



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



Alexandre Paolo Santos Gouveia

**ESTUDO DE MOABILIDADE DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO UTILIZANDO
UMA METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE REQUERIMENTO ENERGÉTICO**

Ouro Preto
2023

Alexandre Paolo Santos Gouveia

**ESTUDO DE MOABILIDADE DE MINÉRIO DE FERRO ITABIRÍTICO UTILIZANDO
UMA METODOLOGIA PARA PREVISÃO DE REQUERIMENTO ENERGÉTICO**

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 grau de
Engenheiro de Minas.

Orientador: Antônio Pedro de Freitas.

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G719e Gouveia, Alexandre Paolo Santos.

Estudo de moabilidade de minério de ferro itabirítico utilizando uma metodologia para previsão de requerimento energético. [manuscrito] / Alexandre Paolo Santos Gouveia. - 2023.

39 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Antônio Pedro de Freitas.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Tratamento de minérios. 2. Beneficiamento de minério - Moagem. 3. Energia - Consumo - Requerimento energético. 4. Minério de ferro. I. Freitas, Antônio Pedro de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Alexandre Paolo Santos Gouveia

Estudo de Mobilidade de Minério de Ferro Itabirítico Utilizando uma Metodologia para Previsão de Requerimento Energético

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

Aprovada em 09 de agosto de 2023

Membros da banca

Especialista - Antônio Pedro de Freitas - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Mariana Carolina Andrade Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor - Flávio Luiz Martins - Universidade Federal de Ouro Preto

Antônio Pedro de Freitas, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21 de setembro de 2023



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Pedro de Freitas, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 21/09/2023, às 15:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0593270** e o código CRC **8E6A93E2**.

AGRADECIMENTOS

À BHP Billiton, na pessoa da Júnia Rocha, pela disponibilização de dados para a elaboração deste trabalho.

À Leonel Rabelo e Associados, na pessoa do Herbert Júnior, por todo o aprendizado e apoio.

À Fundação Gorceix e seus funcionários, pela disponibilização dos laboratórios e pela excelência na realização dos testes.

À minha família e aos meus amigos, pelo incentivo.

À UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino de qualidade.

RESUMO

O aproveitamento de recursos minerais de ferro a partir de rochas compactas é uma tendência atual que traz desafios associados ao consumo energético no beneficiamento mineral, mais especificamente na etapa de moagem, que é responsável pelos maiores custos operacionais na mineração. Neste contexto, a utilização de métodos de previsão de consumo energético permite avaliar a energia necessária para a redução granulométrica do minério, essencial para a liberação das partículas. A viabilidade de um empreendimento está diretamente relacionada a essa análise e, portanto, deve ser realizada através de métodos precisos. Este trabalho foi realizado com o objetivo de aplicar a metodologia estabelecida pelo teste PRED¹ para a previsão de requerimento energético de uma amostra de minério de ferro itabirítico, caracterizada química e mineralogicamente. O método, que já teve sua eficácia comprovada industrialmente, se apresenta como uma opção aos tradicionais ensaios de *Work Index* (Wi) de Bond (1952), combinando um ensaio de moagem *batch* às formulações estabelecidas por Rowland (1982) para o cálculo de potência de moinhos de pequenos diâmetros. A execução do teste PRED permitiu a obtenção do parâmetro de Moabilidade (K), intrínseco ao minério para a condição analisada. Na condição de 10% retido em 0,150 mm, o valor obtido para o parâmetro de Moabilidade (K) foi de 0,324 t/kWh. A análise do teste PRED foi também realizada para a previsão da energia necessária para a obtenção de um P₈₀ em 0,106 mm, de forma a obter um comparativo ao ensaio de *Work Index* (Wi). O valor de 4,958 kWh/st obtido para a energia está dentro do intervalo de 3,9 a 25 kWh/st encontrado em referências de outros itabiritos. O itabirito foi classificado como friável, devido à sua aproximação ao limite inferior de requerimento energético encontrado nas referências de outros itabiritos. Os resultados do teste PRED não foram validados em maiores escalas neste trabalho. Esta análise pode ser realizada em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Requerimento Energético, Moabilidade, Minério de Ferro, Moagem.

¹ PRED: Previsão de Requerimento Energético Donda.

ABSTRACT

The utilization of iron mineral resources from compact rocks is a current trend that brings challenges associated with energy consumption in mineral processing, specifically in the grinding stage, which accounts for the highest operational costs in mining. In this context, the use of energy consumption prediction methods allows for the assessment of the energy required for the size reduction of the ore, essential for particle liberation. The feasibility of a project is directly related to this analysis and, therefore, should be carried out using precise methods. This study was conducted with the objective of applying the methodology established by the PRED² test for predicting the energy requirement of a sample of itabirite iron ore, characterized chemically and mineralogically. The method, which has already been industrially proven effective, presents itself as an alternative to the traditional Bond Work Index (Wi) tests (1952), combining a batch grinding test with formulations established by Rowland (1982) for calculating the power of small-diameter mills. The execution of the PRED test allowed for the determination of the Grindability parameter (K), intrinsic to the ore for the analyzed condition. In the condition of 10% retained at 0.150 mm, the obtained value for the Grindability parameter (K) was 0.324 t/kWh. The PRED test analysis was also conducted to predict the energy required to achieve a P80 of 0.106 mm, in order to provide a comparison to the Bond Work Index (Wi) test. The value of 4.958 kWh/st obtained for the energy falls within the range of 3.9 to 25 kWh/st found in references for other itabirites. The itabirite was classified as friable due to its proximity to the lower limit of energy requirements found in references for other itabirites. The results of the PRED test were not validated at larger scales in this study. This analysis can be carried out in future work.

Keywords: Energy Requirement, Grindability, Iron Ore, Grinding.

² PRED: Previsão de Requerimento Energético Donda.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carga de bolas para ensaio de Work Index	16
Tabela 2 - Aderência do consumo energético específico previsto em laboratório em relação ao industrial	18
Tabela 3 - Padronizações teste PRED	19
Tabela 4 - Parâmetros utilizados no PRED	27
Tabela 5 - Carga de bolas utilizada no PRED	28
Tabela 6 - Análise química do minério de ferro itabirítico.....	29
Tabela 7 - Energia calculada para tempos de moagem	30
Tabela 8 - Análises granulométricas da alimentação e produtos da moagem	31
Tabela 9 - Energia calculada para a malha de 0,150 mm	33
Tabela 10 - Determinação do tempo de moagem	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 MOAGEM	10
3.2 CONSUMO ENERGÉTICO NAS ETAPAS DE COMINUIÇÃO.....	13
3.2.1 Lei de Rittinger	13
3.2.2 Lei de Kick	15
3.2.3 Lei de Bond.....	15
3.2.4 PRED - Previsão de Requerimento Energético Donda	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	24
4.2 TESTE PRED	25
4.2.1 Preparo de Alíquotas	25
4.2.2 Ensaio de Moagem.....	25
4.2.3 Análises Granulométricas	28
4.2.4 Análise de Dados	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	29
5.2 MOABILIDADE E REQUERIMENTO ENERGÉTICO	29
6 CONCLUSÕES.....	37

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é um recurso mineral com várias aplicações no mundo moderno. Sua alta dureza, resistência e tenacidade o tornam um elemento interessante para a confecção de ligas, indústria automotiva, barcos, estruturas de edifícios, entre outros usos.

A associação de elementos em arranjos geométricos específicos resulta na formação natural de sólidos denominados minerais. Os minerais, por sua vez, quando se associam em determinadas condições, disposições e proporções, constituem rochas. Os principais minerais que são fonte de ferro são a magnetita (Fe_3O_4), a hematita (Fe_2O_3), a goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (CARVALHO *et al.*, 2014).

As formações ferríferas bandadas, ou BIF's (*Banded Iron Formations*), constituem depósitos de ferro no território brasileiro. São assim chamadas por intercalarem bandas de sílica e hematita. Um exemplo típico de rocha desse tipo é o Itabirito, que é o objeto de estudo deste trabalho.

A tendência atual para o cenário da mineração é de se encontrar minérios mais compactos e de teor mais baixo, exigindo um processamento mineral mais intenso, principalmente na etapa de moagem. A tecnologia atual permite o processamento de minérios com teores de ferro abaixo de 40% no ROM (*Run of Mine*) (ALEXANDRINO *et al.*, 2017).

Nesse contexto, os métodos de determinação de moabilidade são importantes para quantificar a facilidade associada à redução granulométrica do minério através da moagem.

O presente trabalho se apresenta como uma aplicação da metodologia estabelecida por Donda (2003) para a previsão do requerimento energético na moagem de uma amostra de minério de ferro itabirítico.

O PRED (Previsão de Requerimento Energético Donda) tem aplicações tanto em análises de viabilidade técnica quanto no controle de parâmetros operacionais de plantas industriais, atingindo desvio máximo de 10% entre os resultados previstos em laboratório e os resultados obtidos em plantas industriais (DONDA e ROSA, 2014).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi determinar o requerimento energético de um minério de ferro itabirítico através do teste PRED (Previsão de Requerimento Energético Donda).

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar a caracterização química e mineralógica do minério;
- b) Obter a moabilidade (K) de um minério de ferro itabirítico;
- c) Comparar o consumo específico de energia do minério itabirítico analisado com o de outros itabiritos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de moagem é uma operação que se tornou cada vez mais importante para a obtenção de recursos minerais à medida em que os depósitos de teor elevado foram se tornando mais escassos e a demanda por metais se elevava (LYNCH e ROWLAND, 2005).

Os investimentos em inovação, aliados aos avanços tecnológicos em áreas como a eletricidade e a computação permitiram, no século XX, uma mudança de patamar na mineração, que passou a utilizar equipamentos mais robustos e de potência muito maior para a redução de partículas (LYNCH e ROWLAND, 2005).

O desenvolvimento de estudos de modelagem e simulação fez-se necessário para um controle assertivo do processo de moagem, assegurando processos dimensionados de maneira específica quanto ao tipo de minério disponível (LYNCH e ROWLAND, 2005).

3.1 MOAGEM

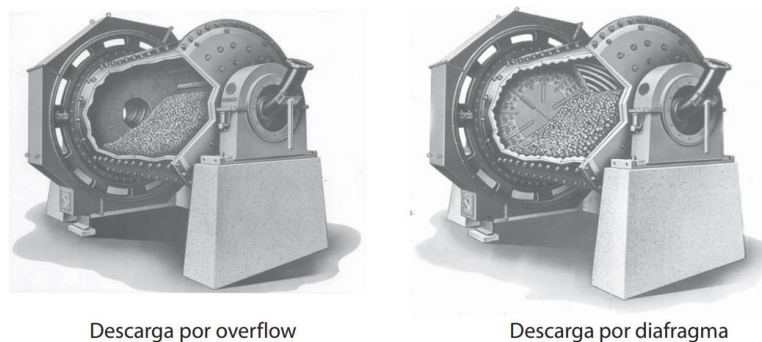
A moagem é um processo com o objetivo de redução do tamanho das partículas. Sua aplicação ocorre de maneira complementar à britagem, porém atinge maiores relações de redução (SAMPAIO e DELBONI JÚNIOR, 2018).

A moagem pode ser realizada através de moinhos de vários tipos e em escalas variáveis. Os mais tradicionais são os seguintes:

- Moinho de bolas;
- Moinho de barras;
- Moinho SAG (semiautógeno);
- Moinho vertical.

As Figuras 1,2,3 e 4 apresentam exemplos dos moinhos citados.

Figura 1 - Moinhos de Bolas



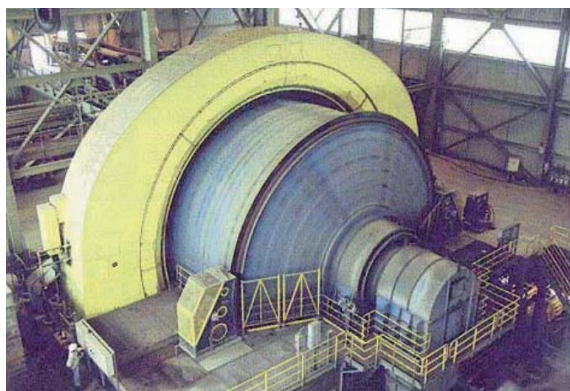
Fonte: Manual de Britagem Metso.

Figura 2 - Moinho de Barras



Fonte: Manual de Britagem Metso.

Figura 3 - Moinho SAG



Fonte: Manual de Britagem Metso.

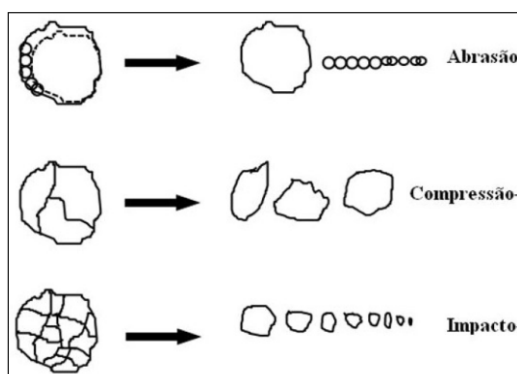
Figura 4 - Moinhos Verticais



Fonte: Manual de Britagem Metso.

Os moinhos combinam vários tipos de esforços sobre as partículas, sendo os principais mecanismos de cominuição: compressão, impacto e abrasão (MAZZINGHY, 2009), conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Mecanismos de Cominuição



Fonte: Assis, 2019.

A intensidade desses esforços varia em função do tipo de equipamento utilizado. A seleção do tipo de moinho e a determinação dos parâmetros relacionados ao regime de operação estão diretamente relacionados às características do minério.

Nesse sentido, é importante analisar o fator de moabilidade (K) do minério, que representa a sua facilidade de cominuição. Este fator tem relação com o consumo específico de energia, que será tratado em mais detalhes nas próximas seções deste trabalho.

3.2 CONSUMO ENERGÉTICO NAS ETAPAS DE COMINUIÇÃO

A moagem é responsável pela maior parcela do consumo de energia em todo o processo produtivo na mineração. Entretanto, a maior parte da energia transferida aos equipamentos não é utilizada efetivamente para a redução granulométrica do minério (SAMPAIO e DELBONI JÚNIOR).

Quase toda a energia fornecida ao eixo da máquina é dissipada com ineficiências e atritos. Além disso, é impossível relacionar os rendimentos com as variáveis de operação. Todas as tentativas do passado nesse sentido foram infrutíferas. O recurso é a utilização de leis empíricas que se prestam para estimativas da energia dissipada durante a fragmentação (GOMIDE, 1983, p. 92).

A previsão do consumo energético da moagem apresenta, portanto, resultados que influenciam na análise de rentabilidade de empreendimentos minerários.

A obtenção de parâmetros de moabilidade, estabelecidos para a quantificação da “facilidade em reduzir a granulometria de um minério” permitiu uma comparação mais simples para a moagem de diferentes minérios.

No século XIX, Rittinger (*apud* Gomide, 1983) e Kick (*apud* Gomide, 1983) enunciaram, respectivamente, a primeira e a segunda lei para estimativa de energia necessária para fragmentação de partículas. Posteriormente, Bond (*apud* Gomide, 1983) desenvolveu a terceira lei, partindo da mesma equação diferencial, porém com adaptações na resolução.

De maneira geral, as três leis se assemelham quanto aos conceitos envolvidos. Entretanto, a utilização de cada uma garante maior precisão para uma determinada faixa granulométrica, e conseqüentemente a um determinado mecanismo de cominuição (GOMIDE, 1983).

Em aplicações mais recentes, o ensaio de moagem desenvolvido por Donda (2003) vem se mostrando bastante eficaz, atingindo desvio máximo de 10% entre os resultados previstos em laboratório e os resultados obtidos em plantas industriais.

3.2.1 Lei de Rittinger

As primeiras ideias sobre os modelos de cominuição foram desenvolvidas por Peter Ritter von Rittinger (*apud* Ferreira, 2016), professor da Universidade de Leipzig na Alemanha. Em 1867, ele elaborou a chamada “Primeira Lei de Cominuição”. De

acordo com esta lei, representada pela Equação 1, a energia necessária para a fragmentação das partículas é proporcional ao aumento da superfície produzida.

$$E = K (S_1 - S_0) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

E = Energia necessária para a fragmentação das partículas;

K = Constante de proporcionalidade;

S_1 = Área de superfície final;

S_0 = Área de superfície inicial.

Porém, a superfície específica é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas, de tal forma que a equação anterior pode ser reescrita na forma da Equação 2:

$$E = K \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{F} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

E = Energia necessária para a fragmentação das partículas;

K = Fator de proporcionalidade;

P = Diâmetro das partículas do produto;

F = Diâmetro das partículas na alimentação.

A constante K representa a facilidade de moer o material na condição específica analisada, devendo ser obtida experimentalmente (GOMIDE, 1983).

P e F representam, respectivamente, os diâmetros das partículas do produto e da alimentação do circuito (GOMIDE, 1983).

A Lei de Rittinger fornece resultados mais aderentes para a remoagem, quando o aumento da área de superfície das partículas é o principal fator a ser considerado (GOMIDE, 1983).

3.2.2 Lei de Kick

A “Segunda Lei da Cominuição” foi desenvolvida por Friedrich Kick (*apud* Ferreira, 2016), professor da universidade de Berlim. De acordo com essa lei, a energia necessária para a fragmentação está associada essencialmente à relação de redução, sendo independente do tamanho original das partículas. Pode ser expressa pela Equação 3:

$$E = K \ln \left(\frac{F}{P} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

E = Energia necessária para a fragmentação das partículas;

K = Fator de proporcionalidade;

P = Diâmetro das partículas do produto;

F = Diâmetro das partículas na alimentação.

A Lei de Kick fornece resultados mais aderentes para a britagem do que para a moagem, quando a relação de redução é o principal fator a ser considerado (GOMIDE, 1983).

3.2.3 Lei de Bond

Em 1952, Fred C. Bond (*apud* CHAGAS, 2016) propôs a “Terceira Lei da Cominuição”, que pode ser estabelecida pela Equação 4:

$$E = K \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

E = Energia necessária para a fragmentação das partículas;

K = Fator de proporcionalidade;

P = Diâmetro das partículas do produto;

F = Diâmetro das partículas na alimentação.

A energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do seu tamanho, tal que esse tamanho é definido como a abertura da peneira, pela qual passam 80% do material (Bond apud Figueira et. al., 1995).

Bond introduziu o conceito de *Work Index* (WI), ou Índice de Trabalho, como sendo a energia necessária (em kWh) para reduzir uma tonelada curta (907,18 kg) de um material de tamanho teoricamente infinito a uma granulometria cujo percentual passante na peneira de 100 µm seja igual a 80%.

Através dessa definição, a energia pôde ser expressa pela Equação 5:

$$E = 10 Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

E = Energia necessária para a fragmentação das partículas;

Wi = *Work Index* (índice de trabalho);

P = Diâmetro das partículas do produto;

F = Diâmetro das partículas na alimentação.

O *Work Index* se tornou uma referência quanto à moabilidade, devido ao seu enfoque prático e à sua extensa base de dados (ROSA, 2019).

Os ensaios para determinar o WI devem ser conduzidos a seco e em circuito fechado com um classificador. A carga circulante deve se estabilizar em 250%. Utiliza-se um moinho de 12 x 12 polegadas, operando a 70 rpm. A carga moedora consiste em 285 bolas de aço, pesando 20,125 kg e massa específica de 7,83 g/cm³, conforme uma distribuição específica. (SAMPAIO, FRANÇA E BRAGA, 2007).

A Tabela 1 apresenta a distribuição da carga estabelecida por Bond (1952):

Tabela 1 - Carga de bolas para ensaio de Work Index

Número de bolas	Diâmetro das bolas [mm]
94	15,9
71	19,1
67	30,2
43	36,5
10	25,4

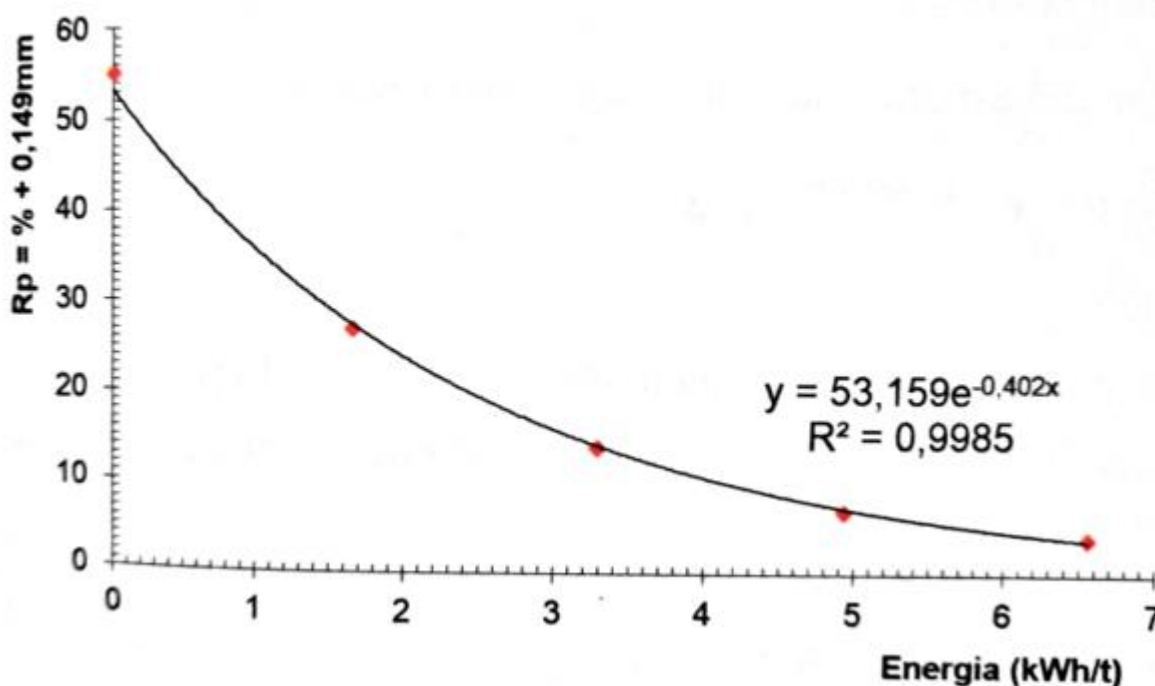
Fonte: BOND, 1940.

3.2.4 PRED - Previsão de Requerimento Energético Donda

Donda (2003) desenvolveu um método de previsão do requerimento energético na etapa de remoagem. Posteriormente, o método foi adaptado à moagem primária por Donda e Rosa (2014) e veio a ser chamado de PRED (Previsão de Requerimento Energético Donda).

O método consiste em efetuar moagens em diferentes tempos, em condições padronizadas, convertendo-se tempo em consumo específico de energia, através do cálculo da potência em moinhos de laboratório utilizando-se a equação de Rowland para moinhos de pequenos diâmetros. São feitas análises granulométricas da alimentação e dos produtos dos ensaios e plotado o gráfico da “Figura 6”. A partir do valor desejado para a porcentagem retida em 0,149 mm determina-se a energia necessária para atingir este valor (DONDA e ROSA, 2014, p. 25).

Figura 6 - Gráfico de Previsão de Requerimento Energético PRED



Fonte: DONDA e ROSA, 2014.

Ainda segundo Donda e Rosa (2014), a principal razão para o desenvolvimento deste método foi a baixa eficiência dos métodos disponíveis até então. Nem mesmo o Wi de Bond se mostrou efetivo para o objetivo em questão.

O método PRED é de simples execução, necessita de pequenas amostras e fornece estimativas precisas, que se comprovam através de altos índices de aderência entre o consumo previsto em laboratório e consumo industrial (DONDA e ROSA, 2014).

A Tabela 2 apresenta as comparações entre a energia prevista em laboratório e as obtidas industrialmente.

Tabela 2 - Aderência do consumo energético específico previsto em laboratório em relação ao industrial

Data	Consumo obtido industrialmente (kWh/t)	Consumo previsto em laboratório (kWh/t)	Relação consumo industrial/laboratório
25/01/95	3.46	3.17	1.09
27/01/95	2.93	3.06	0.96
09/02/95	3.35	3.70	0.91
30/05/95	3.28	3.13	1.05
31/05/95	2.67	2.71	0.99
01/06/95	3.23	3.07	1.05
02/06/95	3.08	2.84	1.08
27/06/95	3.39	3.33	1.02
Médias	3.17	3.13	1.02

Fonte: adaptado de DONDA e ROSA, 2014.

A análise da tabela fornece um valor máximo de 10% para o desvio entre os valores previstos em laboratório e os valores medidos em moinhos de escala industrial.

Para a execução dos ensaios, Donda (2003) estabeleceu uma série de padronizações ao teste. As condições devem ser seguidas para a realização de moagens em 4 tempos distintos, em uma distribuição uniforme. A Tabela 3 apresenta as condições em que o teste deve ser conduzido.

Tabela 3 - Padronizações teste PRED

Condições para moagem primária				
Parâmetro	Condição			
Diâmetro interno do moinho (m)	0,3048 (12 polegadas)			
Comprimento interno (m)	0,3048 (12 polegadas)			
% de enchimento	29.6			
Relação V_{polpa}/V_{vazios}	1.07			
% de sólidos em volume	49.75			
% de sólidos em peso*	79			
% velocidade crítica	70			
Peso de minério (kg) para *peso epecífico 3,8	5			
Peso da carga (kg)	30.578			
Tipo de corpo moedor	Bolas			
Distribuição da carga	Diâmetro (mm)	%		Peso (kg)
	63.5	35		10.702
	50.8	41		12.537
	38.1	18		5.504
	25.4	6		1.835
Área específica da carga	15,5 m²/t			
Volume interno do moinho (litros)	22.24			
Volume aparente da carga (litros)	6.576			
Volume de vazios da carga (litros)	2.630			
Volume de polpa (litros)	2.645			
Volume real de minério (litros)	0.696			
Volume de água (litros)	1.329			
Potência (kW) no eixo pinhão	0.1114			
Fator de conversão do tempo de moagem (minutos) em energia (kWh/t)	0.3713			
Energia no eixo pinhão (kWh/t)	2	4	8	12
Tempos de moagem (minutos)	5.4	10.8	21.5	32.3
Revestimento/"lifters "	Sem revestimento e sem "lifters "			
Limite para cálculo do K	Malha com no mínimo 5% retido			
Amostra para execução dos ensaios	Alimentação do circuito britada e peneirada, 100% passante em 9,53 mm			

Fonte: adaptado de DONDA e ROSA, 2014.

O cálculo da potência (kW) deve ser realizado através da equação de Rowland (1982) para previsão de consumo de energia para moinhos de pequeno diâmetro (Equação 6):

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

Em que:

kWb: Potência (kW) por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

D: Diâmetro interno do moinho (m);

Vp: Fração do volume do moinho ocupada pelas bolas;

Cs: Fração da velocidade crítica.

O valor obtido é relativo a uma tonelada de bolas, portanto deve ser ponderado em função da carga utilizada. A Equação 7 apresenta o cálculo.

$$P = kWb.M \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

P = Potência (kW);

kWb = Potência (kW) por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

M = Massa total da carga de bolas.

O próximo passo é encontrar o fator de conversão tempo/energia. Esse fator deve ser capaz de fornecer uma relação direta entre o tempo de moagem e a energia específica consumida. Para isso, a potência deve ser dividida pela energia específica, conforme apresentado na Equação 8:

$$\frac{P}{E} = \frac{t}{h} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

P = Potência (kW);

E = Energia específica (kWh/t);

t = Tonelada;

h = Hora.

Nesse ponto, é importante realizar uma análise dimensional, expressa através da Equação 9:

$$\frac{kW}{kWh/ton} = \frac{t}{h} \quad (\text{Equação 9})$$

Nota-se que as unidades estão corretas. A divisão da potência (kW) pela energia específica (kWh/t) resulta em uma unidade de taxa (t/h).

Isolando a energia, obtém-se a Equação 10:

$$E = \frac{P.h}{t} \quad (\text{Equação 10})$$

Entretanto, no PRED o tempo de moagem é inserido em minutos e o peso da amostra em quilogramas, o que implica na necessidade de conversão de unidades de horas para minutos e de toneladas para quilogramas.

$$1 \text{ minuto} = \frac{1}{60} \text{ hora}$$

$$1 \text{ quilograma} = \frac{1}{1000} \text{ tonelada}$$

Dessa forma, a energia pode ser expressa pela Equação 11:

$$E = P \cdot \frac{1000}{60m} \cdot T \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:

E = Energia específica (kWh/ton);

P = Potência (kW);

m = massa da amostra (kg);

T = Tempo de moagem (minutos).

O fator de conversão tempo/energia é obtido pelo termo que multiplica o tempo de moagem (T), portanto é expresso pela Equação 12:

$$\text{fator de conversão tempo/energia} = P \cdot \frac{1000}{60m} \quad (\text{Equação 12})$$

A partir desse fator de conversão é possível calcular o consumo específico de energia na moagem em cada um dos 4 tempos realizados, através de uma multiplicação simples, expressa pela Equação 13:

$$E = (\text{Fator de conversão tempo/energia}) \cdot T \quad (\text{Equação 13})$$

Em que:

E = Energia específica (kWh/t)

T = Tempo (minutos)

A próxima etapa do teste PRED é uma análise granulométrica da alimentação e dos produtos. São tomados os percentuais retidos na peneira de referência para cada tempo de moagem.

Dessa forma, com as informações relativas ao consumo de energia e à redução granulométrica decorrente da execução dos testes de moagem, é possível construir uma curva, como apresentado anteriormente na Figura 6.

A interpretação deste gráfico permite a determinação da energia necessária para atingir uma determinada granulometria.

Além disso, de acordo com Donda e Rosa (2014), “A energia específica necessária para a redução de tamanho dos minérios do Quadrilátero Ferrífero, no eixo pinhão de um moinho de bolas, pode ser determinada pela relação” (Equação 14):

$$E = \frac{1}{K} \ln (F/P) \quad (\text{Equação 14}):$$

Em que:

E = Energia específica em kWh/t, em moinhos tubulares, no eixo pinhão do moinho;

K = Parâmetro característico do minério para a malha de interesse, naquela condição de moagem;

F = Massa retida de partículas na malha de interesse na alimentação do circuito;

P = Massa retida de partículas na malha de interesse no produto do circuito.

Mas, considerando que:

F = (Massa total) x (% retida acumulada na alimentação) / 100;

P = (Massa total) x (% retida acumulada no produto) / 100;

K = Parâmetro determinado nos testes de moabilidade de Donda.

É válida a Equação 15:

$$E = \frac{1}{K} \ln (R_f/R_p) \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

R_f = % retida acumulada na alimentação;

R_p = % retida acumulada no produto.

A Equação 15 pode também ser expressa em sua forma exponencial. Através de algumas manipulações algébricas é possível transformá-la na Equação 16:

$$R_p = R_f \cdot e^{-(K.kWh/t)} \quad (\text{Equação 16})$$

A comparação entre a Equação 16 e a equação do gráfico permite, portanto, a obtenção do parâmetro K, que indica a moabilidade do minério (expressa em t/kWh). Este parâmetro é intrínseco ao minério na condição analisada, e representa a facilidade de cominuição do minério.

Este fator tem uma relação inversa com o consumo específico de energia, ou seja, quanto maior o valor de K, menor a quantidade de energia que deve ser fornecida ao minério para reduzir sua granulometria.

O parâmetro K, obtido em bancada, pode ser utilizado para estimativas industriais de consumo energético necessário ao atingimento de uma determinada granulometria, de acordo com a Equação 15. “As previsões feitas através do método estarão numa faixa entre 0,90 e 1,10 vezes o valor do consumo específico industrial” (DONDA e ROSA, 2014).

O valor calculado para o consumo específico de energia pode ser relacionado com o valor de potência em moinhos industriais, utilizando a Equação 8, apresentada anteriormente. Dessa forma é possível determinar a taxa de alimentação adequada ao moinho.

O método PRED possibilita, através de procedimentos simples, a obtenção de parâmetros valiosos, que permitem um controle mais preciso da etapa de moagem. Dessa forma, o dimensionamento e a operação de instalações industriais podem ser realizados de maneira mais eficiente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

A caracterização química da amostra foi realizada através da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX).

O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X do fabricante PANalytical, modelo Zetium, apresentando na Figura 7:

Figura 7 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X PANalytical Modelo Zetium



A análise mineralógica foi realizada por microscopia óptica, através do Microscópio Leica modelo DM750 P, apresentado na Figura 8:

Figura 8 - Microscópio Leica modelo DM750 P



4.2 TESTE PRED

Os ensaios foram conduzidos de forma a obter o parâmetro de moabilidade (K) da amostra de minério de ferro itabirítico.

O teste PRED foi executado em 4 etapas complementares, conforme apresentado na Figura 9:

Figura 9 - Etapas do teste PRED



Todas essas etapas foram realizadas sob a supervisão de um profissional da área, como parte de um projeto de consultoria mineral. Em razão do sigilo contratual, alguns dados podem ser apresentados de maneira simplificada com o intuito de preservar a integridade e a exclusividade dos resultados obtidos pela empresa contratante. A seguir, as etapas serão detalhadas individualmente.

4.2.1 Preparo de Alíquotas

Para obter alíquotas representativas de 5,169 kg, conforme estabelecido pelo teste PRED para as condições do material, foram realizados procedimentos de homogeneização e quarteamento.

4.2.2 Ensaio de Moagem

A moagem foi realizada em um moinho de 30 centímetros de diâmetro, encapsulado, e controlado por um inversor de frequência, como pode ser visto na Figura 10:

Figura 10 – Moinho de bolas (escala de bancada)



Fonte: Brastorno.

A alimentação do moinho foi feita de maneira escalonada, alternando entre minério, carga moedora e água com pH ajustado para 10,5 através da adição de NaOH em solução (5%). Esse processo foi realizado em 3 ciclos de volume aproximado, conferindo uma distribuição homogênea à polpa desde o início da moagem.

Foram efetuadas moagens em 4 tempos diferentes:

- 7 minutos;
- 14 minutos;
- 21 minutos;
- 28 minutos.

As condições específicas da moagem estiveram de acordo com os padrões do teste PRED, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados no PRED

Parâmetros Teste PRED	
Diâmetro do moinho (m)	0.3048
Comprimento do moinho (m)	0.3048
% Enchimento	30%
% Velocidade crit.	70%
%Sól Volume	49.8%
Relação Vpolpa/Vvazios	1.004
Tipo de corpo moedor	bolas
Volume da carga (l)	6.583
Volume de polpa (l)	2.652
Peso da amostra (kg)	5.169
Volume de água (l)	1.332
%Sólido Massa	79.50
Rotação (rpm)	53.6
Potência (kW)	0.112
Fator de conversão tempo/energia	0.362

Todas as condições utilizadas atenderam aos valores previstos pelo teste PRED. A única exceção foi a porcentagem de sólidos, que se mostrou um pouco alta após a primeira moagem. Neste caso, houve a necessidade de alteração para um valor de 74% e o processo foi repetido.

As três últimas linhas da Tabela 5 correspondem a parâmetros calculados em função das características do moinho e da amostra. A velocidade de rotação do moinho (rpm) foi calculada em função da velocidade crítica, considerando o percentual de 70%. O cálculo da potência (kW) foi realizado através da equação de Rowland (1982) para previsão de consumo de energia para moinhos de pequeno diâmetro (Equação 6). O fator de conversão tempo/energia foi obtido através da Equação 12.

A carga de bolas utilizada seguiu também a padronização do teste PRED. A carga utilizada teve seu peso aferido e os valores apresentaram uma boa aproximação aos valores teóricos, conforme apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 - Carga de bolas utilizada no PRED

Diâmetro (mm)	%	Massa teórica (kg)	Massa real (kg)
63,5	35	10,714	10,32
50,8	41	12,551	12,84
38,1	18	5,510	5,67
25,4	6	1,837	1,78
Total	100	30,61	30,61

Fonte: DONDA e ROSA, 2014.

4.2.3 Análises Granulométricas

Após a etapa de moagem, foram separadas alíquotas dos produtos através de procedimentos de homogeneização e quarteamento.

As alíquotas foram destinadas à execução de análises granulométricas por peneiramento combinado. Além das 4 alíquotas moídas, uma quinta foi considerada como “alimentação”, não sendo submetida a moagem. As análises granulométricas foram conferidas quanto à possibilidade de extrapolação da massa máxima. Nenhuma das peneiras superiores às malhas de referência analisadas apresentou sobrecarga.

4.2.4 Análise de Dados

Os dados obtidos através dos procedimentos anteriores foram compilados e analisados através de planilhas e gráficos.

Os resultados serão apresentados e discutidos na próxima sessão deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

A caracterização química da amostra apresentou os seguintes resultados, expressos na Tabela 6:

Tabela 6 - Análise química do minério de ferro itabirítico

Análise Química (%)				
Fe	Al ₂ O ₃	P	PPC	Mn
47,22	1,24	0,070	4,16	0,18

Nota-se um teor de ferro de 47,22%. Este valor, relativamente alto, indica a presença de minerais de ferro em grandes proporções no minério. O percentual de “perda por calcinação (PPC)” também foi elevado, apontando para a existência de minerais hidratados.

A análise mineralógica dos minerais de ferro apontou a presença dos seguintes minerais:

- Martita;
- Goethita;
- Hematita;
- Magnetita.

A presença de Goethita explica o teor elevado de “perda por calcinação (PPC)”, conforme foi apontado pela análise química.

As duas análises se complementam e demonstram coerência, de forma que a amostra analisada pode ser definida como um itabirito.

5.2 MOABILIDADE E REQUERIMENTO ENERGÉTICO

Foi obtido o valor de 0,362 para o fator de conversão tempo/energia através da Equação 12. Este fator tornou o teste muito mais simples, permitindo uma associação direta entre o tempo utilizado para a moagem e o consumo específico de energia (kWh/t). A Tabela 7 apresenta a conversão realizada para a alimentação e os tempos utilizados no teste.

Tabela 7 - Energia calculada para tempos de moagem

Característica do Ensaio	
Tempo (min)	Energia (kWh/t)
0	0.0
7	2.5
14	5.1
21	7.6
28	10.1

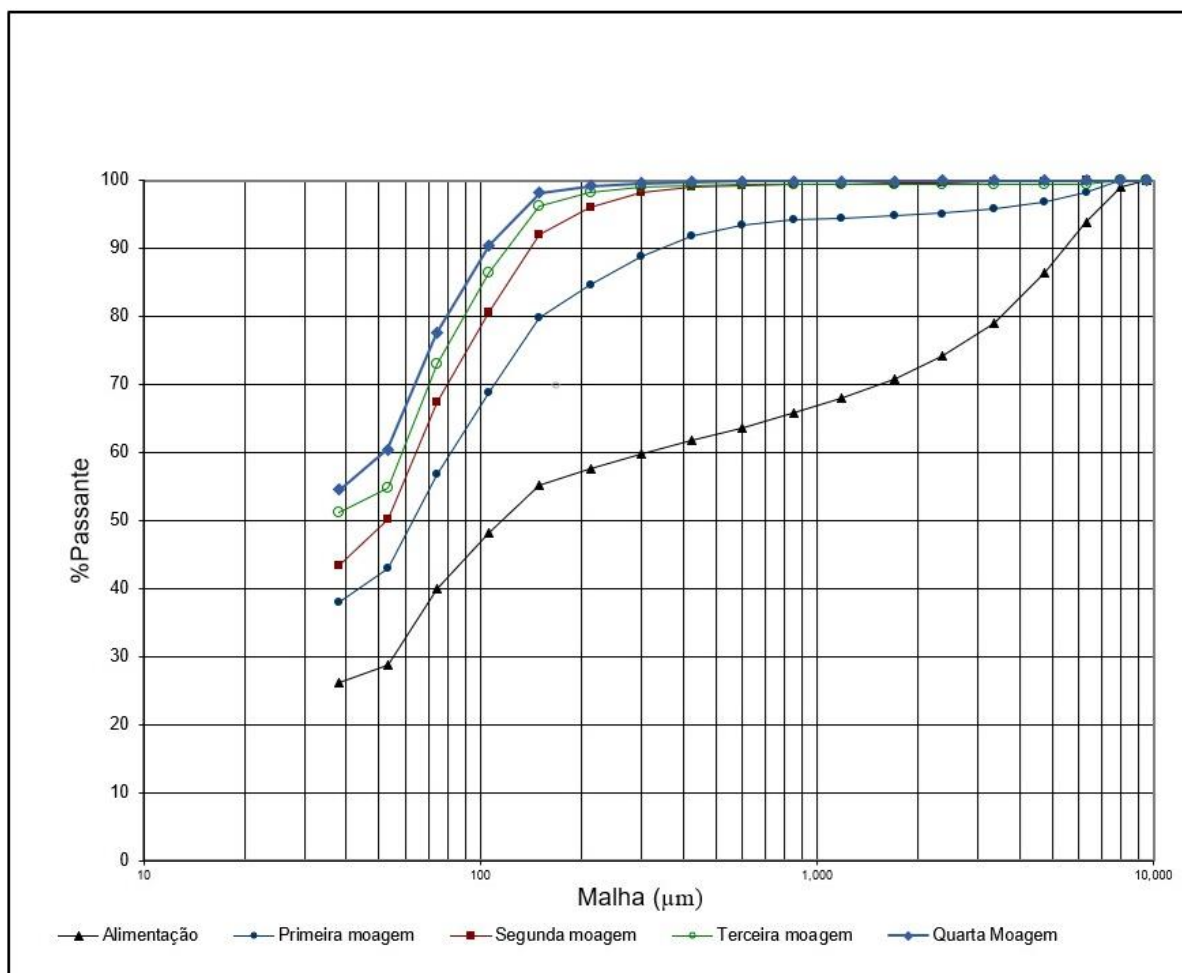
Após a realização da etapa de moagem em 4 tempos distintos, foram realizadas análises granulométricas dos produtos e da alimentação. Os resultados estão apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Análises granulométricas da alimentação e produtos da moagem

Peneiramento	Alimentação				Primeira moagem - 7 min				Segunda moagem - 14 min				Terceira moagem -21 min				Quarta Moagem - 28 min			
Abertura	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-	Massa	% Ret.	% Ret.	% Pas-
µm	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante	(g)	Simples	Acumul.	sante
9,525	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
8,000	2.12	0.95	0.95	99.05	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
6,300	11.57	5.21	6.17	93.83	2.42	1.72	1.72	98.28	0.00	0.00	0.00	100.00	0.75	0.53	0.53	99.47	0.00	0.00	0.00	100.00
4,750	16.22	7.31	13.47	86.53	1.90	1.35	3.06	96.94	0.36	0.23	0.23	99.78	0.00	0.00	0.53	99.47	0.00	0.00	0.00	100.00
3,350	16.5	7.43	20.91	79.09	1.66	1.18	4.24	95.76	0	0.00	0.23	99.78	0.00	0.00	0.53	99.47	0.00	0.00	0.00	100.00
2,360	10.98	4.95	25.85	74.15	0.87	0.62	4.86	95.14	0.22	0.14	0.36	99.64	0	0.00	0.53	99.47	0.06	0.04	0.04	99.96
1,700	7.27	3.27	29.13	70.87	0.37	0.26	5.12	94.88	0.15	0.09	0.46	99.54	0.04	0.03	0.56	99.44	0.03	0.02	0.06	99.94
1,180	6.39	2.88	32.00	68.00	0.52	0.37	5.49	94.51	0.13	0.08	0.54	99.46	0.00	0.00	0.56	99.44	0.02	0.01	0.08	99.92
850	4.61	2.08	34.08	65.92	0.51	0.36	5.85	94.15	0.11	0.07	0.61	99.39	0.05	0.04	0.59	99.41	0.04	0.03	0.10	99.90
600	4.95	2.23	36.31	63.69	1.05	0.74	6.60	93.40	0.17	0.11	0.71	99.29	0.05	0.04	0.63	99.37	0.02	0.01	0.12	99.88
425	4.24	1.91	38.22	61.78	2.21	1.57	8.16	91.84	0.41	0.26	0.97	99.03	0.09	0.06	0.69	99.31	0.12	0.08	0.20	99.80
300	4.35	1.96	40.18	59.82	4.19	2.97	11.13	88.87	1.23	0.77	1.74	98.26	0.36	0.25	0.94	99.06	0.26	0.18	0.38	99.62
212	4.68	2.11	42.29	57.71	5.89	4.18	15.31	84.69	3.47	2.17	3.91	96.09	1.14	0.80	1.75	98.25	0.64	0.44	0.82	99.18
150	5.32	2.40	44.68	55.32	6.97	4.94	20.26	79.74	6.50	4.06	7.97	92.03	2.89	2.04	3.78	96.22	1.39	0.95	1.77	98.23
106	15.74	7.09	51.77	48.23	15.32	10.87	31.12	68.88	18.37	11.48	19.45	80.55	14.00	9.86	13.64	86.36	11.32	7.75	9.52	90.48
74	18.36	8.27	60.05	39.95	16.95	12.02	43.14	56.86	21.08	13.18	32.63	67.38	18.87	13.29	26.93	73.07	18.85	12.91	22.43	77.57
53	24.91	11.22	71.27	28.73	19.64	13.93	57.07	42.93	27.50	17.19	49.81	50.19	26.03	18.33	45.26	54.74	24.97	17.10	39.53	60.47
38	5.63	2.54	73.80	26.20	6.95	4.93	62.00	38.00	10.79	6.74	56.56	43.44	5.14	3.62	48.88	51.12	8.68	5.95	45.48	54.52
-38	58.16	26.20	100.00	---	53.58	38.00	100.00	---	69.51	43.44	100.00	---	72.59	51.12	100.00	---	79.60	54.52	100.00	---
Massa Total 1	222.00	---	---	---	141.00	---	---	---	160.00	---	---	---	142.00	---	---	---	146.00	---	---	---
Tempo (min)	0				7.0				14.0				21.0				28.0			
Energia (kWh/t)	0				2.5				5.1				7.6				10.1			

A partir dessa tabela, foram plotadas as curvas granulométricas da alimentação e dos produtos, em escala logarítmica para o eixo das abscissas, apresentadas na Figura 11:

Figura 11 - Curvas granulométricas da alimentação e produtos da moagem



A curva da alimentação foi a única a apresentar um padrão distinto, com uma suavização em granulometrias intermediárias, enquanto seus extremos apresentaram inclinações mais acentuadas. Isso demonstra uma distribuição mais heterogênea, o que é condizente com uma amostra que não foi moída.

Em contrapartida, o processo de moagem gera uma gradação mais regular na amostra, apresentando curvas mais uniformes em todas as faixas granulométricas, fenômeno explicado pela sucessiva quebra de partículas maiores em fragmentos menores.

Todas os tempos de moagem apresentam curvas bem definidas seguindo um mesmo padrão, de forma que não existem indícios de erro no processo de análise granulométrica. Picos de material passante poderiam ser indicativos de defeitos nas peneiras utilizadas.

A primeira moagem, realizada com o tempo de 7 minutos, apresenta uma curva mais próxima da alimentação, que corresponde a um material mais grosso, evidenciado por um percentual passante na peneira de 0,150 mm de 79,74%, valor inferior às outras moagens. Esse fato já era esperado, de forma que as demais moagens também atenderam a este padrão. Conforme o aumento do tempo de moagem, o percentual passante na malha de 0,150 mm aumentou para 92,03% na moagem de 14 minutos, 96,22% na moagem de 21 minutos e 98,23% na moagem de 28 minutos.

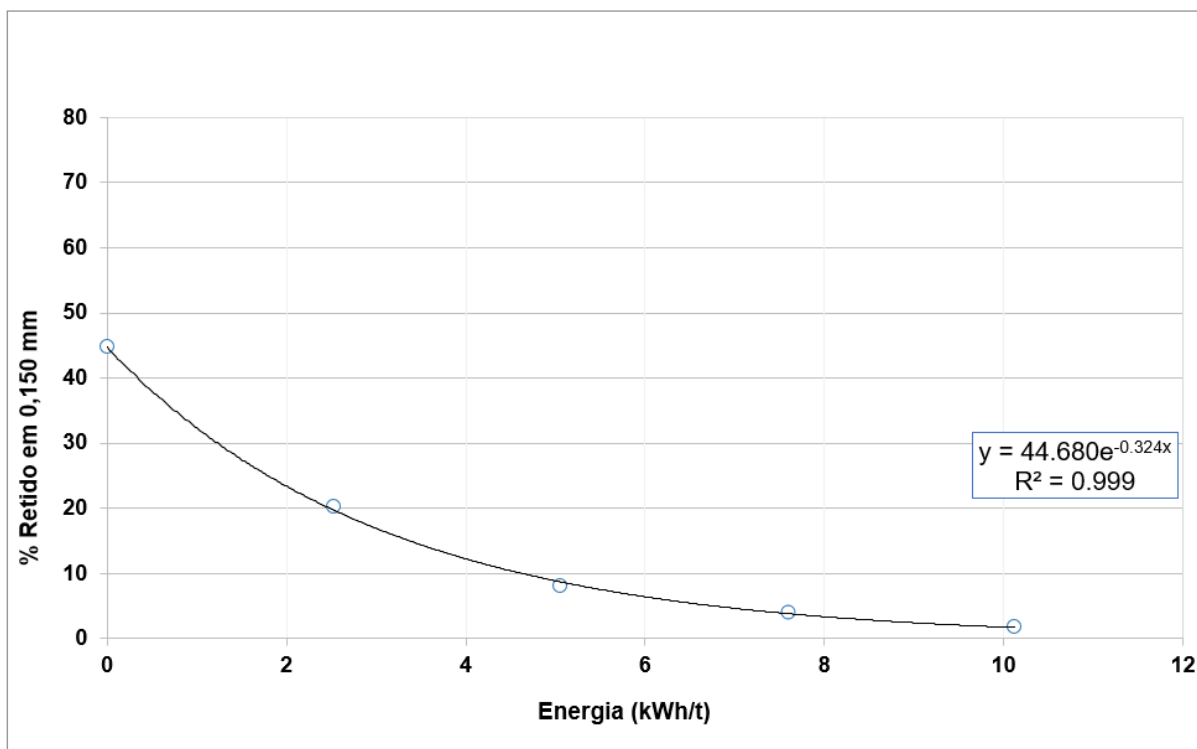
O cruzamento dos dados de consumo específico de energia (kWh/t) com o percentual retido acumulado na malha de interesse (0,150 mm) permitiu a construção da Tabela 9:

Tabela 9 - Energia calculada para a malha de 0,150 mm

Requerimento Energético	
Energia (kW/h)	% +0,150mm
0.00	44.68
2.53	20.26
5.06	7.97
7.59	3.78
10.12	1.77

A Tabela 9, por sua vez, permitiu a construção da curva de requerimento energético para o minério de ferro itabirítico em análise neste trabalho, apresentada na Figura 12:

Figura 12 - Requerimento energético para malha de 0,150 mm



A curva de requerimento energético (Figura 12) apresenta a energia necessária por tonelada (kWh/t) para atingir uma determinada granulometria no minério, definida pelo percentual retido na peneira de abertura 0,150 mm.

O coeficiente de correlação R^2 obteve uma boa aproximação ao valor 1, o que indica aderência entre a curva teórica e os pontos obtidos experimentalmente.

A partir da análise da equação do gráfico, e utilizando a teoria do teste PRED, foi possível obter um coeficiente de moabilidade (K) equivalente a 0,324 t/kWh na condição de moagem analisada. Este fator é intrínseco ao minério, podendo ser utilizado em outras escalas de análise, como em uma planta piloto ou industrialmente, desde que respeitados os limites de precisão previstos por Donda (2003), no caso um desvio máximo de 10% para mais ou para menos no valor de energia previsto.

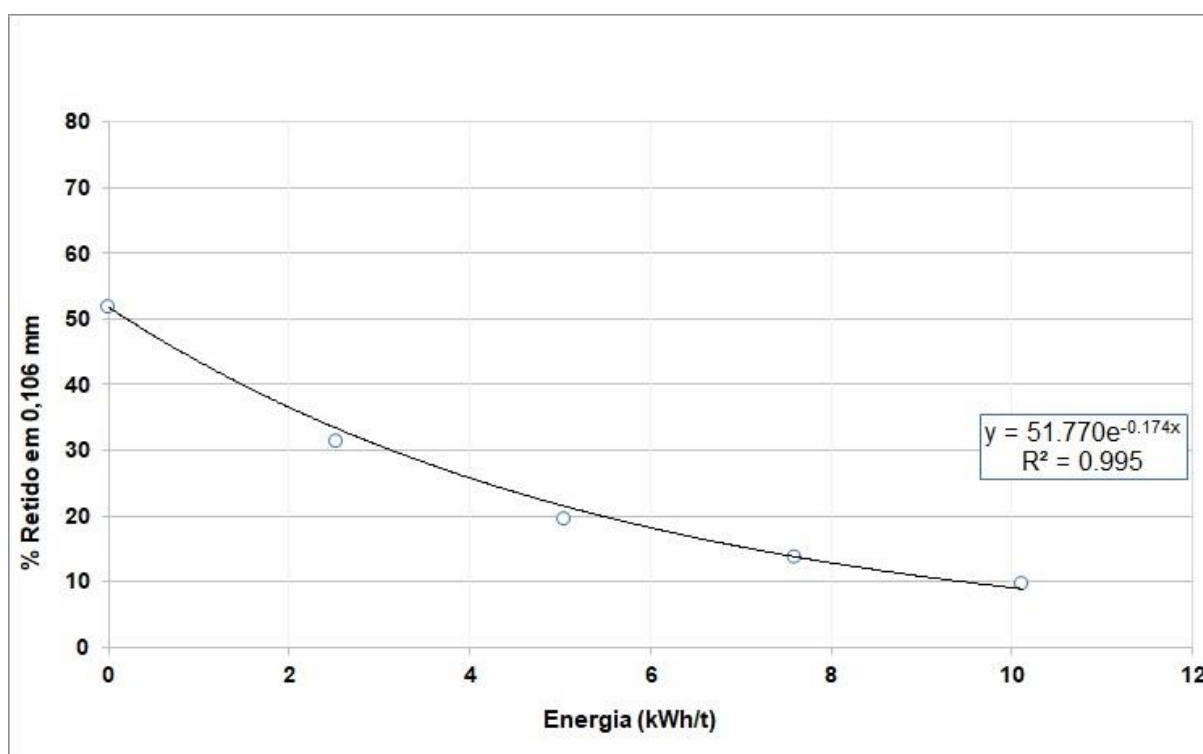
A aplicação da Equação 15 ao valor de K encontrado possibilitou, como exemplo prático, a previsão do consumo específico de energia para atingir 4 granulometrias distintas, definidas pelo percentual retido na malha de 0,150 mm, conforme apresentado na Tabela 10. A energia foi utilizada para determinação do tempo de moagem (DTM) através do fator de conversão tempo/energia e da Equação 13, em um sentido inverso.

Tabela 10 - Determinação do tempo de moagem

DTM				
% +0,150 mm	k	Energia	Tempo de moagem	
			min	min : s
20	0.324	2.481	6.863	6 52
15		3.369	9.32	9 19
10		4.621	12.78	12 47
5		6.76	18.7	18 42

De forma análoga à aplicação do método para a malha de 0,150 mm, o teste foi também avaliado na malha de 0,106 mm, de forma a obter uma análise semelhante à do ensaio de *Work Index* (Wi), que avalia a energia necessária para atingir um P_{80} em 100 μm . A Figura 13 apresenta o gráfico gerado para essa condição:

Figura 13 - Requerimento energético para malha de 0,106 mm



Aplicando a Equação 15, foi obtido o valor de 5,466 kWh/t para o requerimento energético.

Realizando a conversão para tonelada curta, o requerimento energético obtido através do teste PRED para essa condição foi de 4,958 kWh/st.

“Segundo a literatura, o WI de um minério itabirítico varia de 6 a 25kWh/st” (NEVES *et al.*, 2019).

Entretanto, estudos de Turrer *et al.* (2013) apresentaram Wi (*Work Index*) de 4,9 kWh/st e 3,9 kWh/st com amostras de itabirito friável e compacto.

Portanto, o valor encontrado demonstrou-se coerente com os dados da literatura, aproximando-se do limite inferior e a amostra em estudo pôde ser classificada como um itabirito friável.

6 CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia estabelecida pelo teste PRED possibilitou a obtenção de um valor de 0,324 t/kWh para o parâmetro de moabilidade (K) do minério de ferro itabirítico em análise neste trabalho.

Os testes forneceram estimativas de consumo específico de energia que variaram de 2,48 kWh/t a 6,76 kWh/t na redução das partículas da alimentação às granulometrias de “20% retido em 0,150 mm” e “5% retido em 0,150 mm”, respectivamente.

Foram também avaliadas condições de moagem semelhantes às estabelecidas pelo ensaio de *Work Index* (Wi), tomando como referência um P₈₀ em 0,106 mm. Nesse caso, a energia específica necessária para a redução do minério obtida foi equivalente a 5,466 kWh/t. Este comparativo demonstrou-se coerente com as referências de *Work Index* (Wi) encontradas para itabiritos.

Apesar de previstas pelo método, a aplicabilidade e a aderência dos resultados obtidos em bancada não foram validadas em maiores escalas neste trabalho. Tais comprovações podem ser obtidas a partir de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRINO, Júnia Soares; BARROS, Adriano Jose de; SILVA, Cibelle Cristina Martins; DORNELAS, Cínthia Alexandre da Silva. **Estudo de caso: tecnologias e processos utilizados no tratamento de minérios de ferro de baixo teor**. Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales, 2017.
- BOND, F. C.; AGTHE, F. T. **DELETERIOUS COATINGS OF THE MEDIA IN DRY BALL MILLING**. Mining Technology, 1940.
- CARVALHO, P. S. L. de, et al. **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.
- CHAGAS, Tays Torres Ribeiro das. **A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química, e microestrutura**. Ouro Preto, 2008.
- COSTA, Evair Nunes da. **Peneiramento de partículas finas e ultrafinas com adição de dispersantes**. Catalão, agosto de 2014.
- DONDA, J. D. **Um Método para Prever o Consumo Específico de Energia na (re)moagem de Concentrados de Minérios de Ferro em Moinhos de Bolas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), REDEMAT / UFOP-CETEC-UEMG - 97 p. 2003;
- DONDA, Joaquim Donizetti; ROSA, Andreia Carolina. **A Lei de Moagem: Comprovação para minério de ferro**. 1. ed. Ouro Preto: Livraria e Editora Graphar, 2014.
- FERREIRA, Kelly Cristina. **Avaliação e otimização da etapa de moagem primária e remoagem de um minério de ferro itabirítico da região de morro do pilar**. 2016.
- GOMIDE, Reynaldo. **Operações unitárias**. Ed. do Autor, 1980.
- JESUS, Carlos Antônio Gonçalves de. Ferro/Aço. **Economia mineral do Brasil**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2009.
- LYNCH, Alban J.; ROWLAND, Chester A. **The history of grinding**. SME, 2005.
- MAZZINGHY, Douglas Batista. **Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação**. Belo Horizonte, 2009.
- NEVES, T.V. , SILVA, L.S.S. , DE SÃO JOSÉ, F. , PEREIRA, C.A. **Caracterização da moagem de um itabirito anfíbolítico – estudo de work index**. Belo Horizonte, 2019.
- OLIVEIRA, Maria Lúcia Magalhães de; AQUINO, José Aury de. **Amostragem**. CETEM/MCTI, 2007.

RODRIGUES, Victor Hugo Machado. **Avaliação das diferenças entre bolas forjadas e bolas fundidas no processo de moagem**. Belo Horizonte, fevereiro de 2015.

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

ROWLAND, C. A. **Selection of Rod Mills, Ball Mills, Pebble Mills and Regrind Mills**. In: MULLAR, A. L.; JERGENSEN, G. V. Design and installation of comminution circuits. New York: SME, 1982.

SALES, Cristiano. **Tratamento de Minérios III – Laboratório**. 2017. Curso de Engenharia de Minas da UEMG - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MINAS GERAIS. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/10715327/>>. Acesso em: 12/08/2023.

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

SAMPAIO, João Alves; DELBONI JÚNIOR, Homero. **Cominuição: Princípios da cominuição**. Tratamento de Minérios – 6ª Edição – CETEM, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 1, cap. 10, p. 95-116.

TOTTI, Emilcy das Graças Guimarães *et al.* **A seco, a úmido ou combinado: comparação entre as diferentes técnicas de peneiramento**. 2022.

TURRER, Henrique Dias Gatti *et al.* **Avaliação do consumo energético na moagem de dois diferentes tipos litológicos do depósito da Serra do Sapo**. p. 278-286. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e o 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, São Paulo, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. Sistema de Bibliotecas e Informação. **Guia para normalização bibliográfica de trabalhos acadêmicos**. Ouro Preto, 2017. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/image/guia-normalizacao-sisbin.pdf>>. Acesso em: 10/08/2023.