retida em 0,149 desejada	7,95	6,14
30,41	2,50	1,59			
20,48	5,00	3,19			
7,54	10,00	6,37			
		0,00			
		0,00			
		0,00			
		0,00			

Fonte: Planilha VKA Moabilidade

A potência requerida para o moinho de bolas em escala industrial foi de 5,04 kWh/t, como é descrita na figura 11.



## **6 CONCLUSÃO**

A metodologia se mostrou satisfatória em termos de previsão do consumo energético, chegando a 82% de aderência entre a potência demandada em laboratório e a potência requerida industrialmente.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para alcançar uma melhor acurácia e buscar atingir uma boa precisão nos resultados, é recomendado realizar um número maior de ensaios em diferentes condições e realizar uma análise estatística dos resultados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. K. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. 122 p.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1987. 64 p.

BOND, F. C. **The Third Theory of Comminution.** Transactions AIME, v. 193, p. 484-494, maio, 1952.

DONDA, J. D. **Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas.** Dissertação. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

GOMES, W. L.; DELBONI, H.; JATOBÁ, T. L. A.; EL HAJJ, T. M. **Método para simulação de moagem em moinho de bolas.** Holos, v. 3, p. 133-140, 2014. Disponível em:  
<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/3948>. Acesso em: 22 fev. 2023.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de minérios.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932 p.

MAIA, Alair Corrêa. **Determinação da função quebra de minério em diferentes condições operacionais em escala de laboratório.** 2022. 63 p

OLIVEIRA, Renata de Freitas. **Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas.** 2012. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9CAG47>. Acesso em: 27 mar. 2023.

ROSA, Andreia Carolina. **Método para estimativa do consumo específico de energia de itabiritos em moinhos de remoagem a seco.** 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Ed.); BRAGA, P. F. A. (Ed). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570p.

SILVA, Daniel Henrique Cordeiro; ALVES, Vladimir Kronemberger; SAVIO, Ernandes. **Redes neurais artificiais aplicadas à moagem de minério de ferro combinadas a modelos empíricos.** Research, Society and Development, v. 11, n. 13, p. e84111332329-e84111332329, 2022.

SILVA, Jonathan Felipe de Lima. **Efeito dos parâmetros de processo na potência de moinhos verticais.** 2019. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/31513>. Acesso em: 27 mar. 2023.

SOUZA, Tamíres Fonseca de; ASSIS, Tairony Ferreira de; ALVES, João Victor da Silva. **Estudo das variáveis do moinho de bolas do laboratório de tratamento de minérios da unidade Araxá.** In: 15ª Semana de Ciência & Tecnologia 2019-CEFET-MG. 2019.

VASCONCELOS, João Antônio; JESUS, Renata Gomes de; SANTOS, Yolacir Carlos de Souza. **Panorama do consumo energético na produção brasileira de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero.** Latin American Journal of Energy Research, v. 8, n. 2, p. 37-48, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufjf.br/index.php/LAJER/article/view/32839>. Acesso em: 23 mar. 2023.

WEISS, Norman L. **SME Mineral Processing Handbook**, Vol. 1. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., United States of America, 1985, p. 26-44.

WILLS, B.A., FINCH, J.A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** 8th Edition. Elsevier, 2016, p.158.