

EXISTEM DIFERENÇAS SIGNIFICATIVAS ENTRE OS CIRCUITOS DIRETO E REVERSO DE MOAGEM?

Douglas Batista Mazzinghy¹
Cláudio Luiz Schneider²

Resumo

A indústria mineral é famosa por muitos paradigmas com relação a diferentes desenhos de fluxograma e pela utilização de novas tecnologias e/ou equipamentos. Neste contexto, uma pergunta frequente realizada aos engenheiros de processo é: qual circuito de moagem é mais eficiente, o direto ou o reverso? Uma resposta mais precisa somente poderia ser dada através de dados experimentais e simulações. Através de parâmetros obtidos por caracterização tecnológica de uma amostra de minério de ferro foram realizadas simulações utilizando o software *ModSim*TM. As simulações realizadas, preliminarmente, indicaram não existir diferenças significativas entre as duas configurações de circuito para a amostra estudada. Posteriormente, foram conduzidos testes em escala piloto com medição detalhada de todas as variáveis necessárias para uma correta interpretação das diferenças entre os circuitos direto e reverso. Os resultados dos testes confirmaram a previsão realizada através de simulação. O presente trabalho serve de base para testes com outros minérios e para uma melhor compreensão da real diferença entre os circuitos de moagem. Assim, espera-se que alguns mitos da indústria mineral, com relação às possíveis configurações de circuito de moagem, sejam superados.

Palavras-chave: Moagem; Circuito direto; Circuito reverso; Simulação.

ARE THERE SIGNIFICANT DIFFERENCES BETWEEN DIRECT AND REVERSE GRINDING CIRCUITS?

Abstract

The mining industry is famous for many paradigms regarding different flowsheet designs and the use of new technologies and equipment. In this context, a question often performed to process engineers is: what grinding circuit is more efficient, the direct or the reverse? A precise answer could only be given by experimental data and simulations. Simulations were performed using *ModSim*TM software considering parameters obtained by batch mill tests of an iron ore sample. The simulations, preliminarily, indicated no significant differences between the two circuit configurations for the sample tested. Subsequently, tests were conducted on a pilot scale with detailed measurement of all the variables necessary for a correct interpretation of the differences between the direct and reverse circuits. The test results confirmed the prediction obtained by simulation. This work provides the basis to test other ores and to understanding better the real differences between grinding circuit configurations. Thus, it is expected that some myths of the mineral industry, with respect to flowsheet choices, are overcome.

Keywords: Grinding; Direct circuit; Reverse circuit; Simulation.

I INTRODUÇÃO

Os circuitos de moagem, geralmente, são fechados com classificadores de forma a retornar ao moinho o material grosseiro, ainda fora da especificação de tamanho desejada. Os circuitos são do tipo direto ou reverso. O circuito direto tem a alimentação nova de material sendo encaminhada ao moinho e a descarga deste alimenta a etapa de classificação. O material ainda fora da especificação de tamanho retorna ao moinho

como carga circulante. O circuito reverso tem a alimentação nova de material encaminhada ao classificador que retira do circuito o material dentro da especificação desejada e direciona o material ainda fora da especificação para a alimentação do moinho. A descarga do moinho é direcionada para a alimentação do classificador e constitui a carga circulante. A maioria dos circuitos de moagem possui hidrociclones como equipamento de classificação,

¹Engenheiro de Minas, MSc, DSc, Eng. Especialista, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: douglas.mazzinghy@angloamerican.com

²Engenheiro de Minas, MSc, PhD, Pesquisador Sênior, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: cschneid@cetem.gov.br

em alguns poucos circuitos utilizam-se classificador espiral ou peneiras.

Uma pergunta comum entre os profissionais envolvidos com dimensionamento de plantas de processamento mineral é qual seria o circuito de moagem mais eficiente, direto ou reverso? Segundo Sepúlveda [1], o circuito reverso deve ser considerado nos casos em que a alimentação nova do circuito tenha mais que 30% de material passante na peneira correspondente ao P_{80} do overflow do ciclone. Esta condição somente é atingida em alguns casos específicos, como na moagem secundária após circuitos de moagem de barras ou de moagem semi-autógena. Para responder a esta pergunta foram executados testes de moagem em escala de laboratório e em escala piloto. Os testes em escala de laboratório forneceram dados para determinação das funções de quebra do material estudado. Com estes dados foram realizadas simulações considerando os circuitos direto e reverso. As simulações foram comparadas com os dados obtidos nos testes em escala piloto.

1.1 Modelo do Balanço Populacional

O modelo do balanço populacional considera a quebra de cada fração de tamanho segundo funções que descrevem a velocidade de quebra das partículas e a distribuição de quebra de cada fração de tamanho após eventos de quebra [2-5]. Foi utilizado para modelar populações biológicas no início da década de 1960 [6] e posteriormente foi formulado para propósitos de engenharia química [7]. A Equação 1 descreve o modelo do balanço populacional para a moagem em batelada [2].

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

$m_i(t)$ sendo a fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho i após o tempo t de moagem, S_i a função seleção das partículas no intervalo de tamanho i e b_{ij} a função quebra ou fração em massa de partículas no intervalo de tamanho i produzidas pela quebra de partículas no intervalo de tamanho j .

A função quebra acumulada B_{ij} pode ser modelada através da Equação 2 [2].

$$B_{i,j} = \phi \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1-\phi) \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, \quad 0 < \phi < 1 \quad (2)$$

B_{ij} sendo a função quebra acumulada e os parâmetros β , ϕ , γ sendo constantes dependentes das características do material.

Segundo Herbst e Fuerstenau [3] a função seleção S_i apresenta uma relação de proporcionalidade com a potência absorvida pelo moinho e a massa contida neste, conforme a Equação 3.

$$S_i = S_i^E \left(\frac{P}{H} \right) \quad (3)$$

S_i (min^{-1}) sendo a função seleção no intervalo de tamanho i , S_i^E (t/kWh) a função seleção específica em energia, H (t) a massa de material contida no moinho e P (kW) a potência líquida gasta na moagem. A função seleção específica em energia S_i^E independe das dimensões do moinho e pode ser modelada através da Equação 4 [8].

$$S_i^E = S_i^E \exp \left\{ \zeta_1 \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) + \zeta_2 \left[\ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

S_i^E (t/kWh) sendo a função seleção específica em energia, S_i^E (t/kWh) um parâmetro equivalente a função seleção específica para o tamanho 1 mm, d_i (mm) o diâmetro das partículas do intervalo de tamanho i , d_1 (mm) o tamanho de normalização e ζ_1 , ζ_2 são parâmetros característicos do material e das condições de moagem.

1.2 Modelo de Classificação

Os equipamentos de classificação como peneiras, hidrociclones, classificadores espirais e outros podem ser descritos através de um modelo de classificação empírico considerando a função matemática *Logistic Function* [2].

A Equação 5 apresenta a função de classificação atual $e(d_i)$ de um equipamento de classificação.

$$e(d_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{50c}} \right)^{-\lambda}} \quad (5)$$

$e(d_i)$ sendo a função classificação atual; d_i o diâmetro das partículas do intervalo de tamanho i (mm), d_{50c} o diâmetro (corrigido) no qual a partícula tem 50% de chance de ir para *underflow* ou *overflow* e λ o parâmetro relacionado a nitidez de separação.

O parâmetro relacionado a nitidez de separação λ pode ser estimado através da Equação 6, sendo SI a nitidez de separação (Fração).

$$\lambda = \frac{2,1972}{\ln(SI)} \quad (6)$$

A nitidez de separação SI pode ser estimada através da Equação 7.

$$SI = \frac{d_{25}}{d_{75}} \quad (7)$$

d_{25} sendo o diâmetro de partícula do qual 25% é passante (mm) e d_{75} o diâmetro de partícula do qual 75% é passante (mm). A Equação 8 apresenta a função classificação corrigida $c(d_i)$ de um equipamento de classificação.

$$c(d_i) = v + (1-v)e(d_i) \quad (8)$$

$c(d_i)$ sendo a função classificação corrigida e v sendo o parâmetro relacionado ao curto-circuito de material.

O curto-circuito de material ocorre quando uma partícula de tamanho i , com a especificação desejada para o *overflow* é direcionada para o *underflow*, por exemplo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostras

Os testes foram realizados com uma amostra de minério de ferro do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais.

2.2 Ensaios em Moinho de Bancada

Foram preparadas quatro alíquotas de amostras para a realização dos testes de bancada. Cada amostra foi moída em quatro diferentes intervalos de tempo, definidos conforme cálculo de quebra de primeira ordem [2]. Os testes foram realizados em um moinho tubular convencional de 203 mm de diâmetro por 254 mm de comprimento. O moinho foi operado com 72% da velocidade crítica e 42% de enchimento de bolas. Foram utilizadas bolas de aço de 20 mm de diâmetro. A massa de cada alíquota foi calculada considerando 100% de preenchimento dos vazios entre as bolas (porosidade).

2.3 Função Seleção e Função Quebra

Os parâmetros das funções que descrevem a velocidade de quebra e a distribuição de quebra foram determinados através das curvas granulométricas geradas nos testes de moagem através do software *BatchMill*TM [9], que utiliza um algoritmo de minimização de equações não lineares através de uma função objetivo. A função seleção específica foi determinada segundo a função desenvolvida por Rajamani e Herbst [8] e a função quebra foi determinada segundo a função desenvolvida por Austin et al. [2].

2.4 Classificação

O modelo de curva de partição de Austin et al. [2] foi utilizado para descrever o classificador e foi calibrado com as curvas granulométricas de alimentação, *overflow* e *underflow* obtidas nos testes em escala piloto.

2.5 Simulação

As simulações foram realizadas através do software *ModSim*TM [10]. Foi utilizado o modelo de Herbst e Fuerstenau [3] para descrever o moinho. Este modelo foi calibrado com os parâmetros de quebra determinados nos ensaios de laboratório com moinho de bolas.

2.6 Teste em Escala Piloto

Os testes em escala piloto foram realizados na configuração direta e reversa. O teste em escala piloto tem como objetivo confirmar os resultados obtidos em escala de laboratório e investigar efeitos de classificação interna do moinho, principalmente. Todos os dados de processo foram monitorados durante o teste para fechamento de um balanço de massas, inclusive a potência do moinho para cálculo do consumo específico de energia em kWh/t.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Balanço de Massas

A Tabela 1 apresenta o resultado dos testes em escala piloto nas configurações de circuito direto e reverso.

Os resultados indicam que os circuitos são muito parecidos com relação a energia específica de moagem. As diferenças entre o consumo específico de energia estão dentro do erro de medição de potência do moinho piloto e dentro do erro de medição da taxa de alimentação do circuito.

3.2 Parâmetros de Quebra

Os modelos de moagem foram calibrados com os parâmetros de quebra determinados a partir dos resultados dos testes em escala de bancada.

A Tabela 2 apresenta os valores da função seleção e da função quebra para a amostra estudada.

A Figura 1 apresenta as funções seleção e quebra determinadas através dos testes em escala de laboratório.

A função seleção apresentou um formato característico com diminuição da taxa de quebra nas partículas maiores, indicando que o tamanho de bola utilizado poderia ser aumentado para que a curva de função seleção apresentasse um formato próximo de linear.

A função quebra também apresentou um formato característico sem a produção excessiva de finos após eventos de quebras das partículas.

Tabela 1. Resultados dos testes em escala piloto

Circuito	F_{80}	P_{80}	Energia Específica
	(mm)	(mm)	(kWh/t)
Direto	108,2	41,1	10,7
Reverso	100,0	41,5	9,65

Tabela 2. Parâmetros de função seleção e função quebra para a amostra estudada, e intervalos de confiança (95%)

S/E t/kWh	Função seleção		Função quebra		
	ς_1	ς_2	γ	β	ϕ
3,817	0,880	-0,201	0,405	2,072	0,671
+/- 0,3%	+/- 0,2%	+/- 0,4%	+/- 0,1%	+/- 1,3%	+/- 0,5%

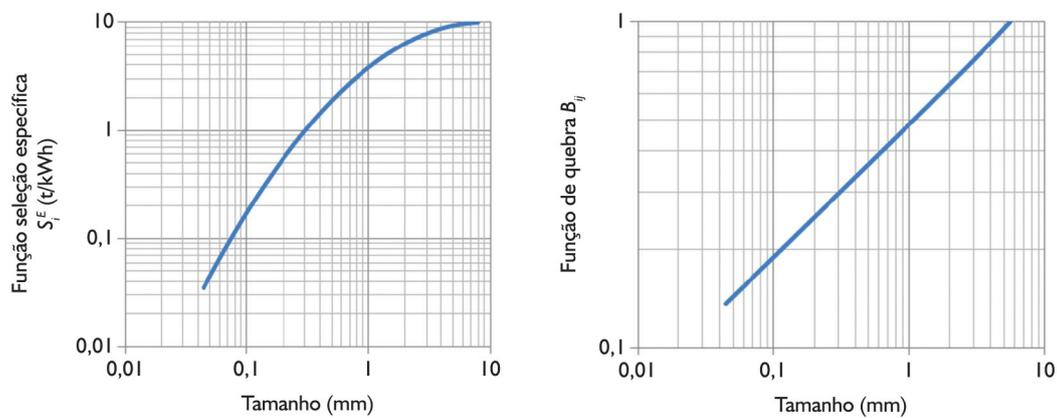


Figura 1. Função seleção específica e função quebra.

Tabela 3. Parâmetros de classificação obtidos nos testes em escala piloto

Circuito	Direto	Reverso
d_{50c} (μm)	34,45	33,91
Nitidez de separação	0,58	0,57
Curto-Circuito	0,34	0,36

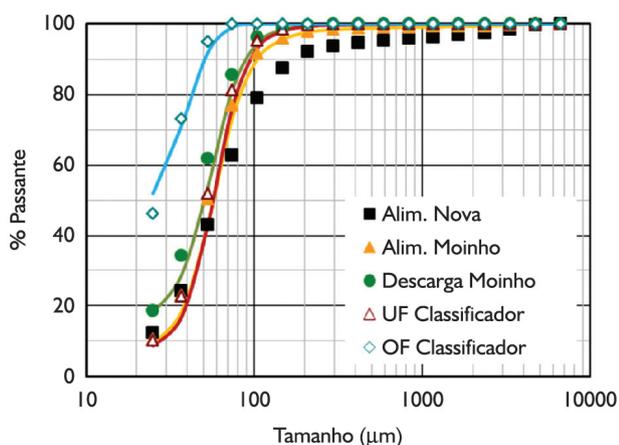


Figura 2. Distribuições granulométricas experimentais e simuladas do circuito direto.

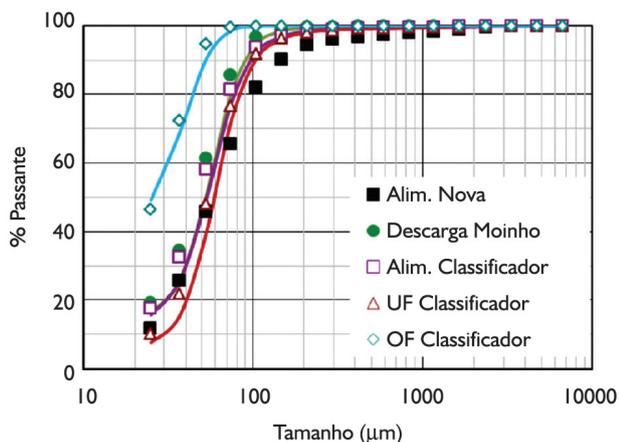


Figura 3. Distribuições granulométricas experimentais e simuladas do circuito reverso.

3.3 Parâmetros de Classificação

A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros de classificação obtidos através do balanço de massas dos testes em escala piloto.

Os valores são muito próximos para ambos os tipos de circuito. O circuito reverso apresentou maior curto-circuito e menor d_{50c} .

3.4 Simulação

As Figuras 2 e 3 mostram as distribuições granulométricas experimental (pontos) e as distribuições granulométricas previstas através de simulação (linhas).

As simulações realizadas apresentaram boa previsão dos dados experimentais obtidos nos testes em escala piloto, tanto para o circuito direto como para o circuito reverso. Para a amostra estudada pode-se afirmar que não existe diferença significativa entre estes dois tipos de circuitos, mesmo tendo a alimentação nova do circuito com aproximadamente 30% passante na peneira correspondente ao P_{80} do overflow do ciclone, conforme sugerido por Sepúlveda [1]. Neste caso, o circuito reverso deveria ser mais eficiente que o circuito direto em termos de energia específica. Contudo, as duas configurações apresentaram energia específica muito próximas.

A carga moedora é a variável de maior peso na eficiência de moagem. Este estudo considerou a mesma carga de bolas nas duas configurações: direto e reverso.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através das simulações e dos testes em escala piloto indicaram que não existem diferenças significativas entre os circuitos direto e reverso, em termos de energia específica, para a amostra estudada.

Os parâmetros de classificação são muito parecidos, sendo possível afirmar que não são necessárias grandes alterações nos equipamentos de classificação para sua aplicação nos circuitos direto ou reverso.

O circuito reverso tem a vantagem de adensar o material antes de ser alimentado no moinho nos casos de alimentação muito diluída, como normalmente acontece nos circuitos de remoagem alimentados por concentrados oriundos da etapa de flotação.

Recomenda-se que novos testes em escala piloto sejam realizados com amostras de diferentes perfis granulométricos para avaliação do efeito do tamanho das partículas nas configurações de circuito direto e reverso.

REFERÊNCIAS

- 1 Sepúlveda JE. Direct vs Reverse grinding circuit configurations: a quantitative assesment of their relative operational performance. In: V International Mineral Processing Seminar - Procemin; 2008; Santiago, Chile. Santiago: Gecamin; 2008.
- 2 Austin LG, Klimpel RR, Luckie PT. *Process engineering of size reduction*. Nova York: SME-AIME; 1984.
- 3 Herbst JA, Fuerstenau DW. Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models. *International Journal of Mineral Processing*. 1980;7(1):1-31. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-7516\(80\)90034-4](http://dx.doi.org/10.1016/0301-7516(80)90034-4).
- 4 Whiten WJ. A matrix theory of comminution machines. *Chemical Engineering Science*. 1974;29(2):589-599. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)80070-9](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(74)80070-9).
- 5 Sepúlveda JE, Gutiérrez LR. *Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática*. Santiago: CIMM – Centro de Investigacion Minera y Metalúrgica; 1986.
- 6 Verkoeyen D, Pouwa GA, Meesters GMH, Scarlett B. Population balances for particulate processes - a volume approach. *Chemical Engineering Science*. 2002;57(12):2287-2303. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00118-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00118-5).
- 7 Hulburt HM, Katz S. Some problems in particle technology: a statistical mechanical formulation. *Chemical Engineering Science*. 1964;19(8):555-574. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(64\)85047-8](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(64)85047-8).
- 8 Rajamani K, Herbst JA. Simultaneous estimation of selection and breakage functions from batch and continuous grinding data. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*. 1984;93:74-85.
- 9 Mineral Technologies International. *BatchMill™ Standard batch test analyzer*. 1st ed. Salt Lake City: MTI; 2003. (Manual do usuário).
- 10 Mineral Technologies International. *Modsim™ - Modular simulator for mineral processing plants*. 12th ed. Salt Lake City: MTI; 2009. (Manual do usuário).

Recebido em: 19 Nov. 2013

Aceito em: 7 Ago. 2014