



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



CECÍLIA DA CONCEIÇÃO RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DE MOINHO DE BOLAS UTILIZANDO O MÉTODO DO
BALANÇO POPULACIONAL**

**OURO PRETO
2019**

CECÍLIA DA CONCEIÇÃO RODRIGUES

**DIMENSIONAMENTO DE MOINHO DE BOLAS UTILIZANDO O MÉTODO DO
BALANÇO POPULACIONAL**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de Minérios

Orientador: Dr. Vladimir Kronemberger Alves

OURO PRETO

2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696d Rodrigues, Cecilia da Conceição.
Dimensionamento de moinho de bolas utilizando o método do balanço populacional. [manuscrito] / Cecilia da Conceição Rodrigues. - 2020.
57 f.: il.: color., gráf., tab..

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

1. Beneficiamento de minério - Moagem. 2. Modelos matemáticos. 3. Métodos de simulação. I. Alves, Vladimir Kronemberger . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 12 dias do mês de dezembro de 2019, às 16h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas DEMIN/EM, no Campus Universitário Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“DIMENSIONAMENTO DE MOINHO DE BOLAS UTILIZANDO O MÉTODO DO BALANÇO POPULACIONAL”**, pela aluna **Cecília da Conceição Rodrigues**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves (orientador)**, **Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira** e **Eng.º de Minas Anderson Fillipe Nascimento Batalha**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou pela **7.9.2.0.V.2.5.0** da candidata, com a nota **9.5**, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pela discente.

Ouro Preto, 12 de dezembro de 2019.

Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

Prof. Dr. Carlos Alberto Pereira
Membro da Comissão Avaliadora

Eng.º de Minas Anderson Fillipe Nascimento Batalha
Membro da Comissão Avaliadora

Cecília da Conceição Rodrigues

Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 492 – Trabalho de Conclusão de Curso

*À minha avó, Maria do Carmo, por ser exemplo
de fé e simplicidade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por guiar os meus passos e alimentar a minha alma com calma e esperança durante toda a jornada;

Ao meu orientador, Vladimir Kronemberger Alves, pelos ensinamentos transmitidos;

Aos professores, Carlos Alberto Pereira e Francielle Câmara Nogueira, pela amizade, carinho, conselhos e oportunidades oferecidas durante os anos de graduação;

À professora Érica Linhares Reis pela confiança depositada em mim;

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

À Fundação Gorceix, pelo apoio financeiro e cursos profissionalizantes;

À GAUSTEC, em especial à gestora e amiga Rafaella Bicalho da Rocha, pela oportunidade profissional e por não medir esforços para me direcionar na realização do estágio curricular. Aos companheiros de estágio, Bernardo, Vítor e Tonens, pela parceria de todos os dias e por me mostrarem que sempre temos algo a aprender;

Ao colega de curso, Tiago Sacramento, pela ajuda durante a realização da parte experimental;

Aos técnicos do Laboratório, Antônio Pedro e Mariana Andrade, pela amizade e suporte técnico;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Minas, em especial à Renata e ao Sr. Joaquim, por toda atenção e auxílio;

Às amigas, Maria Emília, Karina França, Silvana Dias, Tátima Mapa, Natália Duarte e Stephânia Nogueira, pelas orações e palavras de incentivo;

À minha querida amiga, Janaina, pela torcida e revisão do texto;

Às minhas irmãs, Silvana e Silmara, por sempre apoiarem minhas ideias e alimentarem os meus sonhos;

Aos meus pais, José e Maria, por cuidarem de mim com tanto amor e por serem meu porto seguro.

“O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes.”

Cora Coralina

RESUMO

A cominuição é a operação unitária responsável pelo maior gasto de energia e aporte de investimentos de uma instalação de tratamento de minérios. Diante disso, várias teorias já foram elaboradas e publicadas na tentativa de explicar a energia associada à etapa de fragmentação. O método de Bond tem sido muito utilizado pela indústria mineral nas últimas décadas para dimensionamento de instalações de moagem, pois pode ser determinado para uma grande variedade de minérios. Entretanto, devido às limitações do método, têm-se tentado compreender melhor este processo através da utilização de modelos cinéticos para moagem, baseados na teoria do balanço populacional. Esses modelos permitem realizar simulações com o objetivo de melhorar o desempenho ou mesmo projetar instalações industriais. Sabendo da importância desse assunto, desenvolveu-se este trabalho, que apresentou o dimensionamento de um moinho de bolas utilizando a técnica de modelagem matemática e simulação. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios da Universidade Federal de Ouro Preto, utilizando-se amostras de minério de ferro itabirítico. Primeiramente, foram realizados testes para caracterização física do minério, e, em seguida realizaram-se quatro testes de moagem a úmido, com duração de 30 s, 10 min, 20 min e 25 min, visando à determinação dos parâmetros que definem as funções quebra e seleção. A análise dos resultados foi feita com o auxílio do software Moly-Cop Tools e apontou que, em geral, houve aderência do modelo com os dados experimentais, indicando uma boa qualidade nos parâmetros cinéticos obtidos. Como resultado da simulação apresentou-se o dimensionamento de um moinho de bolas de 6,5 pés (1,98 m) de diâmetro e 9,5 pés (2,90 m) de comprimento, operando com 75% de sólidos, 70% da velocidade crítica e percentual de enchimento de carga de bolas igual a 30%. A alimentação do moinho foi de 1000 t/h, com 80% passante em 6108 μm e P_{80} igual a 150 μm . Observou-se que a utilização de modelos cinéticos representa um avanço na tecnologia de processos minerais, visto que eles permitem definir circuitos mais eficientes, potencializando o desempenho econômico do empreendimento.

Palavras-chave: Moagem. Modelos matemáticos. Método do balanço populacional. Simulação.

ABSTRACT

Comminution is the unit operation responsible for the largest energy expenditure and investment of an ore treatment facility. Given this, several theories have already been elaborated and published in an attempt to explain the energy associated with the fragmentation stage. The Bond method has been widely used by the mining industry in recent decades for sizing milling facilities as it can be determined for a wide variety of ores. However, because of the limitations of the method, an attempt has been made to better understand this process through the use of kinetic milling models based on population balance theory. These models allow simulations to be performed to improve performance or even design industrial installations. Knowing the importance of this subject, this work was developed, which presented the design of a ball mill using the technique of mathematical modeling and simulation. The experiments were conducted at the Ore Treatment Laboratory of the Federal University of Ouro Preto, using itabirite iron ore samples. Firstly, tests were performed for physical characterization of the ore, and then four wet grinding tests were performed, lasting 30 s, 10 min, 20 min and 25 min, aiming to determine the parameters that define the breaking and selection functions. The analysis of the results was made with the aid of Moly-Cop Tools software and pointed that, in general, there was adherence of the model with the experimental data, indicating a good quality in the obtained kinetic parameters. As a result of the simulation, the design of a 6.5 ft (1.98 m) diameter and 9.5 ft (2.90 m) long ball mill was designed with 75% solids, 70 % critical speed, 30% fill and 30% ball load fill percentage. The mill feed was 1000 t/h, with 80% passing at 6108 μm and P_{80} equal to 150 μm . It was observed that the use of kinetic models represents an advance in the technology of mineral processes, since they allow to define more efficient circuits, enhancing the economic performance of the enterprise.

Keywords: Grinding. Mathematical models. Population balance method. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da usina do Sossego.....	16
Figura 2 - Mecanismos de fratura e energia aplicada.....	17
Figura 3 - Distribuição dos fragmentos resultantes da quebra	18
Figura 4 - Razões de redução de moinhos	19
Figura 5 - Consumo energético x velocidade	19
Figura 6 - Aplicabilidade das teorias de cominuição	24
Figura 7 - Fragmentação e distribuição de fragmentos para um instante Δt	31
Figura 8 - Fluxograma de preparação das amostras de minério de ferro	34
Figura 9 - Moinho e carga de bolas utilizados nos testes	35
Figura 10 - Análise granulométrica da amostra de minério de ferro.....	38
Figura 11 - Análise granulométrica das amostras após moagem	39
Figura 12 - Estimativa dos parâmetros para o tempo de 30 s.....	40
Figura 13 - Estimativa dos parâmetros para o tempo de 10 min	41
Figura 14 - Estimativa de parâmetros para o tempo de 20 min.....	41
Figura 15 - Estimativa de parâmetros para o tempo de 25 min.....	42
Figura 16 - Dimensionamento do moinho industrial.....	43
Figura 17 - Resultados da simulação	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - WI (kWh/t) médio de alguns minérios e materiais.....	23
Tabela 2 - Fator de ineficiência do circuito aberto	25
Tabela 3 - Densidade aparente e real das amostras	38
Tabela 4 - Resultados de P ₈₀ determinados	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Cominuição de minérios.....	14
3.1.1 Operações de cominuição.....	14
3.1.2 Mecanismos de fragmentação.....	16
3.1.3 Moagem.....	18
3.2 Teorias clássicas da cominuição	20
3.2.1 Lei de Rittinger	20
3.2.2 Lei de Kick	21
3.2.3 Lei de Bond.....	21
3.2.4 Fatores de correção de Bond e Rolawland.....	24
3.3 Previsão da potência de moinhos	27
3.3.1 Moinhos de pequeno diâmetro	27
3.3.2 Moinhos industriais.....	28
3.4 Modelos matemáticos de cominuição.....	29
3.4.1 Modelo do balanço populacional.....	29
3.5 Estimação de parâmetros.....	32
3.5.1 Estimação de parâmetros por regressão não linear.....	32
3.6 Ferramentas de modelagem.....	33
4 METODOLOGIA.....	34
4.1 Preparação da amostra de minério de ferro	34
4.2 Caracterização das amostras	35
4.3 Condições dos ensaios de moagem a úmido	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 Caracterização tecnológica das amostras.....	38
5.1.1 Análise granulométrica	38
5.1.2 Medidas de densidade aparente e real	38
5.2 Ensaios de moagem.....	39
5.3 Parâmetros de quebra	39
5.4 Modelamento.....	40
5.5 Dimensionamento do moinho industrial	42
6 CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE A - Estimação dos parâmetros cinéticos em laboratório.....	51

APÊNDICE B - Arquivos de dados para estimação dos parâmetros cinéticos	52
APÊNDICE C - Moagem 1	53
APÊNDICE D - Moagem 2	54
APÊNDICE E - Moagem 3	55
APÊNDICE F - Moagem 4.....	56
APÊNDICE G - Distribuição granulométrica da alimentação do moinho industrial.....	57

1 INTRODUÇÃO

A moagem é de extrema importância no processamento de minérios. Todavia, é responsável pela maior parcela de consumo de energia, visto que uma parcela desta é utilizada de fato na fragmentação do material e a outra é absorvida pelos equipamentos. Portanto, há um grande interesse das indústrias minerais em estudar a fragmentação, visando melhorias na operação de forma a viabilizar e sustentar empreendimentos mineiros.

O método de Bond tem sido muito utilizado pela indústria mineral nas últimas décadas para dimensionamento de novas instalações de moagem e otimização de circuitos de moagem em operação. Contudo, esse método apresenta algumas limitações, tais como: é aplicado para parâmetros e condições pré-estabelecidas por Bond, o consumo energético calculado não prevê a distribuição granulométrica completa do produto e não é possível analisar a interação entre as diferentes unidades do circuito (GOMES *et al.*, 2014).

Ao longo dos últimos anos, a simulação matemática tornou-se uma técnica reconhecida e aplicada em projetos de dimensionamento e melhoria de desempenho de circuitos de moagem em moinho de bolas. A grande vantagem da simulação é a sua capacidade de avaliar o desempenho global de circuitos integrados de cominuição. Além disso, a simulação fornece detalhes completos do circuito, incluindo distribuições granulométricas, vazões de sólidos e de água (ROCHA, 2013).

Os modelos matemáticos, baseados na equação do balanço populacional, são os mais utilizados para a simulação de circuitos de moagem. Esse tipo de modelo é baseado em dois parâmetros que definem as funções quebra e seleção. A determinação dos parâmetros é geralmente baseada em ensaios de moagem de batelada em condições similares às da moagem industrial (MONTENEGRO *et al.*, 2015).

Atualmente, a simulação é implantada de maneira significativa no tratamento de minérios, porém o processo ainda possui aplicação limitada devido à natureza dos modelos matemáticos e à complexidade dos fenômenos envolvidos. Esse fato motivou o desenvolvimento deste trabalho, que teve como objetivo o dimensionamento de um moinho industrial, a partir de modelagem matemática e simulação.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi dimensionar um moinho de bolas utilizando a técnica de modelagem matemática e simulação.

Para tanto, os objetivos específicos foram:

- a) determinar os parâmetros de quebra, por meio de moagem experimental da amostra de minério em diferentes tempos;
- b) determinar as funções quebra e seleção;
- c) dimensionar um circuito de moagem de bolas industrial.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura relacionada aos temas relevantes do trabalho de conclusão de curso. Serão tratados conceitos pertinentes à fragmentação de minérios, aos modelos matemáticos existentes, às limitações no dimensionamento de moinhos e às alternativas para minimizar esses problemas.

3.1 Cominuição de minérios

A definição da rota de concentração de um bem mineral deve considerar as espécies minerais que constituem o minério, a granulometria requerida ao processo de concentração utilizado e, principalmente, a liberação das partículas dos minerais úteis. Por outro lado, durante a operação de fragmentação, ocorre o maior gasto de energia do processamento de minérios, o que gera a necessidade de otimização da taxa de produção e dos custos da cominuição.

Segundo Chaves e Peres (2006), o processo de cominuição de minérios consiste em reduções de tamanhos de partículas minerais, de modo a se obter uma granulometria adequada à processos subsequentes, evitando a geração excessiva de finos. Beraldo (1987) afirma que a cominuição pode atender a vários objetivos, tais como:

- a) produzir partículas de um dado tamanho ou forma para permitir a obtenção de produtos comerciais como produção de agregados para a construção civil;
- b) liberar o mineral-minério dos minerais de ganga de maneira que eles possam ser posteriormente concentrados;
- c) aumentar a área superficial específica dos minerais de um minério, promovendo uma velocidade adequada de reação química em processos hidrometalúrgicos.

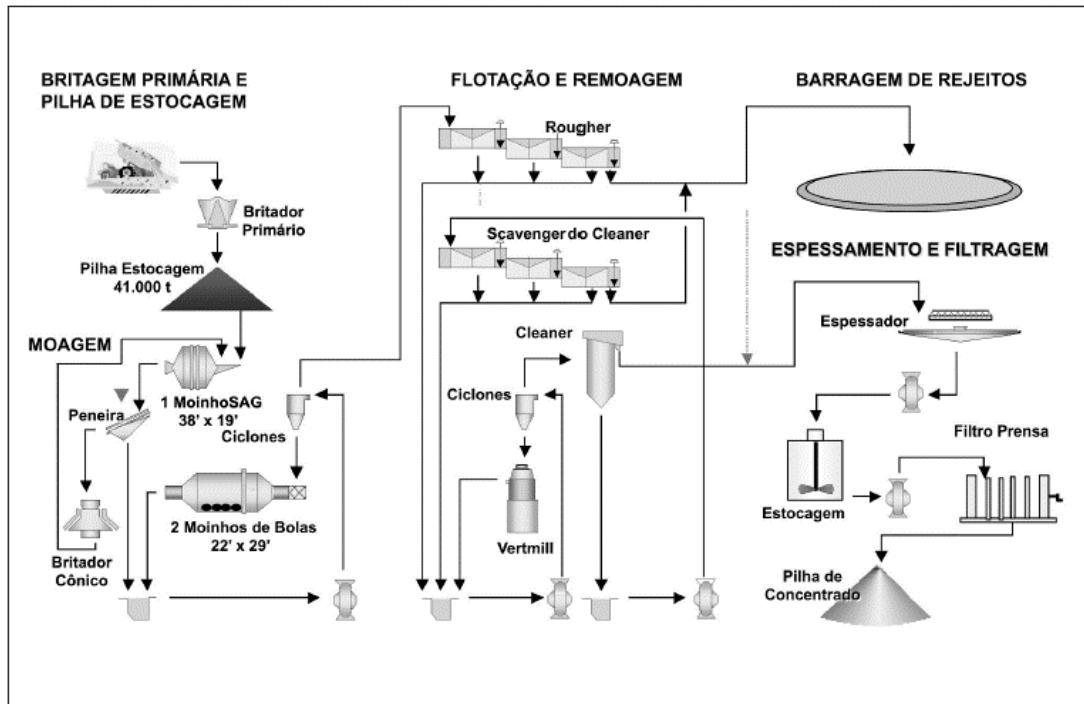
3.1.1 Operações de cominuição

De acordo com Sampaio e Júnior (2018), na britagem são envolvidos equipamentos robustos e forças elevadas para que ocorra a cominuição. Chaves e Peres (2006) ressaltam que a relação de redução de britadores é geralmente menor comparada à moagem. Portanto, é comum a existência de etapas sucessivas de britagem. A operação de moagem possui relações de redução maiores e, por isso, possui menor número de estágios.

Com o objetivo de desenvolver equipamentos com capacidades mais altas e com potencial para melhores recuperações, diversas tecnologias têm sido estudadas e aprimoradas no processamento mineral. Dentre os equipamentos em destaque, encontra-se a prensa de rolos (PR) ou *high pressure grinding rolls* (HPGR), que consiste em dois rolos girando em sentidos opostos: um deles gira sobre um eixo fixo, enquanto o outro se movimenta linearmente (DANIEL, 2002 *apud* CAMPOS *et al.*; 2017). De acordo com Campos *et al.* (2017), na cominuição de minério de ferro, especificamente, a prensa de rolos foi aplicada com sucesso na britagem grosseira e na remoagem previamente à pelotização em diversas usinas no Brasil e no mundo.

Os estágios de cominuição podem ser realizados em circuito aberto ou fechado, sendo que as operações em circuito fechado apresentam maior eficiência. Para o fechamento do circuito, são utilizados equipamentos de classificação, principalmente peneiras e hidrociclones. Pode-se, ainda, realizar a cominuição a seco ou a úmido, a depender das características do material e da necessidade do processo. Geralmente, a britagem é realizada a seco, enquanto a moagem é conduzida a úmido (BERALDO, 1987; GALÉRY *et al.*, 2007). A Figura 1 ilustra o fluxograma da usina do Sossego, envolvendo estágios de britagem e moagem.

Figura 1 - Fluxograma da usina do Sossego



Fonte: Bergerman *et al.* (2009).

3.1.2 Mecanismos de fragmentação

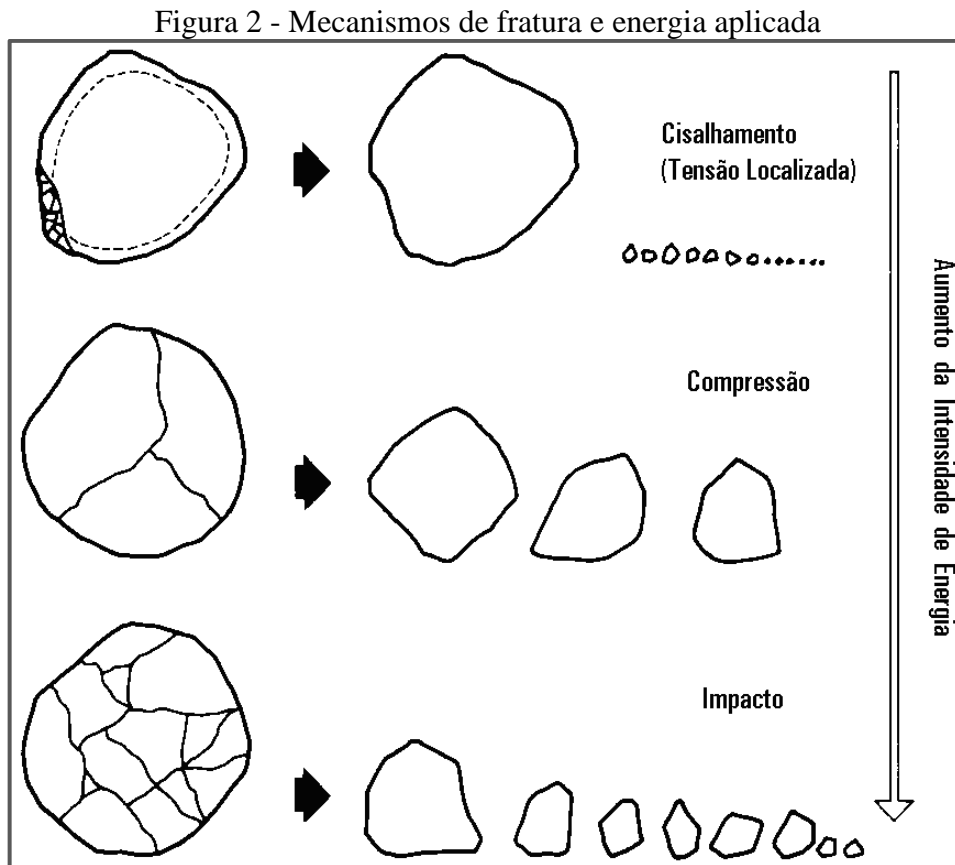
Autores como Kelly e Spottiswood (1982); Wills e Napier-Munn (2006) consideram que existem três principais mecanismos distintos presentes no processo de cominuição: compressão, impacto e abrasão ou cisalhamento. Esses mecanismos podem ocorrer isoladamente ou em conjunto, dependendo do equipamento utilizado para a operação. Segundo Galéry (2002), a distribuição característica do produto de fragmentação depende tanto das forças de coesão interna das partículas, quanto da forma de energia e da intensidade com que essas forças forem aplicadas.

Na compressão, há uma propagação lenta do esforço sobre o fragmento de rocha, o que causa fraturas no sólido e posterior fragmentação. Os produtos resultantes dessa ação possuem uma faixa de tamanho relativamente fina e outra grossa, que é a de maior proporção. Geralmente, esse mecanismo ocorre em equipamentos como britadores de mandíbulas, giratórios ou cônicos (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Quanto ao mecanismo de impacto, Sampaio e Júnior (2018) abordam que ele gera esforços rápidos e com intensidade superior à resistência da partícula à fragmentação. Essas partículas,

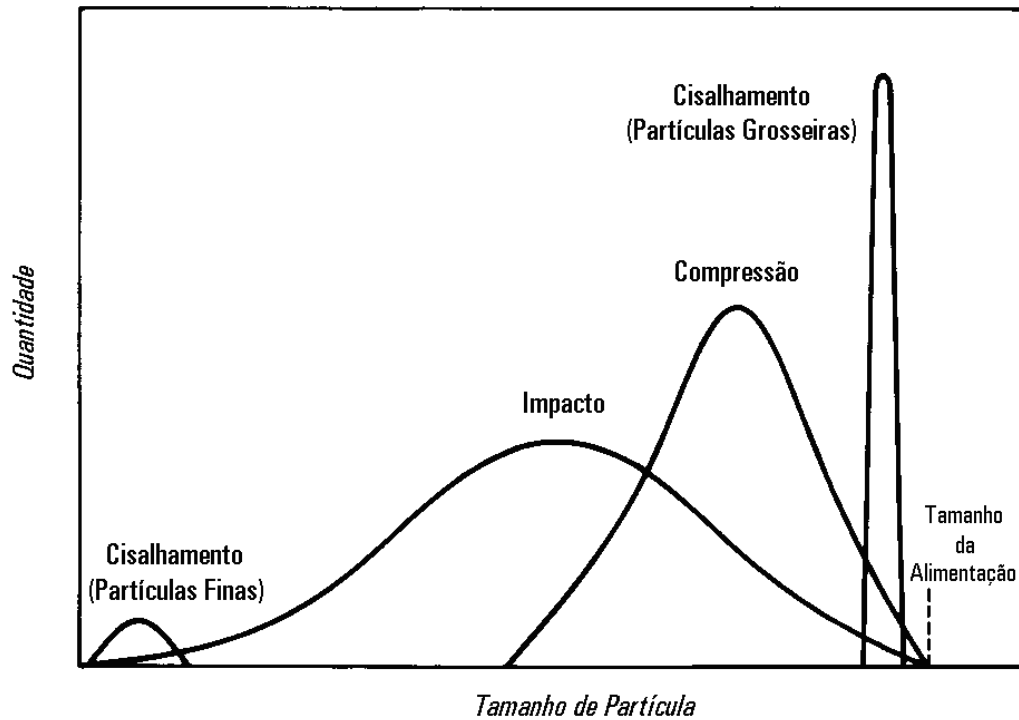
comumente, absorvem mais energia do que aquela necessária à fratura simples e fragmentam-se. O produto resultante da quebra possui tamanho e forma semelhantes, predominando a granulometria fina.

No mecanismo de abrasão, surgem pequenas fraturas devido a concentração local de esforços, pois a força é insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Esse tipo de fratura pode ser provocado pelo atrito entre as partículas ou por atrito dos corpos moedores com as partículas (GALÉRY, 2002). As Figuras 2 e 3 ilustram, esquematicamente, os três mecanismos de quebra e a distribuição granulométrica dos produtos.



Fonte: Kelly e Spottiswood (1982).

Figura 3 - Distribuição dos fragmentos resultantes da quebra

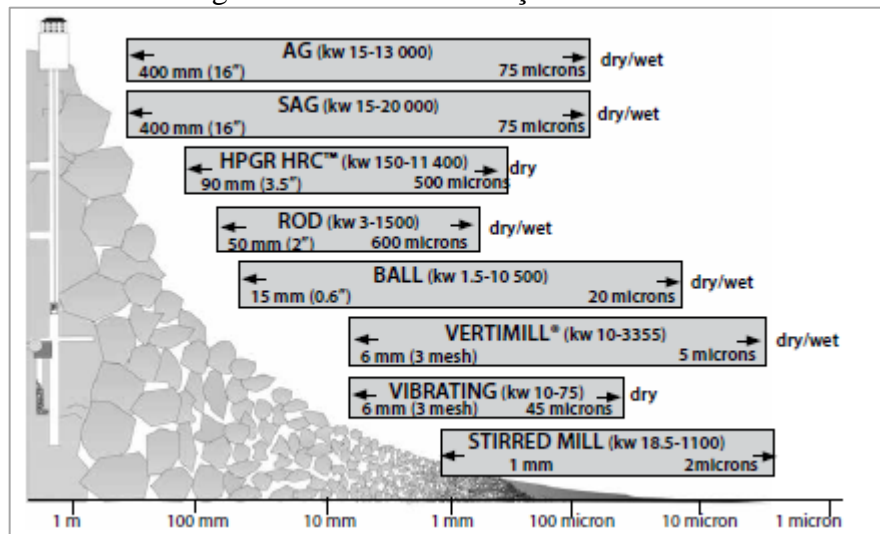


Fonte: Kelly e Spottiswood (1982).

3.1.3 Moagem

A moagem é o último estágio do processo de fragmentação e compreende as operações de cominuição com razão de redução de até 2,0 micrômetros (μm), conforme ilustra a Figura 4. Cada minério tem uma malha ótima para ser moído, a depender do objetivo final e do processo de beneficiamento que será utilizado em seguida. Os moinhos são fabricados com relações de comprimento/diâmetro de acordo com a granulometria do produto final, taxa de alimentação e parâmetros de quebra. A carga pode ser formada por bolas, *cylpebs*, seixos ou pelo próprio minério (FIGUEIRA *et al.*, 2010).

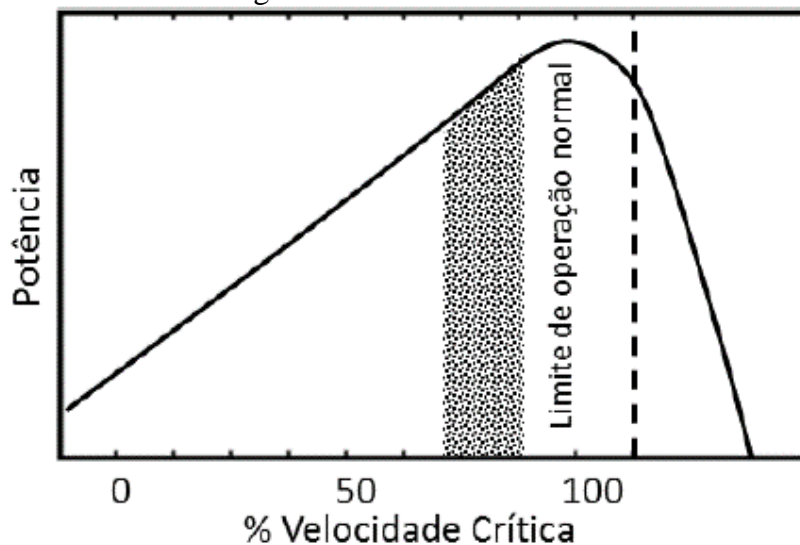
Figura 4 - Razões de redução de moinhos



Fonte: Metso (2018).

As principais variáveis operacionais dos moinhos são a velocidade de rotação, a porcentagem de sólidos da polpa alimentada e a quantidade de corpos moedores carregada ao moinho. De acordo com Wills e Napier-Munn (2006), a velocidade de operação de um moinho é sempre referida à porcentagem de sua velocidade crítica. Industrialmente, os moinhos podem operar com velocidades de 40 a 80% da sua velocidade crítica e a escolha é determinada pelas condições econômicas, pois operando dentro da faixa usual, tem-se menor consumo de energia, menor desgaste no revestimento interno e maior durabilidade das bolas. Na Figura 5, pode-se ver o efeito da relação entre % da velocidade crítica e da potência consumida no moinho

Figura 5 - Potência x velocidade



Fonte: Adaptado de Foreman (1979) *apud* Chaves e Peres (2006).

A maior capacidade do moinho ocorre para um fator de enchimento de 50%. Entretanto, o valor deve ser definido de acordo com o tipo de moinho e o tipo de descarga. Os valores usuais de fator de enchimento para moinhos de bolas estão entre 28 e 55%. Em geral, moinhos semi-autógenos operam com até 16% de bolas (BERGERMAN, 2009; FIGUEIRA *et al.*, 2010).

Ao longo dos anos, os circuitos fechados de moagem de minérios com moinho de bolas e ciclones se tornaram um padrão da indústria. Entretanto, essa moagem tem evoluído na direção de circuitos em duas etapas: uma que considera moinhos semi-autógenos (SAG) para a moagem primária, e outra moinhos de bolas, como etapa secundária ou moagem fina (PINTO, 2016).

Ainda, segundo Miranda *et al.* (2015), e dentre as tecnologias recentemente estudadas, existem os moinhos de carga agitada por impelidores horizontais e verticais, que apresentaram grande potencial para moagem secundária. Nesse moinho, a movimentação da carga é imposta por “agitadores” ou impelidores internos, enquanto a parte cilíndrica não se move. O equipamento mais difundido no Brasil com esta tecnologia é o Vertimill®, atualmente fabricado pela Metso Minerals. Apesar do maior custo de capital, o moinho vertical pode resultar em uma redução do consumo de energia da ordem de 20%. Além disso, a área ocupada pelos moinhos verticais também é significativamente menor, se comparada a um circuito com moinho tubular de bolas.

3.2 Teorias clássicas da cominuição

Ao longo dos anos, a relação entre energia consumida no processo de cominuição e a granulometria dos produtos foi amplamente estudada, uma vez que o alto custo energético e os esforços mecânicos, os quais os equipamentos são submetidos modulam os custos de operação. Os primeiros estudos realizados demonstraram as dificuldades de se relacionar de maneira prática e satisfatória a energia associada a etapa de fragmentação.

3.2.1 Lei de Rittinger

Rittinger (1867) publicou a primeira teoria correlacionando o consumo energético e a nova superfície gerada pela fragmentação, determinando que a relação entre a energia específica consumida e a superfície específica gerada por unidade de volume é diretamente proporcional à nova superfície gerada, conforme está representado na Equação 1.

$$E = K_R \cdot \left(\frac{1}{d_p} - \frac{1}{d_f} \right) \quad (1)$$

Em que:

E = energia específica total fornecida ao sistema;

K_R = constante de Rittinger;

d_p = diâmetro da partícula no produto;

d_f = diâmetro da partícula na alimentação.

3.2.2 Lei de Kick

A segunda lei da cominuição foi proposta por Kick (1883). Segundo ele, se o minério é homogêneo, a energia dissipada na quebra da partícula é proporcional à redução de volume das partículas fragmentadas. Essa relação matemática está expressa pela Equação 2.

$$E = K_k \cdot \ln \left(\frac{d_f}{d_p} \right) \quad (2)$$

Em que:

E = energia específica dissipada na quebra da partícula;

K_k = constante de Kick.

Ressalta-se que nenhuma das leis citadas abrangem a fragmentação de maneira geral, visto que a lei de Rittinger é válida para etapas de moagem cujo produto seja bastante fino (remoagem), enquanto que a teoria de Kick é restrita a operações de fragmentação de grossos, comuns nas operações de britagem. Ademais, uma das limitações do postulado de Kick, ainda, consiste no pressuposto de que a cominuição das partículas ocorre de forma homogênea, o que não se verifica na prática (SAMPAIO; JÚNIOR, 2018).

3.2.3 Lei de Bond

Bond (1952), com a finalidade de abranger todos os casos encontrados na prática, definiu uma lei empírica em que a energia necessária para quebrar partículas é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho das partículas, multiplicada por um índice característico do minério,

denominado *Work index* (WI). Este corresponde à energia total, expressa em kWh por tonelada, necessária para reduzir o minério, desde um tamanho teoricamente infinito, até 80% passante em 106 µm. A lei definida por Bond está expressa na Equação 3 e o valor do WI é calculado de acordo com a Equação 4.

$$W = WI \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{A_{80}}} \right) \quad (3)$$

Em que:

W = energia requerida para moagem (kWh/t);

WI = índice de trabalho do minério (*work index*), calculado por meio de ensaio padronizado de laboratório (kWh/t);

P₈₀ = abertura da malha em µm, da qual passam 80% do produto moído;

A₈₀ = abertura da malha em µm, da qual passam 80% da alimentação.

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} Mob^{0,82} \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{A_{80}}} \right]} \times 1,1 \quad (4)$$

Em que:

WI = índice de trabalho em kWh/t;

Am = abertura da malha teste de classificação em µm;

P₈₀ = abertura da peneira onde passam 80% da massa do produto, em µm;

A₈₀ = abertura da peneira onde passam 80% da massa da alimentação, em µm;

Mob = Índice de moabilidade;

1,1 = fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica.

Na Tabela 1, estão apresentados os valores típicos de WI de alguns minerais e minérios para moinhos de bolas.

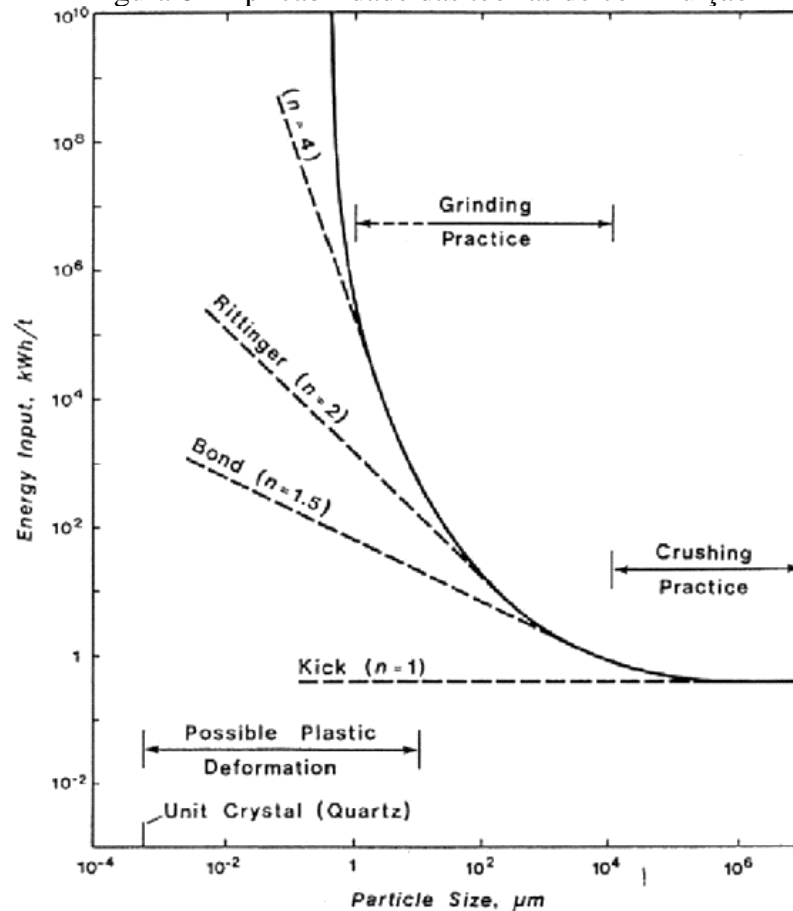
Tabela 1 - WI (kWh/t) médio de alguns minérios e materiais

Moinho de bolas			
	Nº de testes	Média	Limite
Alumina	6	19,7	7,7-37,5
Coque	4	36,9	31,9-44,1
Bauxita	29	16,0	1,10-34,2
Minério de cromo	5	14,8	7,7-18,7
Minério de cobre	9	10,8	5,51-15,4
Carvão	6	17,0	14,3-19,8
Dolomita	5	15,3	6,61-27,6
Ferro-sílica	8	19,7	6,61-56,2
Minério de ouro	183	16,1	3,3-46,3
Hematita	116	12,2	2,2-34,2
Minério de chumbo-zinco	58	13,8	7,7-28,7
Minério de manganês	19	15,3	6,61-25,4
Minério de níquel	39	13,8	2,20-26,5
Rochas fosfáticas	36	15,0	3,3-27,6
Arenito	8	30,2	17,6-41,9
Minério de estanho	12	13,0	11,0-15,4
Ferro-manganês	5	8,7	5,5-15,4
Minério de ferro	118	13,7	4,41-34,2
Minério de zinco	9	12,0	6,61-17,6

Fonte: Modificado de Rowland (1982) *apud* Beraldo (1987).

Em seus estudos sobre as leis da cominuição, Hukki (1961) destacou que elas tinham aplicações a determinados intervalos granulométricos, discorrendo que a Lei de Bond seria aplicável ao intervalo granulométrico em que geralmente se desenvolve a operação de moagem de minério. A Figura 6 representa a relação entre o consumo de energia da cominuição em função da granulometria do produto.

Figura 6 - Aplicabilidade das teorias de cominuição



Fonte: Hukki (1961).

3.2.4 Fatores de correção de Bond e Rolawland

O método de Bond, embora possua grande aplicabilidade, é limitado a moinho de bolas do tipo *overflow*, de diâmetro interno de 2,44 m, moagem via úmida em circuito fechado, com carga circulante de 250% e, ainda, é um método válido para moinhos de barras, se operarem em circuito aberto. Diante disso, Bond (1983) desenvolveu fatores de eficiência, os quais foram complementados por Rowland (1983), para correção da potência necessária aos moinhos e validade dos valores de WI determinados em laboratório, quando se estuda circuitos que diferem das condições pré-determinadas.

No que tange à moagem realizada a seco, os autores propuseram usar o fator igual a 1,3 (EF_1), visto que ela possui menor eficiência que a moagem a úmido.

Nos casos em que a moagem for realizada em moinhos de bolas em circuito aberto, são geradas curvas de distribuição granulométrica diferentes da especificação dos produtos em circuito fechado. Assim, o fator de ineficiência (EF_2) é determinado pela porcentagem passante na malha de controle, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Fator de ineficiência do circuito aberto

Controle do produto % passante na malha de referência (μm)	Fator de ineficiência
50	1,035
60	1,05
70	1,10
80	1,20
90	1,40
92	1,46
95	1,57
98	1,70

Fonte: Rowland (1983).

Quanto ao diâmetro interno (D), se for diferente de 2,44 m, deve-se multiplicar o valor de WI pelo fator EF_3 . Todavia, deve-se considerar que a eficiência dos moinhos cresce com o aumento do diâmetro até o limite de 3,81 m, valor a partir do qual a eficiência se mantém. O fator EF_3 está expresso pela Equação 5.

$$EF_3 = \left(\frac{2,44}{D}\right)^{0,2} \quad (5)$$

Além dos fatores mencionados, destacam-se, também, outros que devem ser considerados.

O fator de oversize (EF_4) - deve ser aplicado quando a alimentação contém partículas muito grandes para serem moídas de maneira eficiente e pode ser empregado tanto no moinho de barras quanto no de bolas. O tamanho ótimo de alimentação para o moinho de barras é definido pela Equação 6, e para o moinho de bolas, pela Equação 7. Destaca-se que, se F_{80} for menor que F_o , F_4 não é aplicado.

$$F_o = 16.000 \left(\frac{13}{WI}\right)^{0,5} \quad (6)$$

$$F_o = 4.000 \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Após o cálculo do tamanho ótimo, é possível determinar o fator EF_4 , o qual está representado pela Equação 8.

$$EF_4 = \frac{R_r + (WI - 7) \left(\frac{F - F_o}{F_o} \right)}{R_r} \quad (8)$$

Define-se a relação de redução pela Equação 9.

$$R_r = \frac{F_{80}}{P_{80}} \quad (9)$$

O EF_5 está relacionado à energia adicional para moagens extremamente finas (P_{80} menor que $74 \mu\text{m}$) e para determiná-lo, utiliza-se a Equação 10.

$$EF_5 = \frac{P_{80} + 10,3}{1,145 P_{80}} \quad (10)$$

O fator EF_6 deve ser aplicado sempre que a relação de redução (R_r) estiver fora do intervalo $R_{ro} - 2 \leq R_r \leq R_{ro} + 2$, sendo que o R_{ro} é uma relação de redução ótima do moinho de barras, representado pela Equação 11

$$R_{ro} = 8 + \frac{5L}{D} \quad (11)$$

Em que:

L = comprimento das barras;

D = diâmetro interno ao revestimento.

Para o cálculo do fator de eficiência, tem-se a equação 12.

$$EF_6 = 1 + \frac{(R_r - R_{ro})^2}{150} \quad (12)$$

Peres e Machado (1988) consideram que se deve adotar EF_6 igual a 1,2, caso o valor de WI seja inferior a 7,7 KWh/t, pois, do contrário, haveria um superdimensionamento.

O fator EF_7 é dado pela Equação 13 e deve ser utilizado se a relação de redução de um moinho de bolas é inferior a 6.

$$EF_7 = \frac{2(R_r - 1,35) + 0,26}{2(R_r - 1,35)} \quad (13)$$

O fator EF_8 está relacionado à ineficiência dos moinhos de barras (atuando sozinho ou em conjunto) e é empregado para compensar a diferença entre as potências calculadas pela fórmula e as consumidas na realidade.

a) Moinho de barras sozinho no circuito de moagem

$EF_8 = 1,4$, se a alimentação vem de um circuito aberto de britagem;

$EF_8 = 1,2$, se a alimentação vem de um circuito fechado de britagem.

b) Moinho de barras operando em conjunto com moinho de bolas, sem classificação entre ambos

$EF_8 = 1,2$, se a alimentação vem de um circuito aberto de britagem;

$EF_8 = 1,0$, se a alimentação vem de um circuito fechado de britagem e se ela tiver

$F_{80} \leq 1/2$ ".

3.3 Previsão da potência de moinhos

3.3.1 Moinhos de pequeno diâmetro

Rowland (1986) estudou uma série de fatores de escalonamento entre moinhos de pequeno diâmetro. O pesquisador estabeleceu uma equação para determinar a potência de moinhos de bolas que apresentam diâmetro menor que 2,44 m (Equação 14). O cálculo leva em consideração o ângulo de repouso da carga, de tal forma que determina-se a potência absorvida por tonelada de corpos moedores. Multiplicando-se este valor pelo peso da carga, determina-se a potência absorvida no pinhão do moinho.

$$kWb = 6,3 \times D^{0,3} \times \text{sen} \left(51 - 22 \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right) \times (3,2 - 3V_p) \times C_s \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right) \quad (14)$$

Em que:

kWb = kilowatts por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

D = diâmetro do moinho, em metros, interno ao revestimento;

V_p = fração do volume do moinho ocupada pelas bolas;

C_s = fração da velocidade crítica.

3.3.2 Moinhos industriais

Diversos pesquisadores apresentaram diferentes equações para o cálculo da potência de moinhos industriais. Dentre eles, Rowland (1983) e Bond (1983). Ambos determinaram que a potência de moinhos industriais pode ser obtida de forma efetiva por meio de uma equação (Equação 15), multiplicando-se o valor de KWB pelo peso da carga de bolas (T), representado pela Equação 16.

$$KWB = 4,879 \times D^{0,3} \times (3,2 - 3V_p) \times C_s \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10)}} \times C_s\right) + S_s \quad (15)$$

Em que:

KWB = potência consumida por moinho de bolas, por tonelada de bolas, kWh/t de carga;

D = diâmetro interno do moinho, em m;

V_p = fração do volume do moinho ocupado pelas bolas;

C_s = fração da velocidade crítica;

S_s = fator de correção para o tamanho das bolas. Para moinhos maiores que 3,3 m de diâmetro, o tamanho das bolas afeta o consumo de potência, de acordo com a expressão:

$$S_s = 1,103 \times \frac{(B - 12,5 \times D)}{50,8}$$

Em que:

B = diâmetro máximo das bolas, em mm;

S_s = só deve ser considerado quando o diâmetro das bolas for menor que 1/80 do diâmetro do moinho.

$$T = 0,785 \times D^2 \times L \times \rho \times V \quad (16)$$

Em que:

T = carga de corpos moedores, em kg;

D = diâmetro médio do moinho interno ao revestimento, em m;

ρ = densidade aparente da carga, em gg/m^3 ;

V = volume da carga, em fração.

3.4 Modelos matemáticos de cominuição

De acordo com Souza (2014), um modelo matemático deve representar um sistema e a forma como ocorrem as modificações no mesmo. Geralmente, consiste em um conjunto de equações, que são resolvidas em função de alguns valores conhecidos ou previstos pelo modelo real e que podem ser testadas através da comparação com os dados conhecidos ou calculados.

Ao longo dos últimos anos, vários estudos têm sido realizados em relação à formulação e verificação empírica de relações matemáticas teóricas que caracterizem a cinética de fraturamento das partículas e a relação entre os parâmetros dos modelos e as variáveis operacionais. Segundo Nunes (2012), os modelos para moagem são classificados principalmente em fenomenológicos e fundamentais. O primeiro grupo considera a cominuição como um elemento de transformação entre a granulometria da alimentação e do produto. Já o segundo, contempla todos os elementos dentro do processo, estudando as interações entre as partículas e os elementos do moinho.

3.4.1 Modelo do balanço populacional

O modelo do balanço populacional, inicialmente proposto por Epstein (1947) e estudado por diversos autores, descreve o processo de moagem através de eventos sucessivos de quebra das partículas em determinado intervalo de tempo. Cada um dos subprocessos da moagem (fragmentação do material, redistribuição dos fragmentos, transporte e classificação das partículas dentro do moinho) é representado por equações descritivas. Austin *et al.* (1984) descreve o modelo do balanço populacional para a moagem em batelada, ilustrada pela Equação 17.

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

Em que:

$m_i(t)$ = fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho i após o tempo t de moagem;

S_i = função seleção das partículas no intervalo de tamanho i ;

b_{ij} = função quebra ou fração em massa de partículas no intervalo de tamanho i produzidas pela quebra de partículas no intervalo de tamanho j .

A Equação 18 exprime um modelo para descrever a função seleção (AUSTIN *et al.*, 1984). Os parâmetros α_0 , α_1 , α_2 , d_{crit} correspondem às constantes dependentes do material e das condições de moagem.

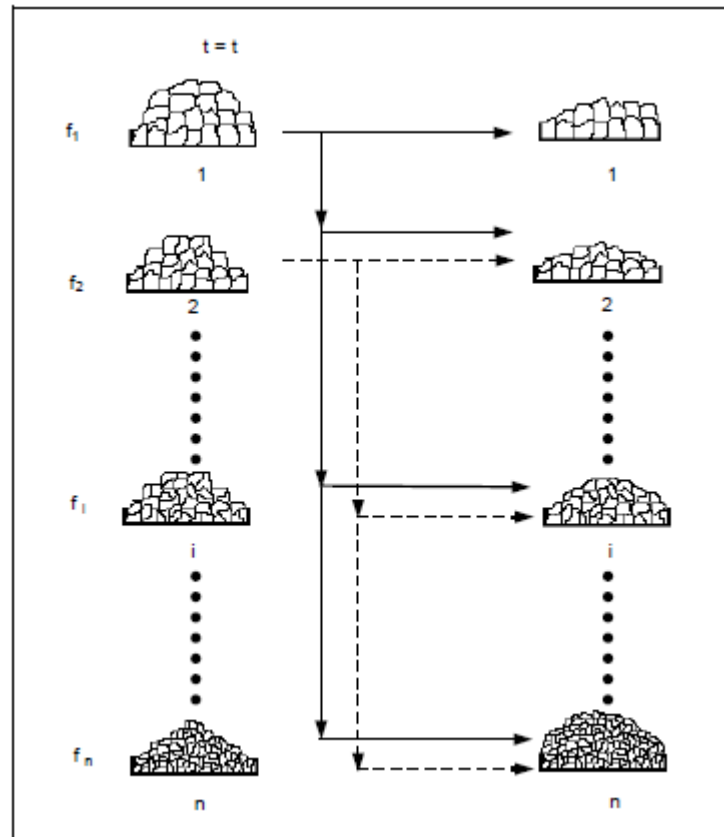
$$S_i = \frac{\alpha_0 (d_i)^{\alpha_1}}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{crit}}\right)^{\alpha_2}} \quad \alpha_2 \geq 0 \quad (18)$$

Apresenta-se na Equação 19 um modelo para descrever a função quebra acumulada (AUSTIN *et al.*, 1984). Os parâmetros β_0 , β_1 , β_2 correspondem as constantes dependentes das características do material.

$$B_{i,j} = \beta_0 \left(\frac{d_i}{d_{j+1}}\right)^{\beta_1} + (1 - \beta_0) \left(\frac{d_i}{d_{j+1}}\right)^{\beta_2} \quad 0 \leq \beta_0 \leq 1 \quad (19)$$

Os eventos de fratura presentes na função seleção e função quebra estão representados esquematicamente na Figura 7.

Figura 7 - Fragmentação e distribuição de fragmentos para um instante Δt



Fonte: Alves (2006).

Segundo Herbst-Fuerstenau (1980), a função seleção (S_i) apresenta uma relação de proporcionalidade com a potência absorvida pelo moinho e a massa contida neste, conforme a Equação 20.

$$S_i = S_i^E \left(\frac{P}{H} \right) \quad (20)$$

Em que:

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

S_i^E = função seleção específica em energia, em t/kWh ;

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

P = potência líquida gasta na moagem, em kW.

Resumidamente, a taxa específica do moinho de laboratório é igual a taxa específica do moinho industrial, e o escalonamento é feito pela relação de potência específica da função seleção, que

é mantida constante para qualquer diâmetro de moinho e independente do sistema ser contínuo ou em batelada (SCHNEIDER; DUQUE, 2015).

3.5 Estimação de parâmetros

Para utilizar os modelos de fragmentação citados, são necessárias técnicas de experimentação e análise de dados, objetivando estimar valores dos parâmetros envolvidos no modelo, e, além disso, escalonar esses valores a outras condições operacionais e dimensionamentos. As técnicas mais utilizadas são: realização de ensaios em laboratório com moinho de torque, estimação de parâmetros por regressão não linear e estimação de parâmetros com modelo simplificado (ALVES, 2006).

3.5.1 Estimação de parâmetros por regressão não linear

De acordo com Mazucheli e Achcar (2002), os modelos de regressão se dividem em duas classes distintas: lineares e não-lineares. A principal diferença entre os modelos está relacionada às suas formulações. No caso linear, a partir de um conjunto de observações, busca-se o modelo que melhor explique a relação, caso exista alguma, entre as variáveis inerentes a um dado fenômeno. Já no caso não linear, na maioria das vezes, as formulações de possíveis modelos são baseadas em considerações teóricas inerentes ao fenômeno que se tem interesse em modelar.

Segundo Sepúlveda (2001), a determinação dos parâmetros correspondentes as funções seleção e quebra é possível partir de resultados em escala industrial, mediante técnicas de regressão não linear. Os valores de $(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, d_{crit})$ e $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$ são determinados de tal forma que a função objetivo seja mínima, conforme Equação 21.

$$\phi = \sum_{i=1}^n w_i (F_i - \widehat{F}_i)^2 \quad (21)$$

Em que:

F_i = granulometria da descarga do moinho medida experimentalmente;

\widehat{F}_i = representa a mesma granulometria segundo a previsão do modelo;

w_i = fator de ponderação relativo das distintas medidas.

3.6 Ferramentas de modelagem

Atualmente, existem diversas ferramentas de modelagem matemática no mercado. Dentre elas, o *software* Moly-Cop Tools se destaca por ser uma ferramenta simples, que possibilita simulações a partir de ensaios em laboratório, com pequenas amostras de minérios. O programa compreende um conjunto de planilhas do Microsoft Excel, projetadas para caracterizar e avaliar a eficiência operacional de circuitos simplificados de moagem de minérios. Essas planilhas fornecem um algoritmo eficiente para identificar um dado conjunto de valores de parâmetros que melhor se aproximam da resposta do modelo com as medições experimentais reais, disponíveis com base em um modelo típico não linear (SILVA 2014).

4 METODOLOGIA

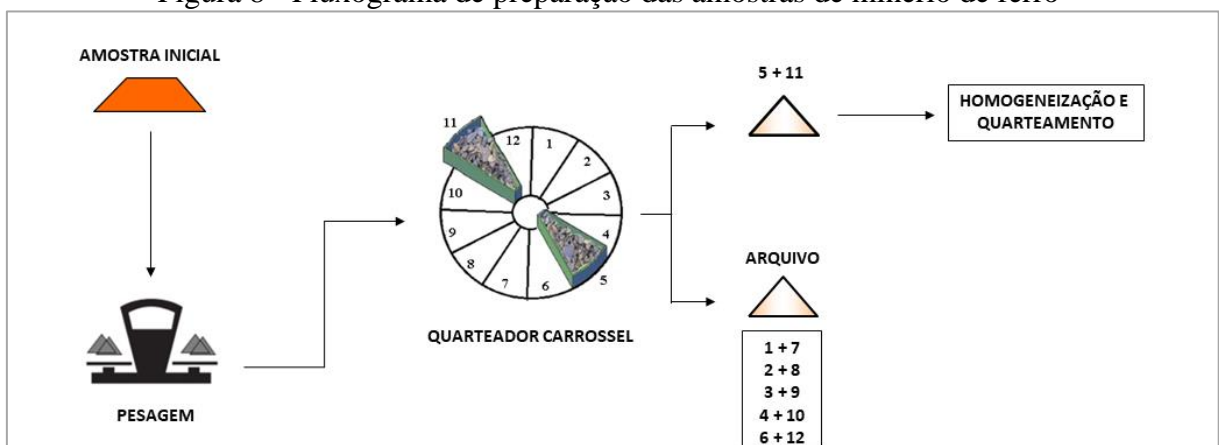
Neste capítulo, estão apresentados os procedimentos experimentais realizados no trabalho de conclusão de curso, os quais foram desenvolvidos no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Os testes realizados incluem caracterização da amostra de minério de ferro e ensaios de moagem a úmido em diferentes tempos.

4.1 Preparação da amostra de minério de ferro

Para os ensaios realizados neste trabalho, foi utilizada uma amostra de minério de ferro itabirítico, cedida por uma mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, que foi, também, a responsável pela amostragem. Esta foi conduzida de forma a garantir a representatividade do minério. A massa total do material recebido foi de 272,0 kg.

Na primeira etapa do processo de preparação, dividiu-se a amostra inicial em um quarteador do tipo carrossel, formando 12 amostras. Em seguida, foram unidas as massas contidas nos recipientes diametralmente opostos no carrossel. A partir dessa amostra, foram realizadas etapas de homogeneização e quarteamento em pilhas cônicas, obtendo-se amostras com massa suficiente para as fases de caracterização e ensaios de moagem, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma de preparação das amostras de minério de ferro



4.2 Caracterização das amostras

Para caracterização da amostra, foi realizada uma análise granulométrica a úmido, segundo a série Tyler, na faixa de tamanho compreendida entre 3350 μm à 38 μm . O teste para determinação da densidade relativa foi realizado utilizando-se um picnômetro de volume igual a 50 ml, uma balança de precisão e água aquecida a uma temperatura de 40 °C. Além da densidade relativa, também foi calculada a densidade aparente das amostras com auxílio de uma proveta graduada, adotando-se o volume de 1000 cm^3 para a medição. Ambas as densidades foram realizadas em triplicata.

4.3 Condições dos ensaios de moagem a úmido

Nesta seção, estão descritos os procedimentos experimentais utilizados nos testes de moagem para o levantamento das funções quebra e seleção. Os testes de moagem foram realizados em um moinho de diâmetro interno de 0,205 m, comprimento de 0,200 m e 75% de sólidos. Foram utilizadas carga de bolas de ferro fundido com 25,4 mm de diâmetro e massa específica aparente igual 4646 kg/m^3 (FIGURA 9).

Figura 9 - Moinho e carga de bolas utilizados nos testes



A velocidade de rotação do moinho, em rpm, foi 70% da velocidade crítica, C_s , definida pela Equação 22.

$$C_s = \frac{42,2}{\sqrt{D - d_t}} \quad (22)$$

Em que:

D = diâmetro interno do moinho;

d_t = diâmetro das bolas.

A carga de bolas correspondeu a 30% do volume do moinho e foi calculada de acordo com a Equação 23.

$$\text{Peso das bolas (em kg)} = JxVx0,6x\rho_b \quad (23)$$

Em que:

J = fração preenchida pelo leito de bolas;

V = volume interno do moinho;

ρ_b = massa específica aparente das bolas.

A massa de minério utilizada nos testes de moagem foi calculada utilizando-se um enchimento dos interstícios do leito de bolas em repouso (U) igual a 1,0 e assumindo-se uma porosidade do leito de bolas igual a 0,4, conforme Equação 24.

$$\text{Massa de minério (em kg)} = UxJx0,4x Vx0,6x\rho_m \quad (24)$$

Em que:

ρ_m = massa específica do minério.

Portanto, realizou-se os ensaios de moagem com rotação de 70 rpm, 1,38 kg de minério, 457,00 ml de água e 9,20 kg de carga de bolas.

Para a determinação dos parâmetros de balanço populacional, foram definidos quatro tempos de moagem (30 s, 10 min, 20 min e 25 min). Cada ensaio foi realizado com a mesma massa, porém com uma nova alíquota, conforme as seguintes etapas:

- a) carregou-se o moinho em camadas alternadas com bolas, minério e água para garantir regularização entre esses elementos;
- b) o painel de controle de rotação foi ligado e cronometrou-se o tempo de moagem de acordo com o estabelecido para cada teste;
- c) após decorrido o tempo determinado, a polpa foi quarteada em um quarteador de polpas, sendo separada uma alíquota para análise granulométrica a úmido na mesma sequência de peneiras utilizadas para análise da alimentação.

A potência do moinho de laboratório foi calculada de acordo com a Equação 14 e os parâmetros da função seleção e função quebra foram estimados no software Moly-Cop Tools 2.0, utilizando-se os resultados dos testes com moinho de bolas de laboratório. O aplicativo realiza a minimização dos quadrados de uma função objetivo até que o modelo expresse, de forma aceitável, os dados experimentais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

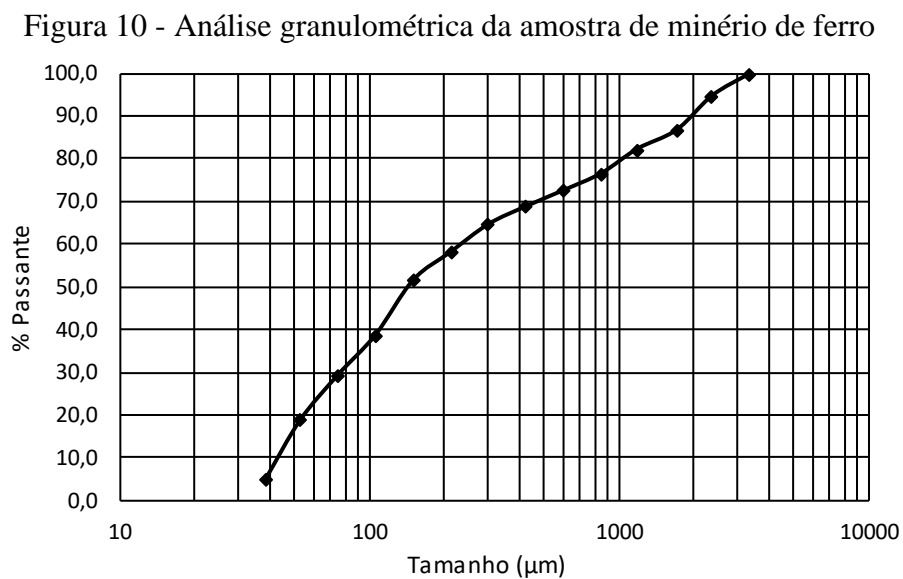
Nesse capítulo, estão apresentadas a análise e a discussão dos resultados obtidos nesta monografia.

5.1 Caracterização tecnológica das amostras

Neste item, encontram-se os resultados referentes à caracterização física das amostras utilizadas neste estudo.

5.1.1 Análise granulométrica

O gráfico da Figura 10 mostra a distribuição granulométrica da amostra de minério de ferro que apresentou *top size* de 3350,0 μm , P_{80} igual a 1047,06 μm e P_{50} igual a 144,36 μm .



5.1.2 Medidas de densidade aparente e real

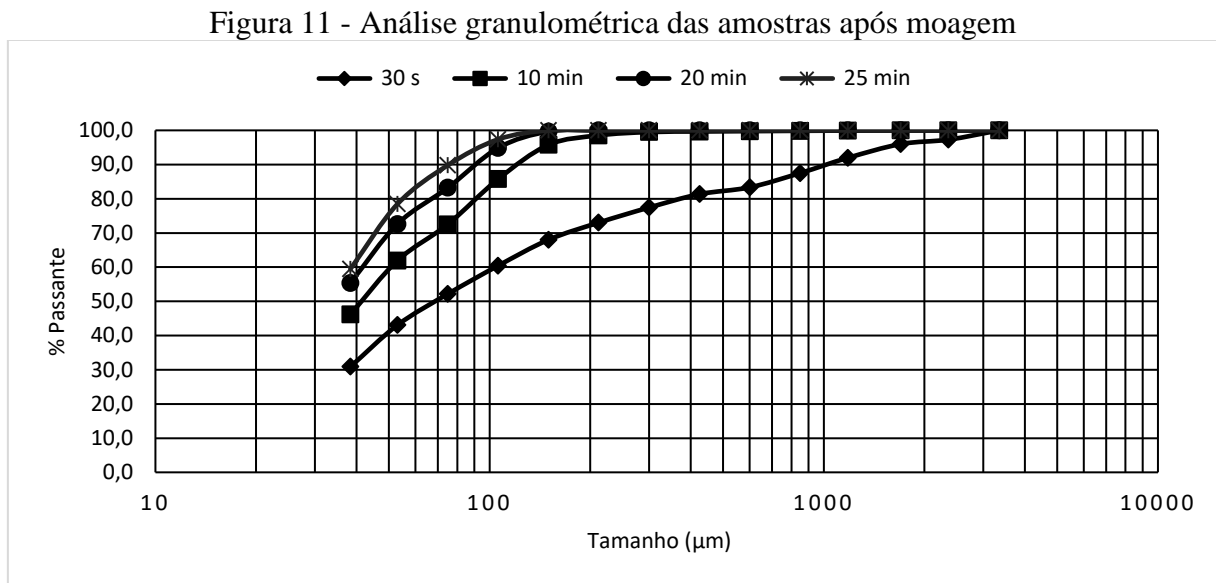
A Tabela 3 apresenta os valores de densidade média real e aparente encontrados para as amostras de minério de ferro.

Tabela 3 - Densidade aparente e real das amostras

Amostra	Densidade aparente (g/cm^3)	Densidade real (g/cm^3)
Minério de ferro	1,73	3,07

5.2 Ensaio de moagem

A Figura 11 mostra os resultados da sequência das quatro moagens realizadas a úmido. As amostras foram moídas em diferentes tempos de forma a obter curvas granulométricas que possibilitem a determinação dos parâmetros cinéticos.



Apresenta-se, na Tabela 4, o P_{80} encontrado para as amostras após a moagem nos tempos pré-determinados.

Tempo de moagem	P_{80} (μm)
30 s	382,0
10 min	92,5
20 min	68,3
25 min	56,0

5.3 Parâmetros de quebra

No Quadro 1 são apresentados os parâmetros de quebra (apêndices A e B) para os testes realizados em moinho de laboratório.

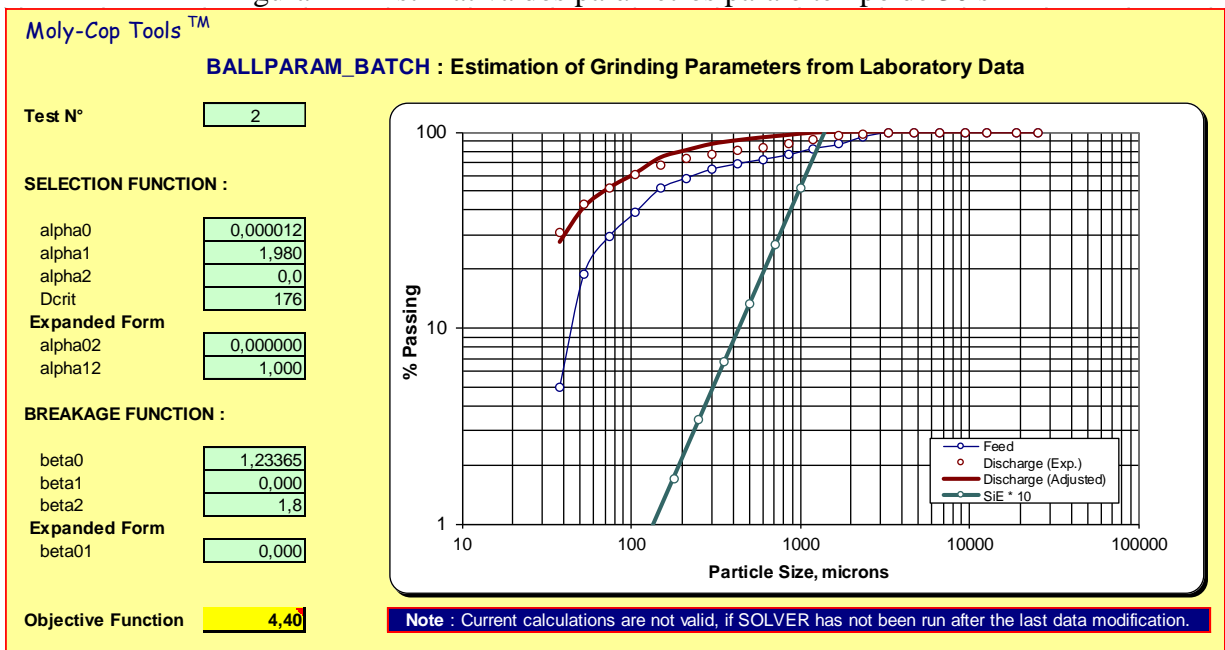
Quadro 1 - Parâmetros de quebra das amostras estudadas

Modelo	Parâmetro	Valor
Função seleção	α_0	0,000012
	α_1	1,98
	α_2	0,00
	Dcrit	176
Função quebra	β_0	1,23365
	β_1	0,00
	β_2	1,80
Função objetivo		2,00

5.4 Modelamento

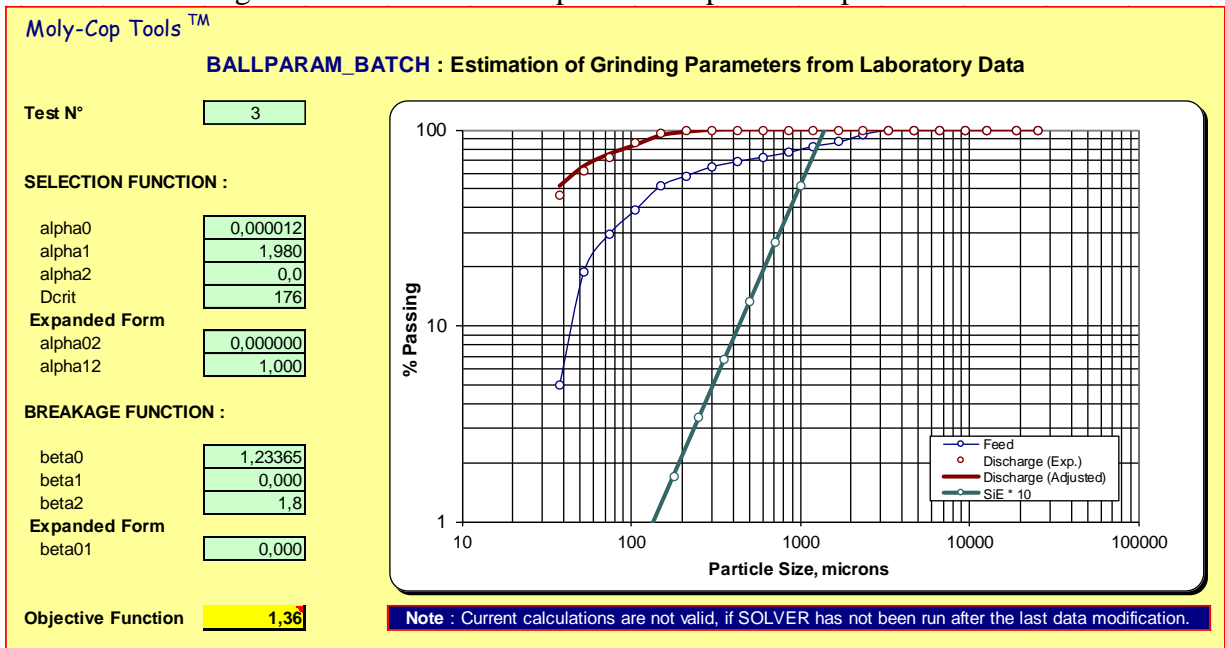
Os parâmetros cinéticos das amostras estudadas foram utilizados para calibração dos modelos, conforme demonstrado nas Figuras de 12 a 15 e nos apêndices C, D, E e F.

Figura 12 - Estimativa dos parâmetros para o tempo de 30 s



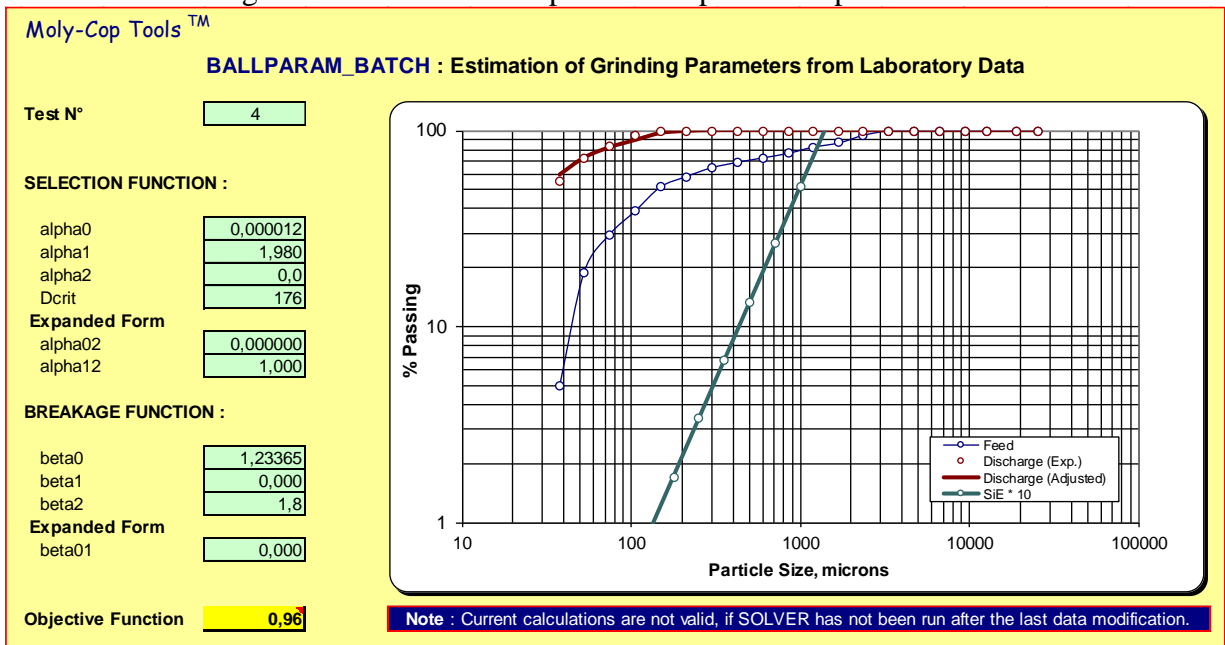
Como pode ser observado no gráfico da Figura 12, o modelo (linha do gráfico) teve aderência aceitável.

Figura 13 - Estimativa dos parâmetros para o tempo de 10 min



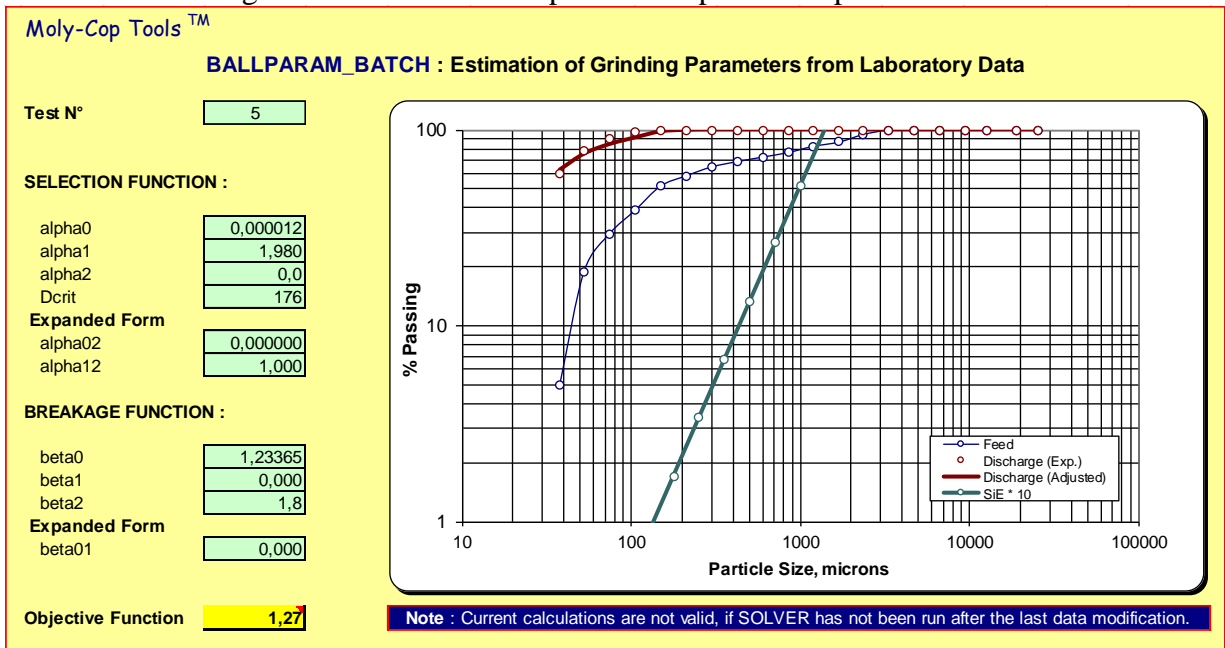
De acordo com o gráfico da Figura 13, nota-se que o modelo ajustou-se aos dados obtidos na análise granulométrica em laboratório, indicando que os parâmetros estimados são adequados.

Figura 14 - Estimativa de parâmetros para o tempo de 20 min



Assim como observado para a amostra anterior, houve, também, para a moagem no tempo de 20 min, aderência do modelo com os dados experimentais, indicando uma boa qualidade nos parâmetros obtidos.

Figura 15 - Estimativa de parâmetros para o tempo de 25 min



No caso da moagem no tempo de 25 min, ocorreu aderência aceitável entre o modelo proposto e os dados laboratoriais.

5.5 Dimensionamento do moinho industrial

A partir dos parâmetros de moagem calibrados para cada ensaio de moagem em laboratório, foram realizadas simulações para prever o comprimento e o diâmetro do moinho industrial, operando em circuito aberto. A simulação foi realizada considerando-se os mesmos parâmetros utilizados nos testes laboratoriais, isto é, 75% de sólidos, 70% da velocidade crítica e percentual de enchimento de carga de bolas igual a 30%. O moinho foi projetado para receber uma alimentação de 1000 t/h, com 80% da alimentação passante em 6108 μm (conforme distribuição granulométrica apresentada no apêndice G) e P_{80} igual a 150 μm . As Figuras 16 e 17 mostram os resultados obtidos nessa simulação.

Figura 16 - Dimensionamento do moinho industrial

Moly-Cop Tools™

BALLSIM : Open Grinding Simulator

Circuit Type **OPEN** Simulation N° **1**

Remarks

Mill Dimensions and Operating Conditions

Diameter	Length	Speed	Charge	Balls	Interstitial	Lift
ft	ft	% Critical	Filling, %	Filling, %	Slurry, %	Angle, (°)
6,5	9,5	70,0	30,0	30,0	100,0	29,3
	rpm	21,03				

79	Balls
0	Overfilling
14	Slurry
93	Net kW
10,00	% Losses
103	Gross kW

Ore Density, ton/m³ 3,07
Balls Density, ton/m³ 7,75
Slurry Density, ton/m³ 2,02

Charge Volume, m ³	Mill Charge Weight, tons			Apparent Density ton/m ³
	Ball Charge	Interstitial	Slurry Excess	
2,6832	12,4771	2,1714	0,0000	5,459

Feed, ton/hr (dry) 1000,0
% Solids (by weight) 75,0

Feed Size Distribution

i	Mesh	Opening	Mid-Size	ton/hr	% Retained	% Passing
1	2.1"	25400				100,00
2	1.48"	19050	21997	6,3727	0,64	99,36
3	1.05"	12700	15554	7,6709	0,77	98,60
4	0.742"	9500	10984	30,7902	3,08	95,52
5	0.525"	6700	7978	105,5710	10,56	84,96
6	0.371"	4750	5641	170,1675	17,02	67,94
7	3	3350	3989	185,8123	18,58	49,36
8	4	2360	2812	155,6171	15,56	33,80
9	6	1700	2003	106,1054	10,61	23,19
10	8	1180	1416	78,9153	7,89	15,30
11	10	850	1001	45,4026	4,54	10,76
12	14	600	714	30,9008	3,09	7,67
13	20	425	505	19,5144	1,95	5,72
14	28	300	357	12,8757	1,29	4,43
15	35	212	252	8,6811	0,87	3,56
16	48	150	178	6,1278	0,61	2,95
17	65	106	126	4,5708	0,46	2,49
18	100	75	89	3,5412	0,35	2,14
19	150	53	63	2,8713	0,29	1,85
20	200	38	45	2,2969	0,23	1,62
21	-200	0	19	16,1950	1,62	0,00

Selection Function Parameters :

alpha0	alpha1	alpha2	dcrit
1,1913E-05	1,97958114	0,00099843	175,749391

Expanded Form :

alpha02	alpha12
0	1
0	1

Suggested Default Values

Breakage Function Parameters :

beta0	beta1	beta2
1,23364757	9,9887E-05	1,75427429

Expanded Form :

beta01
0
0

Suggested Default Value

Figura 17 - Resultados da simulação

Moly-Cop Tools™				Simulation :		1			
BALLSIM									
Open Grinding Simulator									
Remarks :		Base Case Esxample							
BALL MILL PERFORMANCE									
Diameter, ft	6,5			Mill Power, kW (Gross)	103,1634				
Length, ft	9,5			Mill Power, kW (Net)	92,8470				
Speed, % Critical	70,0			Feed, ton/hr	1000,0000				
App. Density, ton/m3	5,46			% Solids (by weight)	75,0				
Charge Level, %	30,0			Sp. Energy, kWh/ton	0,10				
Balls Filling, %	30,0			Reduction Ratio	40,64				
Lift Angle, (°)	29,3								
				Size Distributions					
				Mill	Mill				
				Feed	Discharge				
i	Mesh	Opening	Mid-Size						
1	2.1"	25400	21997	100,00	100,00				
2	1.48"	19050	15554	99,36	100,00				
3	1.05"	12700	10984	98,60	100,00				
4	0.742"	9500	7978	95,52	99,99				
5	0.525"	6700	5641	84,96	99,88				
6	0.371"	4750	3989	67,94	99,44				
7	3	3350	2812	49,36	98,27				
8	4	2360	2003	33,80	96,08				
9	6	1700	1416	23,19	93,20				
10	8	1180	1001	15,30	89,65				
11	10	850	714	10,76	86,77				
12	14	600	505	7,67	84,36				
13	20	425	357	5,72	82,65				
14	28	300	252	4,43	81,44				
15	35	212	178	3,56	80,60				
16	48	150	126	2,95	80,00				
17	65	106	89	2,49	79,54				
18	100	75	63	2,14	79,19				
19	150	53	45	1,85	78,90				
20	200	38	19	1,62	78,66				
				D80, microns					
				6108		150			
Selection Function Parameters						Breakage Function Parameters			
α_0	α_{02}	α_1	α_{12}	α_2	d_{crit}	β_0	β_{01}	β_1	β_2
0,0000119	0,0000000	1,980	1,000	0,00	176	1,234	0,000	0,00	1,75

O moinho em escala industrial dimensionado possui 6,5 pés (1,98 m) de diâmetro e 9,5 pés (2,90 m) de comprimento. A potência necessária para a moagem foi de 92,85 kW.

6 CONCLUSÕES

Observa-se que, com pequenas quantidades de minério e testes laboratoriais em batelada, pode-se realizar a determinação dos parâmetros cinéticos, que são característicos de cada material, obtendo-se, dessa forma, informações importantes para a modelagem de um circuito de cominuição e classificação. Além disso, observou-se que quatro tempos de moagem foram suficientes para a determinação de parâmetros de balanço populacional.

Os dados experimentais geraram um bom ajuste para os modelos selecionados, indicando qualidade do trabalho experimental, o que delega confiabilidade aos resultados obtidos a partir da simulação.

Os resultados do dimensionamento do moinho industrial confirmaram que a modelagem e a simulação permitem estudar as influências das variáveis de projeto e variáveis operacionais sob a qualidade dos produtos finais, possibilitando simular melhorias de processo de maneira rápida e eficiente. Entretanto, recomenda-se que o método seja aplicado a diferentes circuitos industriais de moagem, a fim de se obter uma ampla validação do mesmo.

Foi possível dimensionar um circuito industrial de moagem, pois, variáveis como: percentual de velocidade crítica, carga de bolas, percentual de enchimento, dimensões do moinho e cálculo da energia necessária foram determinados.

O modelamento matemático e a simulação para dimensionamento de moinhos de bolas ainda não são unanimidade entre a comunidade científica, tampouco são para a realidade industrial. No entanto, o modelo do balanço populacional tem-se mostrado promissor na simulação de circuitos de moagem, e, ainda, uma ferramenta reconhecida e aplicada para a melhoria e otimização de processos.

REFERÊNCIAS

- 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.
- AUSTIN, L. G.; KLIMPEL, R. R.; LUCKIE, P. T. **Process Engineering of Size Reduction**. SME - AIME, 1984.
- BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Edgar Blücher, 1987. 143 p.
- BERGERMAN, M.; DELBONI, H.; NANKRAN, M. Estudo de variabilidade e otimização do circuito de moagem SAG da Usina do Sossego. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 1, p. 93-97, jan./mar. 2009.
- BERGERMAN, M. G. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 7 ago. 2019.
- BOND, F. C. **The Third Theory of Comminution**. Transactions AIME, v. 193, p 484-494, May, 1952.
- BOND, F. C. **Crushing and grinding calculations**. *In*: Selection circuits to prepare beneficiation feeds. Allis Chalmers Bulletin, May, 1983.
- CAMPOS, T. M.; BARRIOS, G. K. P.; BUENO, G.; TAVARES, L. M. Desafios na modelagem da capacidade e potência consumida da prensa de rolos. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 27, 2017, Belém. **Anais...** Belém: UFPA, 2017. p. 1-11. Disponível em: <http://entmme2017.com.br/>. Acesso em: 13 out. 2019.
- CHAVES, A. P.; PERES A. E. C. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios - Britagem, peneiramento e moagem**. 3.ed. São Paulo: Signus Editora, 2006. 246 p.
- EPSTEIN, B. **The material description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmic-normal distribution**. J. Franklin Inst, 1947.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. Britagem e Moagem. *In*: LUZ, A. L.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143-210.

GALÉRY, R. **Moagem: Modelagem de Parâmetros de Quebra Através da Análise da Energia de Fragmentação**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

GALÉRY, R.; VALADÃO, G. E. S.; VIANA, P. R. M.; ARAÚJO, A. C. Fragmentação. *In*: VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap. 5, p. 85-120.

GOMES, W. L.; DELBONI, H.; JATOBÁ, T. L. A.; EL HAJJ, T. M. Método para simulação de moagem em moinho de bolas. **HOLOS** Edição Especial - XXV ENTMME / VII MSHNT, Rio Grande do Norte, v. 3, p. 133-140, 2014. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/issue/view/63>. Acesso em: 22 nov. 2019.

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, p. 1-31, 1980.

HUKKI, R. T. **Minerals beneficiation**: proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick, and Bond. Transactions AIME, v. 220, New York, 1961, p. 403-408.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. New York: Wiley, 1982. 491 p.

KICK, F. **Text book of mineral dressing**. Ernst and Korn. Berlin, 1883.

MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J.A. Algumas considerações em regressão não linear. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1761-1770, 2002. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/2551>. Acesso em: 10 out. 2019.

METSO MINERALS. **Basics in mineral processing**. 11th ed. 2018. 334 p. Disponível em: <https://www.metso.com/>. Acesso em: 14 out. 2019.

MIRANDA, A.; FONSECA, R.; OLEGARIO, F.; BERGERMAN, M. G.; DELBONI JR., H.; SOUZA, V.; DEHART, I.; SUAREZ, D. Avaliação do uso de moinho vertical para moagem secundária. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*, 26, 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Unifal, 2015. p. 1-10. Disponível em: <http://entmme2015.entmme.org/>. Acesso em: 13 out. 2019.

MONTENEGRO, L. C. M.; GALERY, R.; SILVA, G. G.; PAULA, R. A.; PERES, A. E. C. Estudo de otimização da carga de bolas na moagem por meio do modelo do balanço populacional - parte 1. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*, 26, 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Unifal, 2015. p. 251-258. Disponível em: <http://entmme2015.entmme.org/>. Acesso em: 15 nov. 2019.

NUNES, A. L. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Votorantim Metais Zinco Morro Agudo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012. 117 p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 16 out. 2019.

PERES, A. E. C.; MACHADO, I. C. Altas razões de redução em moinhos de barras: um fator crítico de dimensionamento. **Mineração Metalurgia**, n. 511, p. 60-2. 1988.

PINTO, P. H. F. **Desenvolvimento de rotas de cominuição para itabiritos compactos do Quadrilátero Ferrífero**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016. 188 p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 13 out. 2019.

RITTINGER, R. P. **Text book of mineral dressing**. Ernst and Korn. Berlin, 1867.

ROCHA, B. G. **Análises preliminares de desempenho do circuito de moagem da Vale Fertilizantes de Araxá-MG**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. 181 p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 30 out. 2019.

ROWLAND, C. A. **Selection of rod mills, ball mills, pebble mills and regrind mills**. *In: Selection circuits to prepare beneficiation feeds*. Allis Chalmers Bulletin, May, 1983.

ROWLAND, C. A. Ball Mill Scale-Up – Diameter Factors. *In: SOMASUNDARAM, P. Advances in Mineral Processing*. New York, Society of Mining Engineers, Inc., American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 605-617, 1986.

SAMPAIO, J. A.; JÚNIOR, H. D. Cominuição. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 4, p. 107-182.

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

SCHNEIDER, C. L.; DUQUE, T. F. M. B. Ensaio de laboratório para escalonamento de moinhos de bolas usando o modelo de Herbst-Fuerstenau. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26, 2015, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: Unifal, 2015. p. 84-92. Disponível em: <http://entmme2015.entmme.org/>. Acesso em: 08 nov. 2019.

SILVA, J. A. O. **Modelagem do moinho de bolas de rocha fosfática da empresa Anglo American Fosfato Brasil utilizando a ferramenta Moly-cop Tools**. 2014. Monografia (Especialização em Tratamento de Minérios.) - Universidade de Goiás. Catalão, 2014. 89 p. Disponível em: https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/Juliana_Aliques_de_Oliveira_Silva.pdf. Acesso em: 19 set. 2019.

SOUZA, E. S. **Controle automático de circuitos de moagem**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. 83 p. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127873>. Acesso em: 19 set. 2019.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T.J. **Mineral Processing Technology** - An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th ed. Burlington: Elsevier, 2006. 437 p.

APÊNDICE A - Estimação dos parâmetros cinéticos em laboratório

Moly-Cop Tools™

BALLPARAM_BATCH : Estimation of Grinding Parameters from Laboratory Data

Test N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Weighting Factor	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0

SELECTION FUNCTION :

	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	Overall
alpha0	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012	0,000012
alpha1	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980	1,980
alpha2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dcrit	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176	176

Expanded Form

alpha02	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
alpha12	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

BREAKAGE FUNCTION :

beta0	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365	1,23365
beta1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
beta2	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8

Expanded Form

beta01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Objective Function	10,47	4,40	1,36	0,96	1,27	5,16	18,62	18,62	18,62	18,62	2,00
---------------------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	-------------

APÊNDICE C - Moagem 1

Moly-Cop Tools™				Test N°		1	
BALL_PARAM							
Ball Mill Grinding Model Parameter Estimator							
Remarks :	Base Case Example						
DESIGN AND OPERATING CONDITIONS							
<i>Configuration : BATCH</i>							
Ore, kg	1,4			Diameter, ft	0,67		
Water, lt	0,5			Length, ft	0,66		
Slurry, kg	1,8			Balls Filling, %	30,1		
Slurry, lt	0,9			Speed, % Critical	70,0		
Slurry Dens., kg/lt	2,023			App. Dens., ton/m3	5,255		
% Solids (by weight)	75,0			Power, kW	0,03		
Grinding Time, min	0,5			Energy, kWh/ton	0,18		
Particle Size Distributions (Cumm. % Passing)							
Mesh	Opening	Feed	Discharge				
			Exp.	Adj.			
1,05	25400	100,00	100,00	/	100,00		
0,742	19050	100,00	100,00	/	100,00		
0,525	12700	100,00	100,00	/	100,00		
0,371	9500	100,00	100,00	/	100,00		
3	6700	100,00	100,00	/	100,00		
4	4750	100,00	100,00	/	100,00		
6	3350	100,00	100,00	/	100,00		
8	2360	94,76	97,28	/	99,99		
10	1700	86,75	95,99	/	99,63		
14	1180	82,28	91,96	/	98,70		
20	850	76,63	87,51	/	96,13		
28	600	72,66	83,34	/	93,48		
35	425	68,90	81,35	/	90,41		
48	300	64,71	77,43	/	86,63		
65	212	58,24	73,02	/	80,48		
100	150	51,64	68,00	/	74,05		
150	106	38,84	60,41	/	61,42		
200	75	29,49	52,17	/	52,13		
270	53	18,95	43,06	/	41,61		
400	38	4,96	30,88	/	27,65		
D80, microns		1037	378	/	207		
MODEL PARAMETERS							
Selection				Breakage			
alpha01	0,000012			beta00	1,23365		
alpha02	0,0000000			beta01	0,000		
alpha11	1,980			beta1	0,000		
alpha12	1,000			beta2	1,754		
alpha2	0,001						
Dcrit	176			Obj. Function	4,40		

APÊNDICE D - Moagem 2

Moly-Cop Tools™				Test N°		2	
BALL PARAM							
Ball Mill Grinding Model Parameter Estimator							
Remarks :	Base Case Example						
DESIGN AND OPERATING CONDITIONS							
<i>Configuration : BATCH</i>							
Ore, kg	1,4			Diameter, ft	0,67		
Water, lt	0,5			Length, ft	0,66		
Slurry, kg	1,8			Balls Filling, %	30,1		
Slurry, lt	0,9			Speed, % Critical	70,0		
Slurry Dens., kg/lt	2,023			App. Dens., ton/m3	5,255		
% Solids (by weight)	75,0			Power, kW	0,03		
Grinding Time, min	10,0			Energy, kWh/ton	3,65		
Particle Size Distributions (Cumm. % Passing)							
Mesh	Opening	Feed	Discharge				
			Exp.	/	Adj.		
1,05	25400	100,00	100,00	/	100,00		
0,742	19050	100,00	100,00	/	100,00		
0,525	12700	100,00	100,00	/	100,00		
0,371	9500	100,00	100,00	/	100,00		
3	6700	100,00	100,00	/	100,00		
4	4750	100,00	100,00	/	100,00		
6	3350	100,00	100,00	/	100,00		
8	2360	94,76	100,00	/	100,00		
10	1700	86,75	100,00	/	100,00		
14	1180	82,28	99,94	/	100,00		
20	850	76,63	99,86	/	100,00		
28	600	72,66	99,77	/	100,00		
35	425	68,90	99,66	/	99,93		
48	300	64,71	99,50	/	99,39		
65	212	58,24	98,53	/	97,08		
100	150	51,64	95,76	/	93,15		
150	106	38,84	85,74	/	83,29		
200	75	29,49	72,53	/	75,09		
270	53	18,95	61,93	/	65,22		
400	38	4,96	46,17	/	51,70		
D80, microns		1037	92	/	93		
MODEL PARAMETERS							
Selection				Breakage			
alpha01	0,000012			beta00	1,23365		
alpha02	0,0000000			beta01	0,000		
alpha11	1,980			beta1	0,000		
alpha12	1,000			beta2	1,754		
alpha2	0,001						
Dcrit	176			Obj. Function	1,36		

APÊNDICE E - Moagem 3

Moly-Cop Tools™				Test N° 3			
BALL_PARAM							
Ball Mill Grinding Model Parameter Estimator							
Remarks :	Base Case Example						
DESIGN AND OPERATING CONDITIONS							
<i>Configuration : BATCH</i>							
Ore, kg		1,4				Diameter, ft	0,67
Water, lt		0,5				Length, ft	0,66
Slurry, kg		1,8				Balls Filling, %	30,1
Slurry, lt		0,9				Speed, % Critical	70,0
Slurry Dens., kg/lt		2,023				App. Dens., ton/m3	5,255
% Solids (by weight)		75,0				Power, kW	0,03
Grinding Time, min		20,0				Energy, kWh/ton	7,29
Particle Size Distributions (Cumm. % Passing)							
Mesh	Opening	Feed	Discharge				
			Exp.	/	Adj.		
1,05	25400	100,00	100,00	/	100,00		
0,742	19050	100,00	100,00	/	100,00		
0,525	12700	100,00	100,00	/	100,00		
0,371	9500	100,00	100,00	/	100,00		
3	6700	100,00	100,00	/	100,00		
4	4750	100,00	100,00	/	100,00		
6	3350	100,00	100,00	/	100,00		
8	2360	94,76	100,00	/	100,00		
10	1700	86,75	100,00	/	100,00		
14	1180	82,28	100,00	/	100,00		
20	850	76,63	100,00	/	100,00		
28	600	72,66	100,00	/	100,00		
35	425	68,90	100,00	/	100,00		
48	300	64,71	100,00	/	99,93		
65	212	58,24	100,00	/	99,10		
100	150	51,64	99,67	/	96,76		
150	106	38,84	94,84	/	89,17		
200	75	29,49	83,21	/	81,98		
270	53	18,95	72,62	/	72,74		
400	38	4,96	55,39	/	59,67		
D80, microns		1037	68	/	70		
MODEL PARAMETERS							
Selection				Breakage			
alpha01		0,000012				beta00	1,23365
alpha02		0,0000000				beta01	0,000
alpha11		1,980				beta1	0,000
alpha12		1,000				beta2	1,754
alpha2		0,001					
Dcrit		176				Obj. Function	0,96

APÊNDICE F - Moagem 4

Moly-Cop Tools™				Test N°		4	
BALL_PARAM							
Ball Mill Grinding Model Parameter Estimator							
Remarks :	Base Case Example						
DESIGN AND OPERATING CONDITIONS							
<i>Configuration : BATCH</i>							
Ore, kg	1,4			Diameter, ft	0,67		
Water, lt	0,5			Length, ft	0,66		
Slurry, kg	1,8			Balls Filling, %	30,1		
Slurry, lt	0,9			Speed, % Critical	70,0		
Slurry Dens., kg/lt	2,023			App. Dens., ton/m3	5,255		
% Solids (by weight)	75,0			Power, kW	0,03		
Grinding Time, min	25,0			Energy, kWh/ton	9,12		
Particle Size Distributions (Cumm. % Passing)							
Mesh	Opening	Feed	Discharge				
			Exp.	/	Adj.		
1,05	25400	100,00	100,00	/	100,00		
0,742	19050	100,00	100,00	/	100,00		
0,525	12700	100,00	100,00	/	100,00		
0,371	9500	100,00	100,00	/	100,00		
3	6700	100,00	100,00	/	100,00		
4	4750	100,00	100,00	/	100,00		
6	3350	100,00	100,00	/	100,00		
8	2360	94,76	100,00	/	100,00		
10	1700	86,75	100,00	/	100,00		
14	1180	82,28	100,00	/	100,00		
20	850	76,63	100,00	/	100,00		
28	600	72,66	100,00	/	100,00		
35	425	68,90	100,00	/	100,00		
48	300	64,71	100,00	/	99,97		
65	212	58,24	100,00	/	99,48		
100	150	51,64	100,00	/	97,68		
150	106	38,84	97,36	/	91,01		
200	75	29,49	89,81	/	84,28		
270	53	18,95	78,46	/	75,34		
400	38	4,96	59,46	/	62,48		
D80, microns		1037	56	/	64		
MODEL PARAMETERS							
Selection				Breakage			
alpha01	0,000012			beta00	1,23365		
alpha02	0,0000000			beta01	0,000		
alpha11	1,980			beta1	0,000		
alpha12	1,000			beta2	1,754		
alpha2	0,001						
Dcrit	176			Obj. Function	1,27		

APÊNDICE G - Distribuição granulométrica da alimentação do moinho industrial

