

## AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS CINÉTICOS DE MOAGEM PARA AMOSTRAS DE ITABIRITOS COMPACTO E FRIÁVEL

MAZZINGHY, D.B.<sup>1</sup>, RUSSO, J.F.C.<sup>2</sup>, PIMENTEL, D.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> AngloAmerican. douglas.mazzinghy@angloamerican.com

<sup>2</sup> AngloAmerican. jose.russo@angloamerican.com

<sup>3</sup> AngloAmerican. danielle.pimentel@angloamerican.com

### RESUMO

Duas amostras de minério de ferro classificadas como itabiritos compacto e friável foram testadas com relação a moabilidade. Os testes foram realizados em um moinho de bolas em escala de laboratório com torquímetro para medição precisa da potência. Os parâmetros cinéticos das amostras foram determinados através do aplicativo *Moly-Cop Tools 2.0*. Simulações foram realizadas com o mesmo aplicativo para previsão do comportamento do circuito de moagem com cada uma das amostras estudadas. Os resultados indicam que a amostra de itabirito friável possui maior consumo específico de energia, mesmo sendo uma amostra de granulometria mais fina que a amostra de itabirito compacto.

**PALAVRAS-CHAVE:** moagem; simulação; itabiritos; parâmetros de quebra.

### ABSTRACT

Two samples of iron ore classified as friable and compact itabirites were tested for their grindability. The tests were carried out in a ball mill on a laboratory scale with a torque device for accurate measurement of power. The kinetic parameters of the samples were determined by *Moly-Cop Tools 2.0*. Simulations were performed with the same application for forecasting the behavior of the grinding circuit with each of the samples studied. The results indicate that the friable itabirite sample has high specific energy consumption when compared with itabirite compact, even with more fines in particle size distributions.

**KEYWORDS:** grinding; simulation; itabirites; breakage parameters.

## 1. INTRODUÇÃO

O Projeto Minas-Rio, de propriedade da AngloAmerican, está em fase de implantação e prevê o beneficiamento de minérios itabiríticos classificados como compacto e friável. A usina de beneficiamento, localizada na cidade de Conceição do Mato Dentro no estado de Minas Gerais, possui dois circuitos de moagem primária. Cada circuito é composto por um moinho de bolas de 7,8m de diâmetro por 12,6m de comprimento e duas baterias de 8 hidrociclones de 800mm de diâmetro. Cada moinho de bolas possui dois motores de 7.500kW, totalizando 15.000W por circuito. O circuito de moagem é do tipo direto. O objetivo deste trabalho é avaliar os parâmetros de quebra destes dois tipos litológicos que irão alimentar a usina de beneficiamento.

### 1.1. Modelo de Moagem

O modelo do balanço populacional tem sido muito utilizado para a simulação de circuitos de moagem. Este tipo de modelo considera todas as faixas granulométricas e não apenas uma única faixa como o modelo empírico de BOND (1952). A Equação 1 descreve o modelo do balanço populacional para a moagem em batelada (AUSTIN *et al.*, 1984).

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

$m_i(t)$  = 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 2 apresenta um modelo para descrever a função quebra acumulada  $B_{ij}$  (AUSTIN *et al.*, 1984). Os parâmetros  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  representam as constantes dependentes das características do material.

$$B_{i,j} = \beta_0 \left( \frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\beta_1} + (1 - \beta_0) \left( \frac{d_i}{d_{j+1}} \right)^{\beta_2}, \quad 0 \leq \beta_0 \leq 1 \quad (2)$$

A Equação 3 apresenta um modelo para descrever a função seleção  $S_i$  (AUSTIN *et al.*, 1984). Os parâmetros  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $d_{crit}$  representam as constantes dependentes do material e das condições de moagem.

$$S_i = \frac{\alpha_0 (d_i)^{\alpha_1}}{1 + \left( \frac{d_i}{d_{crit}} \right)^{\alpha_2}}, \quad \alpha_2 \geq 0 \quad (3)$$

Segundo HERBST & FUERSTENAU (1980) a função seleção  $S_i$  tem relação de proporcionalidade com a potência absorvida pelo moinho e a massa contida neste, conforme a Equação 4.

$$S_i = S_i^E \left( \frac{P}{H} \right) \quad (4)$$

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

$S_i^E$  = função seleção específica em energia (t/kWh);

$P$  = potência líquida demandada pelo moinho (kW);

$H$  = massa de material contida no moinho (t).

## 1.2. Estimativa de Potência

A potência do moinho pode ser estimada através das suas dimensões e das condições operacionais, conforme a Equação 5 proposta por HOGG & FUERSTENAU (1972).

$$P_{liq} = \eta P_{inst} = 0,238 D^{3,5} \left( \frac{L}{D} \right) N_c \rho_{ap} (J - 1,065 J^2) \text{sen} \alpha \quad (5)$$

$P_{liq}$  = potência líquida (kW);

$P_{inst}$  = potência instalada (kW) =  $P_{cons.} / \eta$

$\eta$  = eficiência de transmissão elétrica e de potência, %;

$D$  = diâmetro interno do moinho (pés);

$L$  = comprimento efetivo do moinho (pés);

$N_c$  = Fração da velocidade crítica:  $N_{crit} = 76,6/D^{0,5}$ ;

$\rho_{ap}$  = densidade aparente da carga ( $t/m^3$ );

$J$  = enchimento volumétrico (%);

$\alpha$  = ângulo de levantamento da carga.

Este modelo foi expandido de sua formulação original para representar independentemente a contribuição de cada componente da carga, bolas e polpa, para a potência total do moinho por SEPÚLVEDA (2004). A densidade aparente da carga  $\rho_{ap}$  pode ser estimada conforme a Equação 6.

$$\rho_{ap} = \frac{(1 - f_v) \rho_b J_b + \rho_p J_p f_v J_b + \rho_p (J - J_b)}{J} \quad (6)$$

$f_v$  = volume (%) de vazios intersticiais entre as bolas (tipicamente assume ser 40% do volume aparente ocupado pelas bolas);

$J_b$  = enchimento aparente de bolas (%) (incluindo bolas, polpa e vazios intersticiais entre as bolas);

$J_p$  = enchimento intersticial da polpa (%), corresponde à fração intersticial de vazios disponíveis (entre a carga de bolas) na verdade ocupada pela polpa e partículas finas;

$\rho_p$  = peso específico da polpa ( $t/m^3$ ).

## 1.3. Modelo de Classificação

O modelo de PLITT (1976) foi desenvolvido através da análise estatística de trezentos ensaios experimentais. As equações do modelo são descritas a seguir.

Pressão de alimentação do ciclone

$$H = a_1 \left( \frac{Q^{1,46} \exp(-7,63\phi + 10,79\phi^2)}{(Dc)^{0,20} h^{0,15} (Di)^{0,51} (Do)^{1,65} (Du)^{0,53}} \right) \quad (7)$$

$a_1$  = constante dependente da aplicação;

$Dc$  = diâmetro do ciclone (pol.);

$Di$  = diâmetro de entrada do ciclone (pol.);

$Do$  = *vortex* (pol.);

$Du$  = *apex* (pol.);

$h$  = altura do ciclone (pol.);

$H$  = pressão de alimentação do ciclone (pés de coluna de polpa);

$Q$  = vazão de alimentação ( $m^3/h$ );

$\phi$  = fração de sólidos em volume na alimentação.

Tamanho de corte corrigido,  $d_{50c}$

$$d_{50c} = a_2 \left( \frac{(Dc)^{0,44} (Di)^{0,58} (Do)^{1,91} \exp(11,12\phi)}{(Du)^{0,80} h^{0,37} Q^{0,44} (\rho_s - 1)^{0,5}} \right) \quad (8)$$

$a_2$  = constante dependente da aplicação. O tamanho de corte corrigido  $d_{50c}$  é definido como sendo um tamanho de partícula que deveria ser dividido em 50% indo para o *underflow* e 50% indo para o *overflow* baseado na curva de eficiência corrigida.

Partição de Fluxo

$$S = a_3 \frac{h^{0,19} \left( \frac{Du}{Do} \right)^{2,64} \exp(-4,33\phi + 8,77\phi^2)}{H^{0,54} (Dc)^{0,38}} \quad (9)$$

$S$  = carga circulante volumétrica (razão entre *underflow* e *overflow*);

$a_3$  = constante dependente da aplicação.

Eficiência de Classificação Corrigida

$$E_i^c = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{d_i}{d_{50c}} \right)^m \right] \quad (10)$$

O parâmetro  $m$  de PLITT pode ser calculado como segue:

$$m = \exp \left[ a_4 - 1,58 \frac{S}{(S+1)} \right] \left[ \frac{(Dc)^2 h}{Q} \right]^{0,15} \quad (11)$$

$a_4$  = constante dependente da aplicação.

Curto Circuito de Polpa

O modelo de classificação do CIMM (GUTIÉRREZ & SEPÚLVEDA, 1986) é uma variação do modelo de PLITT. Este modelo considera mais uma equação para descrever o curto circuito de polpa.

$$B_{pf} = \lambda B_{pw} \quad (12)$$

$B_{pf}$  = curto circuito para *underflow*;

$B_{pw}$  = curto circuito de água;

$\lambda$  = constante dependente da aplicação.

O curto circuito de água  $B_{pw}$  pode ser descrito pela Equação 13.

$$B_{pw} = \frac{\frac{S}{(S+1)} - \phi R_s^c}{1 - \phi[1 - \lambda(1 - R_s^c)]} \quad (13)$$

$R_s^c$  = recuperação total de sólidos em peso (hipotética).

## 1.4. Índice de Trabalho Operacional

O índice de trabalho operacional  $W_{io}$  é descrito conforme a Equação 14 (BOND, 1952).

$$W_{io} = \frac{E}{10 \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \right]} \quad (14)$$

$W_{io}$  = Índice de trabalho operacional (kWh/t);

$E$  = Consumo específico de energia (kWh/t);

$F_{80}$  = 80% passante na alimentação nova do circuito ( $\mu\text{m}$ );

$P_{80}$  = 80% passante no produto do circuito ( $\mu\text{m}$ ).

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Amostras

A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de itabiritos compacto e friável.

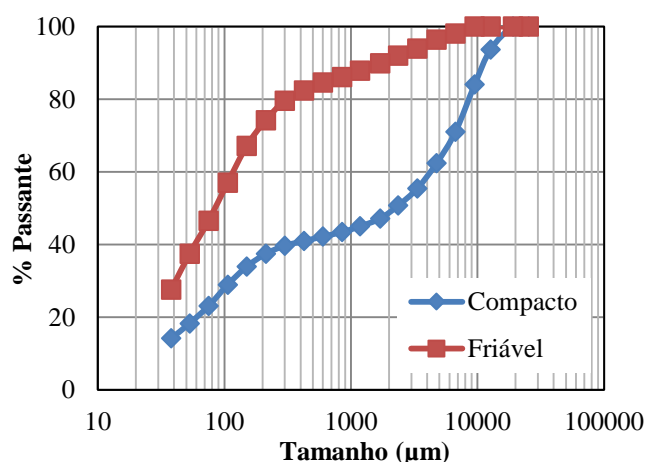


Figura 1. Distribuição granulométrica das amostras de itabirito compacto e friável.

### 2.2. Carga Moedora

A Tabela I apresenta a distribuição de tamanhos das bolas utilizadas nos testes com as amostras de itabiritos compacto e friável.

Tabela I. Distribuição de tamanhos das bolas utilizadas nos testes.

mm	%
63,5	36,0
50,8	41,0
38,1	17,2
25,4	5,8
Total	100

### 2.3. Moinho com Medição de Torque

Os testes foram realizados em um moinho de bolas em escala de laboratório com 0,46m de diâmetro por 0,38m de comprimento. O moinho possui um torquímetro para determinação precisa da potência demandada nos testes. As amostras foram moídas em diferentes tempos de forma a obter curvas granulométricas que possibilitem a determinação dos parâmetros cinéticos das amostras estudadas. Adicionou-se água nas amostras estudadas até que se obter uma polpa com 70% de sólidos em peso. Os testes foram realizados com 30% de enchimento de bolas e com 75% da velocidade crítica.

### 2.4. Parâmetros Cinéticos de Moagem

Os parâmetros cinéticos foram determinados através do aplicativo *Moly-Cop Tools 2.0* utilizando os resultados dos testes com moinho de bolas. O aplicativo realiza a minimização dos quadrados de uma função objetivo até que o modelo represente de forma aceitável os dados experimentais. Caso o modelo não represente as curvas granulométrica deve-se verificar a possibilidade de erro nos dados experimentais utilizados.

### 2.5. Parâmetros de Classificação

Para determinar os parâmetros de classificação é necessário fazer testes com ciclones de mesmo diâmetro que os ciclones que serão simulados. Assim, por falta de testes com ciclones de 813mm de diâmetro, foram adotados valores de referência para os parâmetros de classificação. Sabe-se que as amostras, provavelmente, possuem diferentes parâmetros de classificação. Neste trabalho, adotou-se o mesmo conjunto de parâmetros de classificação para as duas amostras estudadas por se tratar de uma avaliação inicial de comparação entre os minérios com relação a moabilidade. Estudos futuros devem ser realizados com os modelos de classificação calibrados com testes em ciclones de grande diâmetro.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Parâmetros Cinéticos de Moagem

A Tabela II apresenta os parâmetros cinéticos das amostras estudadas.

**Tabela II. Parâmetros cinéticos das amostras estudadas.**

Função	Seleção				Quebra		
	$\alpha_0$ (a)	$\alpha_1$ ( $\alpha$ )	$\alpha_2$ ( $\Lambda$ )	$D_{crit}$ ( $\mu$ )	$\beta_0$ ( $\varphi$ )	$\beta_1$ ( $\lambda$ )	$\beta_2$ ( $\beta$ )
Compacto	0,00039	1,413	2,50	1641,9	0,145	0,496	4,00
Friável	0,00003	1,725	2,50	6579,6	0,200	0,250	4,00

O aplicativo *Moly-Cop Tools 2.0* utiliza diferentes letras para nomear os parâmetros das funções seleção e quebra. As letras normalmente utilizadas para descrever estes parâmetros estão entre parênteses na Tabela 3 (AUSTIN *et al.*, 1984).

### 3.2. Parâmetros de Classificação

As Tabelas III e IV apresentam os parâmetros de classificação adotados nas simulações e as condições operacionais dos ciclones industriais.

**Tabela III. Parâmetros de classificação utilizados para simulação das amostras estudadas**

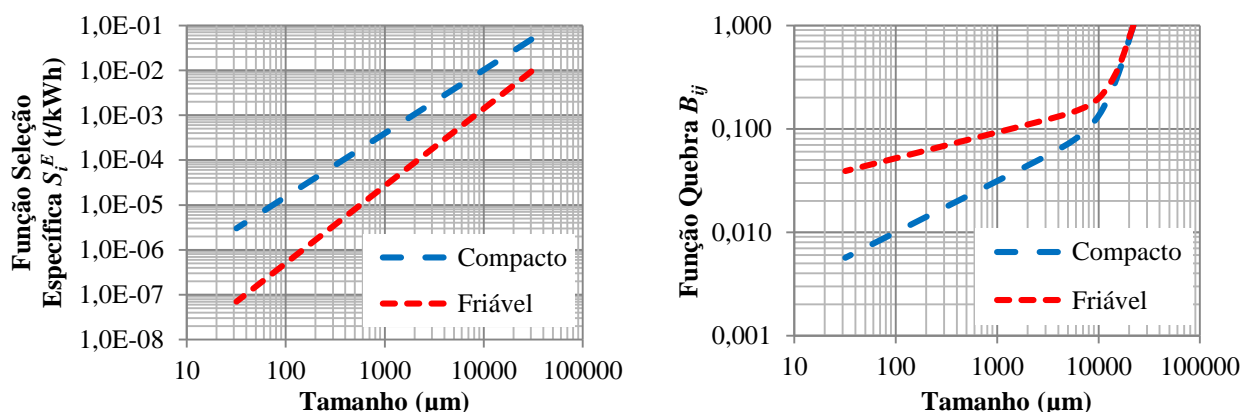
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$\lambda$
10,14	1,33	51,44	0,39	0,95

**Tabela IV – Condições operacionais dos ciclones industriais**

Ciclones (Quant.)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Entrada (mm)	Vortex (mm)	Apex (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
16	813	2438	203	284	156	1,25

### 3.3. Simulações

O modelo de moagem foi alimentado com os parâmetros determinados nos testes com moinho de bolas em escala de laboratório. O moinho em escala industrial possui 7,8m de diâmetro e 12,6m de comprimento e será operado com 75% da velocidade crítica. A Figura 2 apresenta a função seleção específica e a função quebra das amostras estudadas.



**Figura 2. Função seleção e função quebra das amostras de itabirito compacto e friável.**

A função seleção específica das duas amostras testadas é do tipo normal, ou seja, a taxa de quebra cresce com o aumento do tamanho das partículas. Quando há diferença significativa entre o tamanho das bolas e o maior tamanho de partícula, a função seleção pode ser do tipo anormal, que significa dizer que a taxa de quebra diminui a partir de um determinado tamanho. A amostra de itabirito compacto possui uma função seleção específica maior ou maior taxa de quebra por unidade de energia (t/kWh). Assim, é esperado que o consumo energético seja menor devido a maior eficiência (taxa de quebra) desta amostra. As curvas de função quebra mais horizontalizadas demonstram que as amostras testadas tem a propriedade de geração de finos após eventos de quebra. A função quebra da amostra de itabirito friável indica que esta amostra gera mais finos que a amostra de itabirito compacto.

### 3.4. Avaliação do Índice de Trabalho Operacional ( $W_{io}$ )

O índice de trabalho operacional  $W_{io}$  foi determinado para as duas amostras estudadas. A Tabela V apresenta os resultados obtidos nas simulações. A amostra de itabirito friável apresentou elevado consumo específico de energia, mesmo com um  $F_{80}$  bem inferior ao da amostra de itabirito compacto. Segundo Turrer *et al.* (2013), a amostra de itabirito friável possui grãos de quartzo maiores que a amostra de itabirito compacto. Esta diferença no tamanho dos grãos de quartzo poderia justificar o maior consumo energético da amostra de itabirito friável.

**Tabela V. Índice de Trabalho Operacional para as amostras de itabirito compacto e friável**

<b>Amostra</b>	<b>Compacto</b>	<b>Friável</b>
$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	8582	317
$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	113	105
$W_{io}$ (kWh/t)	5,85	11,74

#### 4. CONCLUSÕES

A amostra de itabirito friável tem consumo específico de energia maior que a amostra de itabirito compacto. Esperava-se que o consumo energético da amostra de itabirito friável fosse menor, uma vez que esta amostra possui maior quantidade de finos. A amostra de itabirito friável possui grãos de quartzo maiores e a hematita está incrustada nestes grãos, diferente da amostra de itabirito compacto. Estudos mais detalhados se fazem necessários para investigar os resultados obtidos.

#### 5. REFERÊNCIAS

- AUSTIN, L. G., KLIMPEL, R. R., LUCKIE, P. T. Process Engineering of Size Reduction, SME - AIME, 1984.
- BOND, F. C. The Third Theory of Comminution, AIME Trans., Vol. 193, pp. 484, 1952
- GUTIÉRREZ, L., SEPÚLVEDA, J. E. Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática, Publicación CIMM – Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, Santiago, Chile, 1986.
- HERBST, J. A. & FUERSTENAU, D. W. Scale-Up Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models, International Journal of Mineral Processing, Vol. 7, pp. 1-31, 1980.
- HOGG, R. & FUERSTENAU, D. W. Power Relations for Tumbling Mills, Trans. SME-AIME, Vol. 252, pp. 418-432, 1972.
- PLITT, L. R. A Mathematical Model for the Hydrocyclone Classifier, CIM Bulletin, pp. 114, December, 1976.
- SEPÚLVEDA, J. E. Methodologies for the Evaluation of Grinding Media Consumption Rates at Full Plant Scale, Minerals Engineering, 17, pp. 1269-1279, 2004.
- TURRER, H.D.G, SAWASATO, E.Y., GUIMARÃES, F.R., MAGALHÃES, C.R., DIAS, G.S., RUSSO, J.C., PIMENTEL, D.A., MAZZINGHY, D.B. Avaliação do consumo energético na moagem de dois diferentes tipos litológicos da Serra do Sapo, Submetido: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas - ABM, Belo Horizonte, 2013.