



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



CAMILLA KIEMY NAKAGAWA FONSECA

SIMULAÇÃO DE VERTIMILL

OURO PRETO

2022

CAMILLA KIEMY NAKAGAWA FONSECA

SIMULAÇÃO DE VERTIMILL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F676s Fonseca, Camilla Kiemy Nakagawa.
Simulação de VertiMill. [manuscrito] / Camilla Kiemy Nakagawa
Fonseca. - 2022.
38 f.: il.: color., gráf., tab..

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. Moinho de bolas. 3.
Moinho vertical. 4. Usina de cobre. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

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



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 07 dias do mês de janeiro de 2022, às 10h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Camilla Kiemy Nakagawa Fonseca** matrícula 16.1.1341, intitulado: **“SIMULAÇÃO DE VERTIMIL”**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves, M.Sc. Marco Aurelio Soares Martins e M.Sc. Jacinto Tchipa Daniel Cumena. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas à candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro, o M.Sc. Marco Aurelio Soares Martins, segundo o M.Sc. Jacinto Tchipa Daniel Cumena e, em último, Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi aprovada por unanimidade, com a nota 9,5. A discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 (quinze) dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão.

Ouro Preto, 07 de janeiro de 2022.

Presidente: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

Membro: M.Sc. Marco Aurelio Soares Martins

Membro: M.Sc. Jacinto Tchipa Daniel Cumena

Discente: Camilla Kiemy Nakagawa Fonseca

À minha avó, Luiza, e à minha mãe,
Jacqueline. Meu porto seguro e o meu
maior amor do mundo. Sem vocês,
nada disso teria sido possível. Amo
vocês.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus por guiar meus passos, por todo o cuidado, bênçãos e proteção.

À Jacqueline e Rodrigo, meus pais, agradeço pelo suporte, pela dedicação e por todo o apoio.

Aos meus irmãos Vinícius e Gabriel, e ao meu padrasto Ricardo, pelo apoio incondicional, carinho e amizade.

Ao meu orientador Vladimir Kronemberger Alves, pelo incentivo, disposição e auxílio necessários para a elaboração deste estudo.

Aos meus amigos e amigas, pelo apoio, conforto, sorrisos, ensinamentos e por serem minha família em vários momentos.

Aos meus colegas do trabalho e aos meus amigos do estágio, por toda instrução, apoio e amizade.

Ao Projeto Cantaria, pelo acolhimento, ensinamentos e por me fazer sentir em casa.

À Fundação Gorceix, pelo apoio financeiro e cursos profissionalizantes.

À Universidade Federal de Ouro Preto, em especial aos professores do Departamento, pelo aprendizado e convivência;

RESUMO

Circuitos de moagem industrial têm sido estudados com a finalidade de reduzir o consumo energético desse processo. Para isso, novas aplicações dos moinhos disponíveis no mercado ganharam espaço nas usinas de todo o mundo. O moinho *Vertimill*, comumente conhecido como moinho de bolas vertical vem se sobressaindo em relação ao moinho de bolas convencional, devido a sua maior eficiência e economia de energia. O presente trabalho propõe uma simulação industrial de moinho *Vertimill*. A partir de dados laboratoriais de moinho de bolas convencional, foi feito o levantamento de parâmetros de função seleção e função quebra utilizando a planilha *Ball Parameters Batch Mill Multicomponentes* do software *Moly-Cop Tools*. Foi levado em consideração o fator de escalonamento k , que é responsável pela maior eficiência do moinho *Vertimill* comparado ao moinho de bolas convencional. Posteriormente, utilizou esses parâmetros e dados de uma usina de cobre localizada na região Norte do Brasil para simular o circuito industrial. Ao final comparou-se a simulação com os dados reais da usina e concluiu-se que o modelo de simulação utilizado se ajustou perfeitamente aos dados comparados.

Palavras-chave: Moagem; Moinho *Vertimill*; Função seleção; Função quebra; Simulação industrial.

ABSTRACT

Industrial grinding circuits have been studied in order to reduce the energy consumption of this process. For this, new applications of the mills available on the market have gained ground in mills all over the world. The Vertimill mill, commonly known as vertical ball mill, has been standing out over the conventional ball mill due to its greater efficiency and energy saving. The present work proposes an industrial simulation of a Vertimill mill. From laboratory data from conventional ball mills, selection and break function parameters were surveyed using the Ball Parameters Batch Mill Multicomponent spreadsheet of the Moly-Cop Tools software. The scaling factor k , which is responsible for the higher efficiency of the Vertimill mill compared to the conventional ball mill, was taken into account. Later, it used these parameters and data from a copper plant located in the North of Brazil to simulate the industrial circuit. At the end, the simulation was compared with the real data from the plant and it was concluded that the simulation model used fits perfectly to the compared data.

Keywords: Milling; *Vertimill* Mill; Selection function; Break function; Industrial simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Moinho vertical ou moinho de torre (Tower Mill)..... | 15 |
| Figura 2: Principais componentes do moinho Vertimil | 16 |
| Figura 3: Representação esquemática dos Eventos de Fragmentação e Distribuição de Fragmentos, para um instante Δt em um moinho | 21 |
| Figura 4 – Função quebra acumulada versus tamanho para três frações diferentes | 25 |
| Figura 5 – Função quebra acumulada versus tamanho relativo da partícula. Ensaio de moagem em batelada com três monotamanhos diferentes | 26 |
| Figura 6: Representação esquemática do comportamento da equação 10 em função de seus parâmetro | 27 |
| Figura 7: Moinho de bolas utilizado na tese de doutorado de Douglas Mazzinghy | 29 |
| Figura 8: Condições laboratoriais inseridas na planilha do Moly-Cop Tools | 31 |
| Figura 9: Curva granulométrica de todos os testes inseridas na planilha do <i>Moly-Cop Tools</i> .32 | |
| Figura 10: Inserção de dados para a simulação industrial na planilha do <i>Moly-Cop Tools</i> adaptada pelo autor | 34 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1: Distribuição granulométrica da descarga do moinho na simulação (Simulado) e na usina (Medido) | 37 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Expressões matemáticas das leis de cominuição | 18 |
| Tabela 2: Condições dos ensaios em escala de laboratório com moinho de bolas | 30 |
| Tabela 3: Curvas granulométricas da amostra de Minério de Cobre em diferentes intervalos de tempo | 32 |
| Tabela 4: Alimentação do moinho de uma usina de cobre da região Norte do Brasil | 33 |
| Tabela 5: Valores de função seleção e quebra | 35 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. OBJETIVO GERAL..... | 11 |
| 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 3.1 MOINHO VERTICAL | 12 |
| 3.2 MOINHO DE BOLAS TUBULAR X VERTIMIL..... | 13 |
| 3.3 AS 3 LEIS DE COMINUIÇÃO..... | 15 |
| 3.4 MODELO DE BALANÇO POPULACIONAL | 16 |
| 3.5 SOLUÇÃO DE REID | 19 |
| 3.6 SOLUÇÃO DE HERBST E FUERSTENAU | 20 |
| 3.7 FUNÇÃO QUEBRA..... | 21 |
| 3.8 FUNÇÃO SELEÇÃO | 23 |
| 3.8.1 Fator k de escalonamento do moinho vertical..... | 24 |
| 4. METODOLOGIA | 26 |
| 4.1 TESTES LABORATORIAIS | 26 |
| 4.1.1 Condições laboratoriais | 27 |
| 4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FUNÇÃO SELEÇÃO E FUNÇÃO QUEBRA..... | 27 |
| 4.2.1 Condições laboratoriais | 27 |
| 4.3 ESCALONAMENTO PARA UM CIRCUITO INDUSTRIAL | 30 |
| 4.3.1 Simulação..... | 30 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 33 |
| 5.1 FUNÇÃO QUEBRA E FUNÇÃO SELEÇÃO | 33 |
| 5.2 SIMULAÇÃO INDUSTRIAL..... | 33 |
| 6. CONCLUSÃO | 35 |
| 7. REFERÊNCIAS..... | 36 |

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, o setor de moagem tem sido estudado com o intuito de desenvolver novas aplicações para os moinhos disponíveis no mercado. O avanço da tecnologia possibilitou a oferta de equipamentos cada vez maiores e capacitados para atender o aumento da demanda nas usinas de todo o mundo.

A busca incessante por uma moagem cada vez mais fina e mais eficiente, faz com que o gasto energético dessa etapa do beneficiamento seja consideravelmente maior. Em contrapartida, a moagem realizada de forma adequada e eficiente, facilita a liberação da partícula de interesse econômico, proporcionando maior facilidade nas etapas subsequentes do processo. Por isso, é de suma importância que haja um dimensionamento correto, visando a eficiência e o controle no gasto energético.

Atualmente, o moinho mais empregado nas usinas de beneficiamento é o moinho tubular de bolas convencional devido à ampla capacidade de produção e por ser flexíveis em relação a faixa granulométrica. Porém, esse equipamento possui limitações, a maior delas é a ineficiência energética quando comparado a outros moinhos disponíveis no mercado.

Considerando isso, o moinho *VertiMill*, comumente chamado de moinho de bolas vertical, vem ganhando destaque. Indicado para moagem de material com granulometrias finas, o moinho *VertiMill* possui maior eficiência de cominuição e fornece uma redução significativa no consumo energético.

Neste sentido, o presente trabalho relata uma simulação industrial a partir de parâmetros de função quebra e função seleção levantados a partir de testes laboratoriais de um moinho de bolas retirados da Tese de Doutorado de Douglas Mazzinghy (2012). Foi levado em consideração o fator de escalonamento k , que é responsável pela maior eficiência do moinho *VertiMill* comparado ao moinho de bolas convencional. Ao final, compara-se a simulação industrial com dados reais de uma usina da região Norte do Brasil.

2. OBJETIVO GERAL

Simular um circuito de moagem industrial de *VertiMill*, baseado na estimativa de parâmetros de quebra em escala de laboratório.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os parâmetros de função quebra e função seleção, por meio de dados de um teste laboratorial.
- Simular um circuito de moagem industrial.

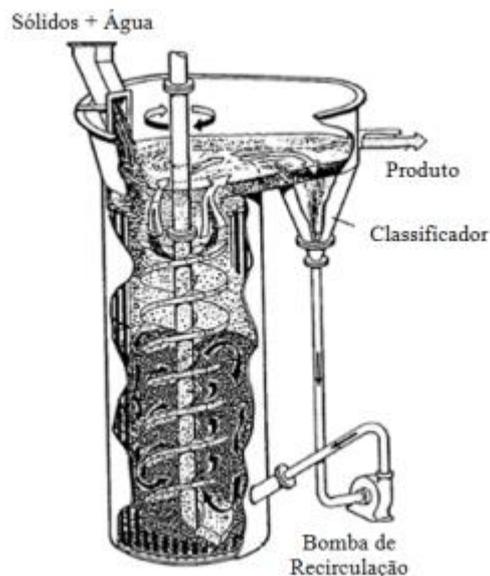
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o entendimento da simulação industrial de um moinho vertical *VertiMill*, faz-se necessária uma revisão da bibliografia. Utilizou-se conteúdos de publicações científicas digitais, livros e outros acervos.

3.1 MOINHO VERTICAL

Kubota Tower Mill Coporation desenvolveu no Japão, na década de 1950, o moinho vertical com o intuito de utilizá-lo em moagens finas e ultrafinas. Esse foi o primeiro moinho vertical aplicado na indústria mineral (STIEF et al., 1987). A Figura 1 retrata o moinho vertical, também conhecido como moinho de torre (Tower Mill).

Figura 1: Moinho vertical ou moinho de torre (Tower Mill)



Fonte: WILLS (1988, *apud* MAZZINGHY, 2012)

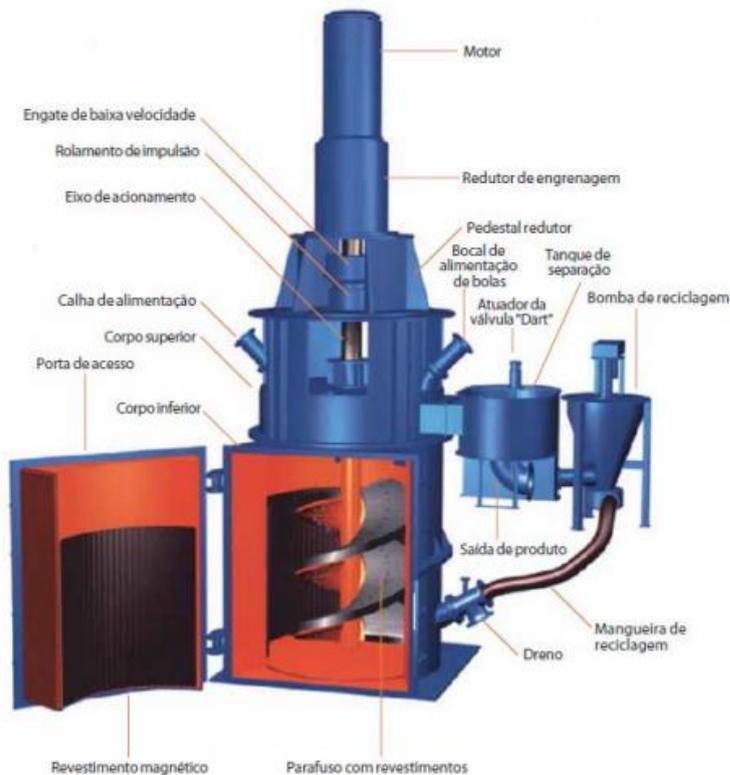
A composição do moinho vertical baseia-se em uma espiral interna que integra um cilindro. Essa espiral gera a movimentação da polpa e dos corpos moedores. O movimento é promovido por um motor instalado na parte superior do cilindro e conectado à espiral por um redutor (MAZZINGHY, 2012).

Herbst e Sepúlveda (1978, *apud* MAZZINGHY, 2012) relatam que desde a década de 1930, o princípio de funcionamento dos moinhos verticais já era conhecido. Anteriormente, os

moinhos verticais eram utilizados para condicionamento da superfície das partículas, através de atrição, antes da etapa de flotação.

Segundo Kalra (1999, *apud* MAZZINGHY, 2012), o moinho *Vertimill*, fabricado pela Metso, tem basicamente o mesmo princípio de funcionamento do *Tower Mill* e foi introduzido na década de 1990. A Figura 2 ilustra os principais componentes do *Vertimill*.

Figura 2: Principais componentes do moinho Vertimill



Fonte: METSO (2006, *apud* MAZZINGHY, 2012)

O estudo apresentado nesse trabalho, considera o moinho *Vertimill* de fabricação Metso, já aplicado em usinas de beneficiamento mineral no Brasil.

3.2 MOINHO DE BOLAS TUBULAR X VERTIMILL

No momento de escolha do melhor equipamento para determinado empreendimento, surge uma discussão pertinente a respeito do moinho de bolas tubular e o moinho *Vertimill*. Esse tópico retrata as principais comparações realizadas.

O moinho *VertiMill* possui um custo de aquisição maior que os moinhos tubulares de bolas, em contrapartida, os custos com obras civis para implantação do moinho convencional é maior (BERGERMAN, 2013).

De acordo com Stief;Lawruk e Wilson (1984, *apud* BERGERMAN, 2013) e Sachweh (2010, *apud* BERGERMAN, 2013) os moinhos verticais precisam de gastos muito menores com fundações quando comparados aos moinhos tubulares de bolas porque não desenvolvem forças dinâmicas. Em uma fundação de um moinho de bolas vertical é necessário concreto apenas para suportar seu peso, já para os moinhos convencionais, a base de concreto deve ser reforçada com no mínimo duas vezes o peso de suas partes móveis. Além disso, os autores relatam que considerando uma mesma aplicação, a área ocupada por moinhos verticais é significativamente menor.

Ainda, Sachweh (2010, *apud* BERGERMAN, 2013) indica que moinhos verticais apresenta uma redução de ruído de aproximadamente 25% quando comparados aos moinhos de bolas tubulares, destacando também o menor risco de acidentes devido a menor presença de partes móveis.

Uma das maiores vantagens citadas em estudos sobre moinhos *Vertimill* é a eficiência energética. Segundo Allen (2009, *apud* BERGERMAN, 2013) os principais motivos para a maior eficiência dos moinhos verticais em relação aos moinhos de bolas convencionais são: o formato vertical do moinho e a possibilidade de usar corpos moedores menores. Nos casos em que a alimentação é realizada na porção superior, isso contribui para a retirada dos finos que ocorre pelo fluxo ascendente de recirculação, evitando sobremaagem. A sua geometria também contribui para uma maior área de atrição.

Wellekamp (1999, *apud* BERGERMAN, 2013) ressalta ainda que essa redução de consumo energético é provocada, possivelmente pela maior eficiência de cominuição de partículas finas por abrasão e atrição e devido à menor perda da energia efetivamente aplicada à moagem na forma de impacto de bolas com bolas, bolas com revestimento e calor, como ocorre nos moinhos de bolas tubular.

Sobre a manutenção do *Vertimill*, de acordo com Stief; Lawruk e Wilson (1987) a manutenção desses equipamentos não é complexa, consistindo, além da lubrificação dos rolamentos e acionamentos, da troca dos revestimentos.

Ademais, conforme Pena (1990, *apud* BERGERMAN, 2013) e Allen (2009, *apud* BERGERMAN, 2013), o moinho vertical apresentou ganhos operacionais, indicando gastos com corpos moedores da ordem de 35 a 50% menores que em moinhos convencionais e 50% de economia com os gastos com revestimentos, além de indicarem que estes equipamentos apresentam alta disponibilidade, produzem menos ruído e por não possuírem partes móveis, serem mais seguros de se operar em relação aos moinhos tubulares.

Nas duas últimas décadas, a utilização de moinhos verticais em moagem de minérios

passou a ser usada para vazões altas de processamento devido ao desenvolvimento de equipamentos com potências superiores a 754 kW. O aumento do tamanho dos equipamentos disponíveis também tem levado à ampliação de sua faixa de utilização, que cada vez mais inclui alimentações grosseiras (BERGERMAN, 2013).

3.3 AS 3 LEIS DE COMINUIÇÃO

De acordo com Budke *et al.* (2011), existe uma relação do trabalho elementar para fragmentar a unidade de massa do sólido com uma variação de tamanho ou diâmetro médio das partículas. Essa relação é feita por leis empíricas denominadas leis da cominuição.

A Lei de Rittinger ou Primeira Lei da Cominuição foi formulada por Peter Ritter Von Rittinger que em 1867, estabeleceu uma relação que afirma que a área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido. Já a Segunda Lei da Cominuição foi desenvolvida por Friederick Kick. De acordo com essa lei, o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas (BUDKE *et al.*, 2011).

Por último, Fred C. Bond viu a necessidade de postular uma lei empírica, pois a primeira e segunda lei de cominuição não englobavam todos os casos encontrados na prática e na indústria era necessário algumas regras para classificar os materiais considerando as respostas à fragmentação. A lei empírica de Bond propões que “a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho”. Ele definiu como tamanho, a abertura da peneira pela qual passa 80% do material. A Terceira Lei é uma expressão matemática da Lei de Bond (BUDKE *et al.*, 2011).

As fórmulas das leis da cominuição estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Expressões matemáticas das leis de cominuição

| Leis | Expressão matemática | Constantes |
|-------------------------|-------------------------------------|--|
| Lei de Rittinger | $E = K(S_1 - S_0)$ | E = Energia específica; K = Fator de proporcionalidade ; S_1 = Área do produto; S_0 = Área inicial. |
| Lei de Kick | $E = C \times \log \frac{D_0}{D_1}$ | C = Constante; D_0 = Diâmetro inicial; D_1 = Diâmetro final. |

| | | |
|--------------------|--|---|
| Lei de Bond | $E = 10 WI \left(\frac{1}{\sqrt{P80}} - \frac{1}{\sqrt{A80}} \right)$ | <p>E = Energia em kWh para moer uma tonelada curta de minério; WI = Índice de Trabalho (Work index); $P80$ = Abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80% da massa do produto; $A80$ = Abertura da peneira, em micrômetros (μm), através da qual passa 80% da massa da alimentação.</p> |
|--------------------|--|---|

Fonte: BUDKE *et al*, 2011

Segundo Galery (2006, BUDKE *et al*, 2011), A lei de Bond é a única lei capaz de prever o consumo de equipamentos que ainda não foram instalados, além de conduzir a estimativas mais realistas. Bond também padronizou uma sequência de procedimentos para determinar a energia de fragmentação, convencionou que os tamanhos deveriam ser dados em micrômetros (μm) e referidos como sendo os tamanhos das aberturas de peneira em que passaram 80% dos respectivos produtos. Ademais, ele propôs que o coeficiente de trabalho, ou de proporcionalidade, fosse chamado de “Work Index”.(GALERY, 2006; BUDKE *et al*, 2011).

3.4 MODELO DE BALANÇO POPULACIONAL

De acordo com Gomes (2014), o *Population Balance Model (PBM)* ou modelo de balanço populacional foi elaborado em 1947 por Epstein. Porém, outros autores viram a necessidade de desenvolver mais esse assunto, como por exemplo Austin e Kimpel (1964), Austin; Klimpel e Luckie (1984), Kelsall; Reid e Stewart (1969), Herbst e Fuerstenau (1968 e 1980) e Herbst; Lo e Rajamani (1985).

No modelo citado, considera-se que o produto gerado no interior do moinho por intervalo de tempo é determinado por uma única fração granulométrica presente no interior do equipamento. Devido a isso, esse é um modelo de taxa de primeira ordem. Cada fração apresenta uma constante própria que representa sua taxa de desaparecimento k_i , utilizada para determinar sua taxa de quebra como apresentado na equação 1 a seguir GOMES, 2014).

$$\text{Massa moída} = k_i x s_i \quad (1)$$

Onde:

k_i = taxa de quebra (h^{-1});

s_i = massa da i -ésima fração granulométrica no interior do moinho.

O modelo é de fácil utilização, pois os princípios de quebra de primeira ordem permitem essa simplicidade. Em contrapartida, esse é um modelo limitado na aplicação e faixas de operação muito amplas. Por isso, considera-se constante o número de impactos em cada intervalo de energia. Logo, a premissa de quebra de primeira ordem é inválida se o número de partículas for muito superior ou inferior ao número de impactos (GOMES, 2014).

Ainda, segundo Gomes (2014), a partir de ensaios de laboratórios, a taxa de quebra k_i , pode ser estimada, ou ser retrocalculada atrás da equação básica do *PBM*. A dedução desta equação tem por base o balanço de massas para uma faixa granulométrica individual, como demonstrado a seguir nas equações 2 e 3.

$$\text{Alimentação} + \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{Fragmentado} \\ \text{de faixas} \\ \text{Superiores} \end{array} = \text{Produto} + \begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{Fragmentado} \\ \text{que sai da} \\ \text{faixa} \end{array} \quad (2)$$

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i \quad (3)$$

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)

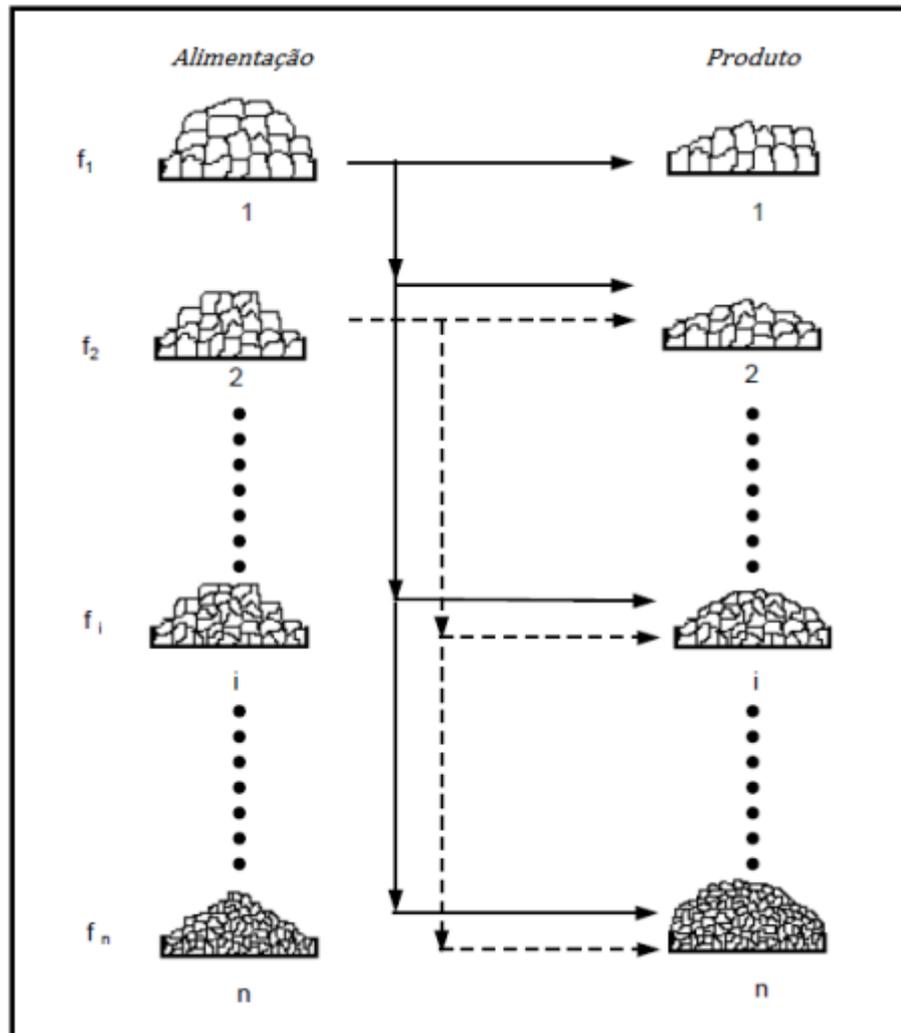
b_{ij} = função distribuição de quebra, correspondente a fração da j-ésima faixa granulométrica, que aparece na i-ésima faixa granulométrica devido à fragmentação;

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

s_j = massa da carga no interior do moinho, correspondente à j-ésima fração granulométrica

A Figura 3 abaixo esclarece melhor através de um esquema dos eventos de fragmentação e distribuição de fragmentos para um instante Δt , dentro de um moinho. (GOMES, 2014)

Figura 3: Representação esquemática dos Eventos de Fragmentação e Distribuição de Fragmentos, para um instante Δt em um moinho



Fonte: Sepúlveda (2001 *apud* GOMES, 2014)

Gomes (2014) explica que durante um intervalo Δt , algumas partículas serão fragmentadas e seus fragmentos redistribuídos entre as malhas inferiores segundo a distribuição resultante. Para os sólidos retidos em uma malha i , qualquer, a função taxa de quebra k_i representa a velocidade de fragmentação, ou seja, a fração das partículas que se fraturam por unidade de tempo. O produto $(k_i \Delta t)$ representa a fração, em massa, do material retido na malha i , no instante j , que é fragmentado pela ação do meio moedor durante o período Δt imediatamente posterior. A função quebra b_{ij} representa a fração, em massa, dos fragmentos provenientes da fratura de partículas retidas na malha j que serão retidos na malha i inferior.

Segundo Lynch e Morrell (1992, *apud* GOMES, 2014), a vantagem desse modelo é que ele apresenta resultados significativos em termos de índices técnicos e econômicos de

desempenho, dessa forma, permite a otimização de instalações industriais e de projetos de equipamentos de cominuição. Esta otimização é realizada por meio de simulações da operação de circuitos de cominuição, que possibilitam a seleção de alternativas integradas de melhor desempenho sob o enfoque técnico de processo ou mesmo econômico, tais como capital de investimento e custos operacionais.

3.5 SOLUÇÃO DE REID

A equação 4 apresentada abaixo é a solução da equação de moagem de batelada proposta por Reid (REID, 1965 *apud* ALVES, 2006).

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^i a_{ij} \exp(-S_j t); \quad n \geq i \geq j \geq 1 \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_i(0) - \sum_{\substack{k=1 \\ i>j}}^{i-1} a_{ik} \quad ; \quad i = j \\ \frac{1}{S_i - S_j} \sum_{k=j}^{i-1} S_k b_{ik} a_{kj} \quad ; \quad i > j \end{array} \right.$$

Ainda, Luckie e Austin (1972, *apud* ALVES, 2006) reagruparam os termos em forma diferente e mostraram uma nova maneira de expressar a solução de Reid, como descrita na equação 5.

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^i d_{ij} f_j(0) \quad ; \quad n \geq i \geq 1 \quad (5)$$

onde d_{ij} é dado por:

$$d_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad ; \quad i < j \\ e^{-S_i t} \quad ; \quad i = j \\ \sum_{k=j}^{i-1} c_{ik} c_{jk} (e^{-S_k t} - e^{-S_i t}); \quad i > j \end{array} \right.$$

e c_{ij} é:

$$c_{ij} = \begin{cases} -\sum_{k=i}^{j-1} c_{ik} c_{jk} & ; i < j \\ 1 & ; i = j \\ \left(\frac{1}{S_i - S_j}\right) \sum_{k=j}^{i-1} S_k b_{ik} c_{kj} & ; i > j \end{cases}$$

3.6 SOLUÇÃO DE HERBST E FUERSTENAU

De acordo com Duque e Schneider (2017), esse é um método que dimensiona a função seleção de energia específica, que pode ser medida numa série de testes de moagem em batelada enquanto o torque é medido ou, mais diretamente, o consumo de energia é medido. Neste sistema, as variáveis que afetam o consumo de energia podem ser escalonadas. Isso inclui o diâmetro e comprimento do moinho, a velocidade de rotação e a carga de bolas.

Segundo Herbst e Fuerstenau (1973 e 1980 *apud* MAZZINGHY, 2009), através da aplicação de algoritmos, desenvolvidos em computador, que utilizam técnicas de regressão não lineares para a obtenção dos parâmetros associados à equação do balanço populacional, informações precisas de alguns desses parâmetros têm sido obtidas. Na prática, tem se observado que os valores da função seleção discretizada por tamanhos, S_i , apresentam relações de proporcionalidade com a potência absorvida pelo moinho de acordo com a equação 6.

$$S_i = S_i^e \left(\frac{P}{H}\right) \quad (6)$$

Onde:

S_i^e = Função seleção específica em energia (independente das condições geométricas e operacionais do moinho) (t/kWh);

H = Massa de material contida no moinho (t);

P = Potência líquida consumida (kW);

S_i = função seleção no intervalo de tamanho i (min^{-1});

A potência líquida P e a massa contida no moinho H podem ser expressas conforme as equações 7 e 8. (MAZZINGHY, 2009)

$$P = \Phi_1(N^*, M_B^*, M_P^*, d_B). LD^{(2.5+\delta)} \quad (7)$$

$$M = \Phi_2(M_B^*, M_P^*). LD^{(2.0)} \quad (8)$$

Substituindo P e H na equação 6, obtem-se: (MAZZINGHY, 2009)

$$S_i = S_i^e \cdot \Phi_3(N^*, M_B^*, M_P, d_B). LD^{(0,5+\delta)}$$

Onde:

D = Diâmetro do moinho;

L = Comprimento do moinho;

N^* = Fração da velocidade crítica do moinho;

M_B^* = Fração do volume do moinho ocupado por bolas;

M_P^* = Fração intersticial ou porosidade da carga de bolas ocupada por partículas
minerais;

d_B = Diâmetro de bolas.

Segundo Mazzinghy (2009), as equações citadas são muito empregadas para determinar o consumo energético requerido na moagem e podem ser utilizadas no dimensionamento de circuitos industriais de moagem, partindo de resultados obtidos em escala de laboratório.

Ainda, Mazzinghy (2009) ressalta que os valores de S_i^e são dependentes do tamanho das bolas.

3.7 FUNÇÃO QUEBRA

A Função Quebra indica a distribuição granulométrica resultante das partículas devido à aplicação de energia a elas. Esta fragmentação depende exclusivamente das características do minério e da forma que a energia é aplicada (GOMES, 2014).

Em relação ao equipamento de moagem a função quebra é considerada invariante e propriedade exclusiva do minério. Portanto, a função quebra determinada em escala de laboratório com moinho de bolas é a mantida constante para realizar uma simulação de circuito industrial com um moinho vertical (MAZZINGHY, 2012).

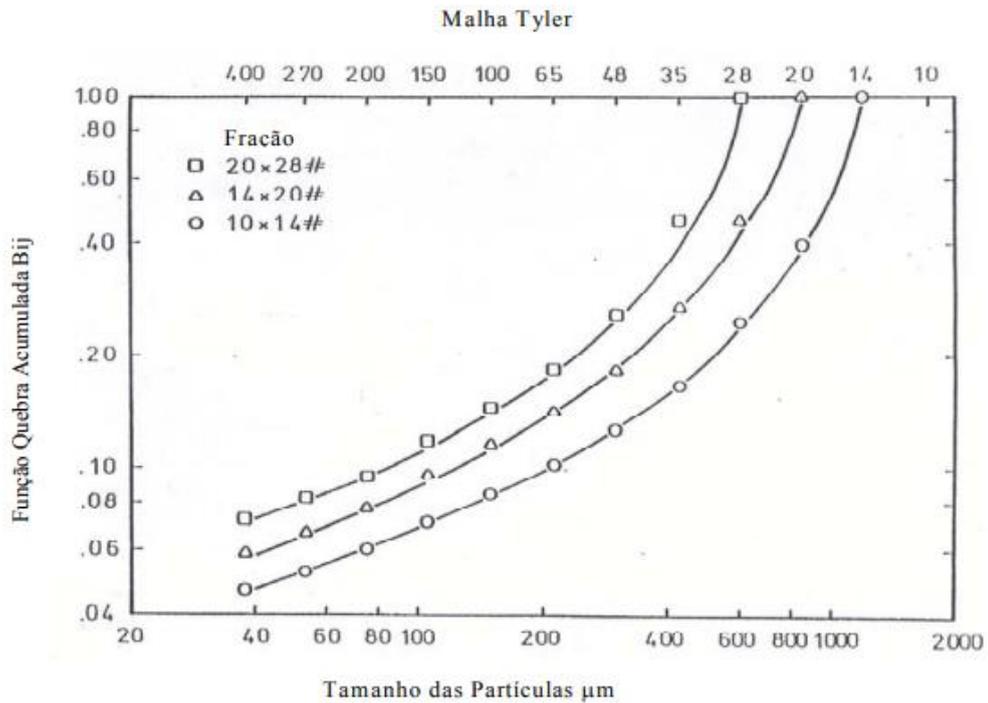
A Equação 9 expressa um modelo para descrever a função quebra acumulada $\beta_{i,j}$ (AUSTIN et al., 1984). Os parâmetros β_0 , β_1 , β_2 correspondem as constantes dependentes das características do material. (MAZZINGHY et al., 2014)

$$\beta_{ij} = \beta_0 \left(\frac{d_i}{d_j}\right)^{\beta_1} + (1 - \beta_0) \left(\frac{d_i}{d_j}\right)^{\beta_2}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j \leq i \quad (9)$$

De acordo com Alves (2006), $\beta_{i,j}$ depende da razão d_i/d_j , mas não depende de d_i ou

d_j separadamente. Portanto, basta obter experimentalmente β_{ij} para $j = 1$ e logo, baseado na equação 9, estima-se β_{ij} para $j > 1$. Essa é uma propriedade da função quebra conhecida como “normalização de β_{ij} ” com respeito ao tamanho da partícula. As figuras 4 e 5 apresentam um gráfico prático dessas propriedades. (ALVES, 2006)

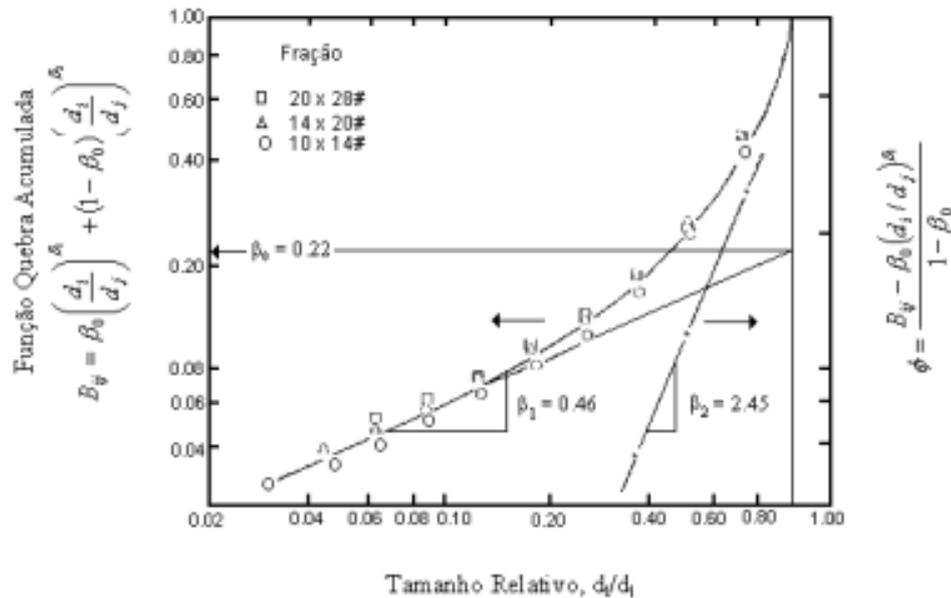
Figura 4 – Função quebra acumulada versus tamanho para três frações diferentes



Fonte: Rojas (1985, *apud* ALVES, 2006)

Para estimar graficamente os valores dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 na equação 9, tem-se a Figura 5 (ALVES, 2006).

Figura 5 – Função quebra acumulada versus tamanho relativo da partícula. Ensaio de moagem em batelada com três monotamanhos diferentes



Fonte: Sepúlveda (2001 *apud* ALVES, 2006)

3.8 FUNÇÃO SELEÇÃO

Os eventos de fragmentação que ocorrem no equipamento de cominuição possuem uma determinada frequência. Essa frequência de fragmentação é denominada Função Seleção ou Taxa de Quebra, e representa a velocidade do desaparecimento de partículas para cada faixa granulométrica. É expressa pela relação entre a massa cominuída e a massa inicial para uma determinada faixa granulométrica. O comportamento dinâmico da carga do moinho determina a forma e magnitude desta função (GOMES, 2014).

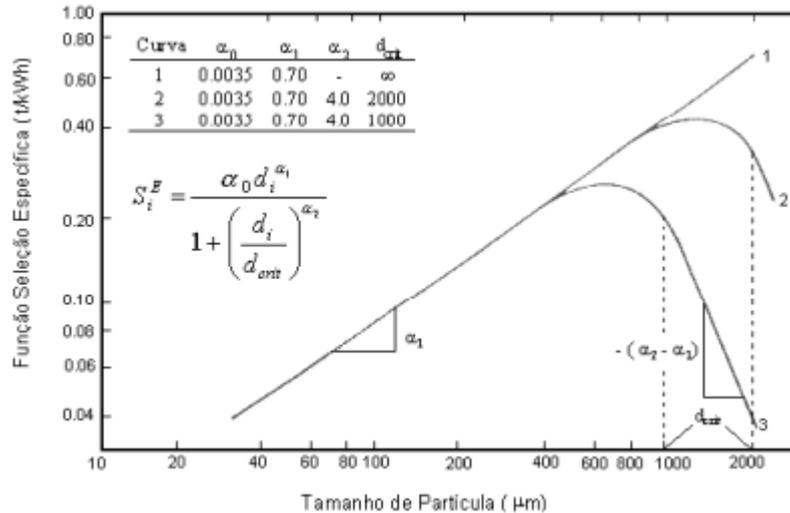
De acordo com Mazzinghy (2012), espera-se que a função seleção seja maior nos moinhos verticais a fim de justificar a sua maior eficiência de moagem, visto que, a função seleção representa a velocidade de quebra do material.

A Equação 10 expressa um modelo para descrever a função seleção S_i^E (AUSTIN *et al.*, 1984). Os parâmetros α_0 , a_1 , a_2 , d_{crit} correspondem as constantes dependentes do material e das condições de moagem. (MAZZINGHY *et al.*, 2014)

$$S_i^E = \frac{\alpha_0 d_i^{a_1}}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{crit}} \right)^{a_2}} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Para analisar o comportamento da equação 10 em função dos seus parâmetros, tem-se na Figura 6 uma representação esquemática.

Figura 6: Representação esquemática do comportamento da equação 10 em função de seus parâmetros



Fonte: Sepúlveda (2001, *apud* ALVES 2006)

Por fim, como já mostrado anteriormente na equação 6, a função seleção S_i tem relação de proporcionalidade com a potência absorvida pelo moinho e a massa contida neste. (HERBST E FUERSTENAU, 1980)

3.8.1 Fator k de escalonamento do moinho vertical

Para determinar a função seleção de um moinho de bolas vertical, faz-se necessário a utilização de um fator de ajuste, visto que o moinho vertical é mais eficiente que o moinho de bolas com relação à utilização da energia. O fator de ajuste é denominado fator k , que é igual à 1,35. (MAZZINGHY, 2012).

A Equação 11 apresentada abaixo expressa o modelo para descrever a função seleção específica em energia S_i^E através de testes em escala de laboratório com moinho de bolas considerando o fator k , presente nessa equação, que representa a maior eficiência do moinho vertical comparada com o moinho de bolas convencional. Portanto, a equação 11 é a equação para determinação da função seleção específica em energia de um moinho vertical, obtida através de ensaios de bancada em moinhos de bolas tubulares convencionais. (MAZZINGHY, 2012).

$$S_i^E = \frac{k * \alpha_0 d_i^{a_1}}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{crit}}\right)^{a_2}} ; i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Onde:

$k = 1,35$ constante de escalonamento de moinho vertical (adimensional).

(MAZZINGHY, 2012).

4. METODOLOGIA

Este tópico apresenta a metodologia utilizada para simular e um moinho de bolas vertical em escala industrial, utilizou-se testes laboratoriais retirados de uma de tese doutorado (MAZZINGHY, 2012) para determinar os parâmetros de função quebra e função seleção, e a partir desses parâmetros juntamente com dados reais de uma usina da região Norte do Brasil, foi feita a simulação industrial.

Os testes laboratoriais e a usina utilizaram amostras de minério de cobre sulfetado.

4.1 TESTES LABORATORIAIS

Os testes de laboratório utilizados para estimativa dos parâmetros de quebra foram retirados de uma tese de doutorado (MAZZINGHY, 2012). A seguir será descrita resumidamente a metodologia utilizada pelo autor.

Com a amostra de cobre sulfetado foram feitos testes de moagem em um moinho de bolas convencional (254mm x 254mm) em escala de laboratório (Figura 7).

Figura 7: Moinho de bolas utilizado na tese de doutorado de Douglas Mazzinghy



Fonte: MAZZINGHY, 2012

Antes da moagem, a amostra foi britada de forma com que o material tivesse a granulometria abaixo de 3,6mm, e homogeneizada com o intuito de obter uma proporção

adequada entre o diâmetro do moinho e o tamanho das bolas utilizadas. Após cada intervalo de tempo de moagem, realizou-se a distribuição granulométrica de todo o material do moinho e em seguida devolveu-se o material para dar prosseguimento ao ensaio (MAZZINGHY, 2012).

4.1.1 Condições laboratoriais

Para realizar os ensaios em laboratório levou-se em consideração as condições abaixo (Tabela 2):

Tabela 2: Condições dos ensaios em escala de laboratório com moinho de bolas

| Teste Moinho de bolas laboratório | |
|---|-----|
| Diâmetro (mm) | 254 |
| Comprimento (mm) | 254 |
| Enchimento de bolas J (%) | 40 |
| Enchimento de material U (%) | 100 |
| Porcentagem da velocidade crítica V_c (%) | 70 |
| Levantadores de carga | 8 |

Fonte: MAZZINGHY, 2012

Foram feitos quatro testes a seco e um teste a úmido para determinar a taxa de quebra para a condição úmida. Para os testes a seco os tempos de moagem determinados foram 2, 23, 39 e 48 minutos. Já para o teste à úmido determinou-se 34 minutos.

Os intervalos de tempo foram definidos com o intuito de determinar as funções quebra e seleção para um vasto intervalo de distribuição de tamanho de partículas. Para isso, baseou-se na quebra de primeira ordem (AUSTIN et al., 1984) obtendo assim, distribuições granulométricas espaçadas (MAZZINGHY, 2012).

4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FUNÇÃO SELEÇÃO E FUNÇÃO QUEBRA

Para definir os parâmetros de função seleção e função quebra utilizou-se a planilha do *Moly-Cop Tools*, Ball Parameters Batch Mill Multicomponentes utilizando como dados de entrada os resultados de granulometria dos ensaios de moagem em escala de laboratório apresentados na tabela 3 e condições de moagem descritos no item 4.2.1 deste trabalho.

4.2.1 Condições laboratoriais

A seguir será descrito resumidamente as condições utilizadas pelo autor da tese de doutorado que serviu de base para este trabalho (MAZZINGHY, 2012). Levou-se em consideração as seguintes condições dos ensaios de laboratório:

- Velocidade crítica (%): 70
- Massa de sólidos (kg): 3,83
- Concentrado de sólidos (%): 100 nos testes a seco, 60 no teste á úmido
- Massa de bolas (kg): 23,8
- Potência do moinho (kW): 0,071
- Tempo (min): 2, 23, 39, 48, 34

Na figura 8 está apresentado como foram introduzidos os dados acima na planilha do *Moly-Cop Tools* para determinar as funções de quebra e seleção.

Figura 8: Condições laboratoriais inseridas na planilha do *Moly-Cop Tools*

Moly-Cop Tools™

BALLPARAM_BATCH : Estimation of Grinding Parameters from Laboratory Data

Remarks: Base Case Example

OVERALL CONDITIONS (for all Tests) :

| Mill Diameter ft | Mill Length ft | Ore Density ton/m ³ | Balls Density ton/m ³ | Voids Fraction %1 |
|---------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 0,83 | 0,83 | 3,50 | 7,75 | 1,00 |

INDEPENDENT TEST CONDITIONS :

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Test |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Mill Speed, % Critical | 70,0 | 70,0 | 70,0 | 70,0 | 70,0 | |
| Ore Weight, kg | 3,830 | 3,830 | 3,830 | 3,830 | 3,830 | |
| % Solids (by weight) | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 60,0 | |
| Balls Weight, kg | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | |
| Net Power, kW | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | |
| Grinding Time, min | 2,00 | 23,00 | 39,00 | 48,00 | 34,00 | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, utilizou-se a curva granulométrica obtida nos diferentes intervalos de tempo (Tabela 3):

Tabela 3: Curvas granulométricas da amostra de Minério de Cobre em diferentes intervalos de tempo

| t(min) | 0 | 2 | 23 | 39 | 48 | 34 |
|--------|---|---|----|----|----|----|
|--------|---|---|----|----|----|----|

| (μm) | %Pas | %Pas | %Pas | %Pas | %Pas | %Pas |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3350 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 2370 | 85,47 | 91,17 | 99,44 | 100 | 100 | 100 |
| 1670 | 67,52 | 77,26 | 98,85 | 100 | 100 | 100 |
| 1180 | 51,31 | 61,25 | 97,43 | 100 | 100 | 100 |
| 840 | 40,61 | 49,76 | 94,19 | 99,93 | 100 | 100 |
| 590 | 32,34 | 40,15 | 87,41 | 99,6 | 100 | 100 |
| 420 | 25,9 | 32,47 | 76,98 | 97,91 | 99,84 | 100 |
| 296 | 21,01 | 26,45 | 65,57 | 90,67 | 97,89 | 99,35 |
| 212 | 16,9 | 21,32 | 54,12 | 76,66 | 88,02 | 93,93 |
| 150 | 14,07 | 17,71 | 46,23 | 64,04 | 75,89 | 86,35 |
| 105 | 11,02 | 14,12 | 38,58 | 54,72 | 64,27 | 71,62 |
| 74 | 8,96 | 11,81 | 32,33 | 45,89 | 54,66 | 60,02 |
| 52 | 7,6 | 10,3 | 27,67 | 40,83 | 48,14 | 51,65 |
| 37 | 5,53 | 8,06 | 22,2 | 32,6 | 38,87 | 41,11 |

Fonte: MAZZINGHY, 2012

Na figura 9 está apresentado como foram introduzidos os dados acima na planilha do *Moly-Cop Tools* para estimar as funções de quebra e seleção.

Figura 9: Curva granulométrica de todos os testes inseridas na planilha do *Moly-Cop Tools*

| i | Mesh | Opening | Mid-Size | Experimental Size Dist | | | | | | | | | |
|----|------|---------|----------|------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|
| | | | | Feed | Product | Feed | Product | Feed | Product | Feed | Product | | |
| 1 | | 25400 | | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 2 | | 19050 | 21997 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3 | | 12700 | 15554 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 4 | | 9500 | 10984 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 5 | | 6700 | 7978 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 6 | | 4750 | 5641 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 7 | | 3350 | 3989 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 8 | | 2370 | 2818 | 85,47 | 91,17 | 85,47 | 99,44 | 85,47 | 100,00 | 85,47 | 100,00 | 85,47 | 100,00 |
| 9 | | 1670 | 1989 | 67,52 | 77,26 | 67,52 | 98,85 | 67,52 | 100,00 | 67,52 | 100,00 | 67,52 | 100,00 |
| 10 | | 1180 | 1404 | 51,31 | 61,25 | 51,31 | 97,43 | 51,31 | 100,00 | 51,31 | 100,00 | 51,31 | 100,00 |
| 11 | | 840 | 996 | 40,61 | 49,76 | 40,61 | 94,19 | 40,61 | 99,93 | 40,61 | 100,00 | 40,61 | 100,00 |
| 12 | | 590 | 704 | 32,34 | 40,15 | 32,34 | 87,41 | 32,34 | 99,60 | 32,34 | 100,00 | 32,34 | 100,00 |
| 13 | | 420 | 498 | 25,90 | 32,47 | 25,90 | 76,98 | 25,90 | 97,91 | 25,90 | 99,84 | 25,90 | 100,00 |
| 14 | | 296 | 353 | 21,01 | 26,45 | 21,01 | 65,57 | 21,01 | 90,67 | 21,01 | 97,89 | 21,01 | 99,35 |
| 15 | | 212 | 251 | 16,90 | 21,32 | 16,90 | 54,12 | 16,90 | 76,66 | 16,90 | 88,02 | 16,90 | 93,93 |
| 16 | | 150 | 178 | 14,07 | 17,71 | 14,07 | 46,23 | 14,07 | 64,04 | 14,07 | 75,89 | 14,07 | 86,35 |
| 17 | | 105 | 125 | 11,02 | 14,12 | 11,02 | 38,58 | 11,02 | 54,72 | 11,02 | 64,27 | 11,02 | 71,62 |
| 18 | | 74 | 88 | 8,96 | 11,81 | 8,96 | 32,33 | 8,96 | 45,89 | 8,96 | 54,66 | 8,96 | 60,02 |
| 19 | | 52 | 62 | 7,60 | 10,30 | 7,60 | 27,67 | 7,60 | 40,83 | 7,60 | 48,14 | 7,60 | 51,65 |
| 20 | | 37 | 44 | 5,53 | 8,06 | 5,53 | 22,20 | 5,53 | 32,60 | 5,53 | 38,87 | 5,53 | 41,11 |
| 21 | | 0 | 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Após determinar a função quebra e função seleção para um moinho de bolas convencional, aplicou-se o fator $k = 1,35$ de escalonamento de moinho vertical, multiplicando o valor de α_0 encontrado para o teste à úmido.

4.3 ESCALONAMENTO PARA UM CIRCUITO INDUSTRIAL

Com os parâmetros levantados a partir dos testes de laboratório e informações de um banco de dados dos autores de um circuito industrial de uma usina de cobre da região Norte do Brasil, que opera com o mesmo minério utilizado nos ensaios de laboratório descritos acima, realizou-se a simulação do circuito industrial.

4.3.1 Simulação

Para essa simulação, utilizou-se o software *Moly-Cop Tools* e os dados da usina de cobre da região Norte do Brasil. Um moinho *VertiMill* com uma potência líquida igual a 437,6 kW, sendo alimentado por 220,8 t/h com 63,4% de sólidos e densidade do minério de cobre correspondente a $3,5 \text{ ton/m}^3$. Na tabela 4 tem-se a distribuição granulométrica da alimentação do moinho da usina em questão.

Tabela 4: Alimentação do moinho de uma usina de cobre da região Norte do Brasil

| Tamanho | Alimentação do moinho |
|---------------|--------------------------|
| μm | % Pas. |
| 25400 | 100,00 |
| 19050 | 100,00 |
| 12700 | 100,00 |
| 9500 | 100,00 |
| 6700 | 100,00 |
| 4750 | 100,00 |
| 840 | 100,00 |
| 590 | 100,00 |
| 420 | 99,77 |
| 290 | 98,94 |
| 210 | 93,90 |
| 149 | 86,07 |
| 105 | 69,45 |
| 74 | 47,26 |
| 53 | 26,54 |
| 38 | 13,62 |
| 19 | 3,96 |
| 13 | 2,47 |

| | |
|-------|------|
| 10 | 1,64 |
| 7 | 1,09 |
| <hr/> | |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Além disso, os parâmetros de função quebra e função seleção escalonados para um moinho vertical, já mencionado anteriormente, também foram inseridos como dados na planilha para realizar a simulação.

Ao final comparou-se os resultados da simulação do circuito industrial com os dados reais da usina através de um gráfico.

A figura 10 apresenta todos os dados citados anteriormente inseridos na planilha para realizar a simulação.

Figura 10: Inserção de dados para a simulação industrial na planilha do *Moly-Cop Tools* adaptada pelo autor

Moly-Cop Tools™

BALLSIM : Open Grinding Simulator

Circuit Type Simulation N°

Remarks

Net kW 438
% Losses 10,00
Gross kW 486

Ore Density, ton/m³
 Balls Density, ton/m³
 Slurry Density, ton/m³

Feed, ton/hr (dry)
 % Solids (by weight)

Feed Size Distribution

| i | Mesh | Opening | Mid-Size | ton/hr | % Retained | % Passing |
|----|--------|---------|----------|---------|------------|-----------|
| 1 | 2.1" | 25400 | | | | 100,00 |
| 2 | 1.48" | 19050 | 21997 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 3 | 1.05" | 12700 | 15554 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 4 | 0.742" | 9500 | 10984 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 5 | 0.525" | 6700 | 7978 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 6 | 0.371" | 4750 | 5641 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 7 | 3 | 840 | 1997 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 4 | 590 | 704 | 0,0000 | 0,00 | 100,00 |
| 9 | 6 | 420 | 498 | 0,4991 | 0,23 | 99,77 |
| 10 | 8 | 290 | 349 | 1,8478 | 0,84 | 98,94 |
| 11 | 10 | 210 | 247 | 11,1226 | 5,04 | 93,90 |
| 12 | 14 | 149 | 177 | 17,3008 | 7,83 | 86,07 |
| 13 | 20 | 105 | 125 | 36,6899 | 16,61 | 69,45 |
| 14 | 28 | 74 | 88 | 49,0177 | 22,20 | 47,26 |
| 15 | 35 | 53 | 63 | 45,7622 | 20,72 | 26,54 |
| 16 | 48 | 38 | 45 | 28,5193 | 12,91 | 13,62 |
| 17 | 65 | 19 | 27 | 21,3325 | 9,66 | 3,96 |
| 18 | 100 | 13 | 16 | 3,2999 | 1,49 | 2,47 |
| 19 | 150 | 10 | 11 | 1,8348 | 0,83 | 1,64 |
| 20 | 200 | 7 | 8 | 1,2120 | 0,55 | 1,09 |
| 21 | -200 | 0 | 3 | 2,4042 | 1,09 | 0,00 |

Selection Function Parameters :
 alpha0 alpha1 alpha2 dcrit

Expanded Form :
 alpha02 alpha12
 Suggested Default Values

Breakage Function Parameters :
 beta0 beta1 beta2

Expanded Form :
 beta01
 Suggested Default Value

Fonte: Elaborado pelo autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados os resultados obtidos a partir da metodologia apresentada anteriormente.

5.1 FUNÇÃO QUEBRA E FUNÇÃO SELEÇÃO

Os valores de função quebra e função seleção encontrados utilizando as condições laboratoriais estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Valores de função seleção e quebra

| Teste úmido | | |
|-----------------------|------------|-----------|
| Função quebra | β_0 | 0,11534 |
| | β_1 | 0,20886 |
| | β_2 | 6,57987 |
| Função seleção | α_0 | 0,0208302 |
| | α_1 | 0,659074 |
| | α_2 | 2,820376 |

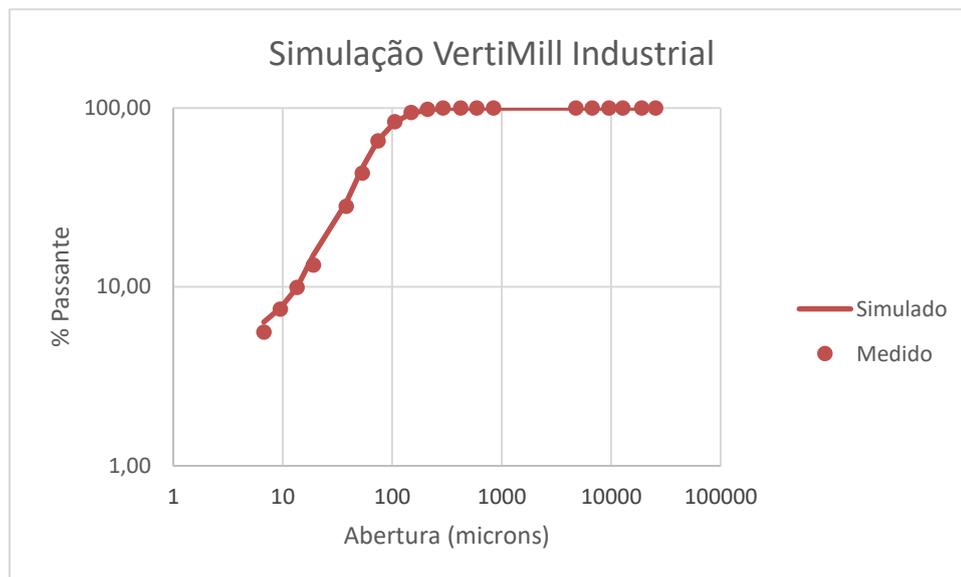
Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 SIMULAÇÃO INDUSTRIAL

Considerou-se os parâmetros levantados anteriormente de função quebra e aplicou-se o fator de escalonamento ($k=1,35$) no valor de α_0 da função seleção para escalonar um moinho de bolas vertical (tabela 5).

O Gráfico 1 apresenta a comparação da distribuição granulométrica do moinho industrial simulada (linha contínua) e amostrada na usina (pontos).

Gráfico 1: Distribuição granulométrica da descarga do moinho na simulação (Simulado) e na usina (Medido)



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico, percebe-se que a simulação de um moinho de molas vertical se adequa aos resultados obtidos em uma usina, considerando o mesmo minério e os parâmetros de função quebra e seleção determinados através de dados de testes laboratoriais.

A simulação industrial tem confiabilidade e segurança para escalonar um moinho de bolas vertical em escala industrial a partir de testes laboratoriais de moinho de bolas convencional.

6. CONCLUSÃO

As ferramentas de simulação estão cada vez mais frequentes nas indústrias de mineração por serem um método rápido, eficaz e assertivo. Visto isso, a metodologia aplicada atendeu a esses requisitos.

O moinho de bolas convencional de escala de laboratório é mais comumente encontrado que o moinho vertical laboratorial. Portanto, utilizar dados de um moinho de bolas convencional para escalonar um moinho vertical, considerando apenas o fator de escalonamento k , e obter uma simulação industrial assertiva torna-se extremamente útil e prático. Podendo assim, contribuir para a aplicação dos moinhos verticais nas usinas, esse que tem menor consumo energético e maior eficiência.

Considerando isso, conclui-se que o modelo utilizado nesse estudo para realizar a simulação industrial se ajustou adequadamente aos resultados reais obtidos em usina. Dessa forma, confirma a metodologia da tese de doutorado (MAZZINGHY, 2012), na qual baseou-se o trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- ALVES, V. K. **Otimização de Cargas Moedoras utilizando Ferramentas de Modelamento Matemático e Simulação de Moagem**. DiSSERTAÇÃO de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p.122, 2006.
- ALVES, V. K., GALÉRY, R., PERES, A. E. C., SCHNEIDER, C. L. **Estudo de Otimização de Carga de Moinho Utilizando Tecnologia de Simulação**, XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis, Vol. 2, p. 227-234, 2004.
- AUSTIN, L.G., KLIMPEL, R.R., LUCKIE, P.T. **Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling**. SME AIME. 1984.
- BERGERMAN, M. G. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais** / M.G. Bergerman. São Paulo, p.60-74, 2013.
- BUDKE, R. *et al.* **Efeito do tratamento térmico no índice de trabalho (w_i) de amostras de quartzo**. XXIV ENTMMME - Salvador/Bahia, p. 468-469, 2011.
- DUQUE, T.F.M.B., SCHNEIDER, C.L. **Moagem de Partículas Grossas: Herbst-Fuerstenau na região de quebra anormal**. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Belém-PA. 2017.
- GALERY, R. **Fragmentação de Minérios: Primeira Parte**. Notas de Aula. Universidade Federal de Minas Gerais: DEMIN, 2006.
- GOMES, W. L. **Integração de modelos energéticos e de balanço populacional para simulação de moagem em moinhos de bolas**. São Paulo, p. 197, 2014.
- HERBST J. A., SEPULVEDA J. L. **Fundamentals of Fine and Ultrafine Grinding in a Stirred Ball Mill, International Powder and Bulk Solids Handling and Processing: Proceedings held Rosemount Illinois**, Vol. 16-18, pp. 452-470, May, 1978
- HERBST, J. A. & FUERSTENAU, D. W. **Mathematical Simulation of Dry Ball Milling Using Specific Power Information**, *Trans. AIME/SME*, 254, pp. 343-348, 1973.
- HERBST, J. A. & FUERSTENAU, D. W. **Scale-Up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models**, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 7, pp. 1- 31, 1980.
- HERBST, J. A. & FUERSTENAU, D. W. **Scale-Up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models**, *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 7, pp. 1-31, 1980.
- KALRA, R. **Overview on alternative methods for fine and ultra-fine grinding**, In: IIR Conference, Crushing & Grinding, Perth, 1999.
- LUCKIE, P.T., AUSTIN, L.G. **Mineral Science and Engineering**, 1972. 4, 24-51.

LYNCH, A. J.; MORRELL, S. **The understanding of comminution and classification and its practical application in plant design and operation.** Comminution: theory and practice. SME, Littleton. Cap 30, p. 405-425. 1991

MAZZINGHY D. B., RUSSO J. F. C., PIMENTEL D. A. **Parâmetros cinéticos de moagem de itabiritos compacto e friável.** Holos, Ano 30, Vol. 3 – Edição Especial – XXV ENTMME // VII MSHNT. 2014

MAZZINGHY, D. B. **Estudo de Modelagem e Simulação de Circuito de Moagem Baseado na Determinação dos Parâmetros de Quebra e Energia Específica de Fragmentação,** Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, CPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

MAZZINGHY, D. B.. **Metodologia para escalonamento e simulação de moinho vertical.** xxii, 162 f., enc.: il, 2012.

METSO. Moinho Vertical (VERTIMILL™), **Moagem de Finos e Ultrafinos em Via Úmida,** Metso Minerals, N° 2103-01-07-MPR, pp. 07, Sorocaba-Portuguese, 2006.

PENA, F. **Update on Vertimills for the mining industry.** In: SIMPOSIUM SOBRE MOLIENDA, 6., 1990, Vinã del Mar. Anales. s. L.: ARMCO, 1990.

REID, K.J. **A Solution to the Batch Grinding Equation.** Chemical Engineering Science, Vol. 20, p. 953-963, 1965.

ROJAS, J. **Determinación del Consumo de Energía en la Molienda Utilizando un Molino de torque de Laboratorio,** Memoria de Título, Dpto. Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile. 1985.

SACHWEH, J. **Tower Mill: advantages in wet grinding applications.** In: International Mineral Processing Conference, 25., 2010, Brisbane. Proceedings. Brisbane: AUSIMM. p.1197-1206. 2010.

SEPÚLVEDA, J.M. **Manual do usuário do Moly-Cop Tools,** Moly-Cop Chile S.A. 2001.

STIEF, D. E., LAWYER, W.A., WILSON, L. J. **Tower mill and its application to fine grinding,** *Minerals and Metallurgy Processing* Vol. 4, p. 45-50, 1987.

WESTERMANN, J. **Particle size distributions: dynamic image analysis beats laser diffraction in a micron to millimeter range.** G.I.T. Laboratory Journal Europe, n. 9/10, p. 39-41, 2010.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology,** Pergamon Press, Oxford, 4th ed., pp. 286-287, 1988.