

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DA CARGA DE BOLAS NA MOAGEM POR MEIO DO MODELO DO BALANÇO POPULACIONAL – PARTE 1

L. C. M. Montenegro¹, R. Galery¹, G. G. Silva¹, R. A. Paula¹, A. E. C. Peres²

1 - Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, R. Espírito Santo 35, Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais,
CEP: 30.160.030

lcmm@demin.ufmg.br; rgallery@demin.ufmg.br; gsilva@demin.ufmg.br; rpaula@demin.ufmg.br

2- Departamento de Engenharia de Materiais da UFMG, R. Espírito Santo 35, Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais,
CEP: 30.160.030

aecperes@demin.ufmg.br

Os modelos matemáticos baseados na equação do balanço populacional vêm sendo largamente utilizados na simulação e otimização do processo de moagem industrial de minérios. Este modelo é baseado em dois parâmetros que descrevem o processo de quebra: a taxa específica de quebra e a função distribuição dos fragmentos ou função quebra. O presente trabalho envolve a utilização de técnicas de retro-cálculo para obtenção dos parâmetros do modelo em diferentes condições de carga de bolas na moagem de minério pegmatítico. Os resultados indicam que a determinação da função quebra e função seleção por meio de retro-cálculo não permite tirar conclusões a respeito da natureza real do processo de quebra. É necessária a utilização de técnicas experimentais diretas, baseadas em testes de moagem de curta e longa duração, em frações mono tamanho da alimentação para aumentar a confiança nos resultados de simulação e otimização. A simulação pelo modelo do balanço populacional em condições próximas as experimentais revelou que uma melhoria na eficiência do processo de moagem poderia ser atingida com a fração volumétrica da carga moedora igual a 37%. O enchimento de bolas de 50% é o que demanda maior energia por tonelada de minério para as condições experimentais estudadas.

Palavras-chave: modelagem, simulação, otimização, moagem

Área Temática: Tratamento de Minérios

INTRODUÇÃO

A moagem de minérios é uma operação industrial energeticamente ineficiente e dispendiosa. Na atualidade, têm-se tentado compreender melhor este processo através de modelos cinéticos de quebra das partículas, baseados na teoria do balanço populacional. O sucesso deste modelo é atribuído ao fato de que cada uma dos sub-processos da moagem, isto é, a fragmentação do material e a distribuição dos fragmentos dentro do moinho podem ser representadas por equações descritivas de cada um dessas etapas. Dessa forma, os modelos matemáticos originados têm permitido tanto a simulação e a otimização dos circuitos de moagem industrial em operação, como no desenvolvimento de novos projetos industriais.

Resumidamente o modelo do balanço populacional para moagem (Reid, 1965) é dado pela Equação 1, abaixo:

$$\frac{d w_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{j=i}^{i-1} b_{ij} S_j w_j(t) \quad (1)$$

Na Equação 1, $w_i(t)$ é a fração em massa de partículas contidas no intervalo de tamanho i ; S_i , é a taxa específica de quebra das partículas de tamanho i ; b_{ij} , é a distribuição dos fragmentos, conhecida como função quebra. Essa função representa a fração de material do tamanho superior j que após a quebra se dirigiu para o tamanho i .

A taxa específica de quebra é um parâmetro que pode ser obtido através de testes cinéticos de moagem. Conforme apresentado na Equação 2, a velocidade de quebra é dependente da massa de material contida no intervalo e obedece uma cinética de quebra de primeira ordem.

$$\frac{d w_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) \quad (2)$$

Para diversas faixas granulométricas de tamanho, a forma funcional, discretizada, da taxa específica de quebra pode ser representada pela Equação 3:

$$S_i = a \cdot \left(\frac{x_i}{x_1} \right)^\alpha \cdot Q_i \quad (3)$$

Na Equação 3, o parâmetro α é considerado como sendo característico do material. Na prática, seu valor pode variar entre 0,5 a 1,5. O segundo parâmetro, a é modelado como sendo depende das condições de moagem. Sua unidade é igual a tempo⁻¹. No caso de fratura normal, o fator de correção Q_i , tende para a unidade. Para fratura

anormal, Q_i somente tende para a unidade quando os valores de $x_i < x_m$ (x_m é o tamanho de partícula para o qual S_i é máximo). Na prática, os valores de Q_i podem ser calculados pela seguinte relação empírica:

$$Q_i = \frac{1}{1 + (x_i/\mu)^\Lambda}, \Lambda > 0 \quad (4)$$

Verifica-se, portanto, que a modelagem da taxa específica de quebra exige, no caso de *fratura anormal*, cálculos extras envolvendo a determinação de outros dois parâmetros adicionais: μ e Λ .

A Figura 1 mostra o resultado típico da variação da velocidade específica de quebra, S_i , em função do tamanho de partículas, x_i . A parte tracejada da curva representa a condições de moagem onde a fratura é normal.

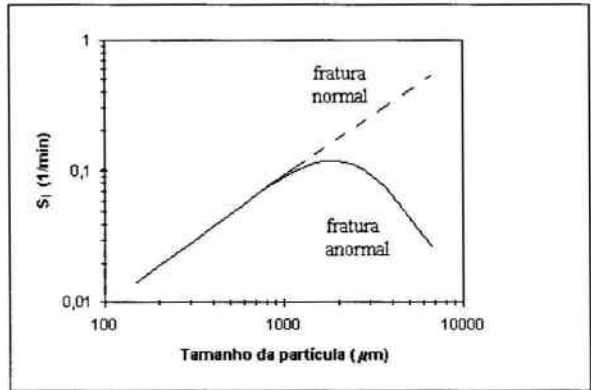


Figura 1 - Velocidade específica de quebra em função do tamanho da partícula.

A forma funcional característica da função quebra, a distribuição acumulada passante dos fragmentos, B_{ij} , pode ser representada como a associação de duas funções de potência que, num gráfico log-log, representam duas retas com diferentes inclinações. A forma característica para essa função é apresentada abaixo, pela Equação 5.

$$B_j = \Phi_j \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\gamma + (1 - \Phi_j) \left(\frac{x_{i-1}}{x_j} \right)^\beta \quad (5)$$

Na Equação 5 os parâmetros Φ_j , γ e β podem ser determinados gráfica ou numericamente. Enquanto os valores típicos de γ variaram entre 0,5 a 1,5 e os valores de β encontram-se na faixa de 2,5 e 5.

A função quebra representa a distribuição média resultante dos diversos mecanismos de quebra: abrasão, compressão e impacto. A Figura 2 mostra a distribuição resultante dos mecanismos de fratura.

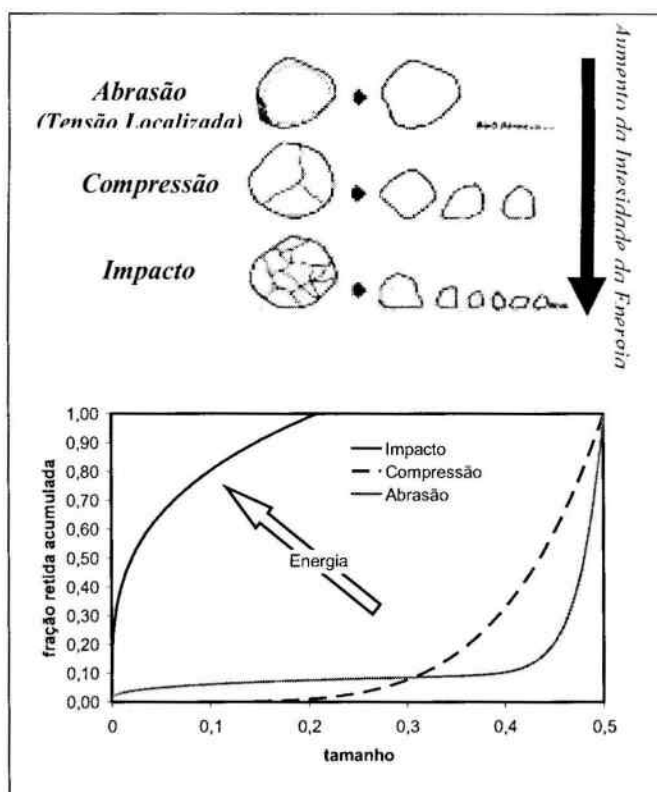


Figura 2 – Distribuição resultante dos mecanismos de fratura modificado de Kelly and Spottiswood (1982).

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Testes cinéticos de moagem foram realizados com uma amostra de minério pegmatítico. Os testes cinéticos de moagem de longa duração foram realizados em um moinho de bolas de laboratório equipado com torquímetro cujas dimensões eram iguais a 460mm x 378mm. As condições operacionais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições operacionais dos testes cinéticos de moagem do minério pegmatítico.

Especificação	Valor
Carga de bolas (J)	37%, 44% e 50%
Porosidade média do leito de bolas (P_b)	60%
Razão do volume de minérios e volume de vazios	100%
Massa de minério	25,4kg, 30,2kg e 34,3kg
Diâmetro médio das bolas	4cm
Diâmetro interno do moinho	46cm
Fração da velocidade crítica	80%

Os testes cinéticos de quebra realizados em laboratório visaram a calibração do modelo do balanço populacional com a determinação dos parâmetros da função quebra e da função seleção por meio de técnicas de PNL (Gradiente Reduzido e o Método Evolucionário). O retro-cálculo, baseado em técnicas não lineares de otimização tratam uma distribuição granulométrica natural e usam equações empíricas para a velocidade específica de quebra e para a função quebra. Os valores dos parâmetros dessas equações empíricas são procurados por uma rotina de busca e de otimização, de forma que permitam ajustar os valores calculados com os obtidos experimentalmente. Na solução por técnicas de PNL foram utilizadas duas abordagens para a calibração. Na primeira abordagem foram utilizadas as considerações de que o parâmetro α da função seleção e os parâmetros da função quebra só dependem das características do minério. Na segunda abordagem as funções seleção e quebra foram consideradas dependentes das condições operacionais e das características do minério.

RESULTADOS e DISCUSSÃO

A comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo é apresentada na Figura 3. O coeficiente de correlação (R^2) entre os valores observados e estimados pelo modelo é superior a 0,99. Entretanto, a alta correlação existente entre a função quebra e a função seleção não permite concluir que os parâmetros obtidos representem a natureza real do fenômeno de quebra. Como discutido nos trabalhos de Austin e Klimpel(), os valores de S e B determinados neste tipo de simulação podem conter grandes erros compensatórios, os quais resultam em pequenos erros de ajustes entre os valores calculados e experimentais. Os parâmetros obtidos permitem apenas prever o comportamento da moagem em condições próximas as experimentais (Figura 3).

Com o uso das considerações de que o parâmetro α da função seleção e os parâmetros da função quebra só dependem das características do minério a calibração do modelo conduz a uma única função quebra para as três condições operacionais estudadas (Figura 4). Assim o enchimento de 37% de carga de bolas apresenta o menor gasto de energia por tonelada de minério seja qual for a distribuição granulométrica da alimentação ou o tempo de moagem (Figura 5). Quando as funções quebra e seleção são consideradas dependentes das características do minério e das condições operacionais a calibração do modelo conduz a três diferentes funções quebra e seleção (Figura 4). Neste caso a escolha da melhor carga de bolas vai depender da granulometria da alimentação e do tempo de moagem (Figura 5). A determinação da função quebra e função seleção por meio de retro-cálculo não permite tirar conclusões a respeito da natureza real do processo de quebra ou mesmo que os resultados sejam representativos. A segunda parte do presente trabalho consiste na utilização de técnicas experimentais diretas, baseadas em testes de moagem de curta e longa duração, em frações mono tamanho da alimentação. Embora necessitem uma quantidade maior de trabalho de laboratório, são as mais seguras em termos de produzirem resultados mais confiáveis e próximos da realidade física do processo (Klimpel, R. R., Austin, L. G., 1991; Austin, L.G., Klimpel, R. R., Luckie, P.T., 1984; Herbst, J.A., Fuerstenau, D.W., 1973). Em comparação com o método do retro-cálculo as técnicas experimentais diretas demandam um maior esforço computacional para calibração. Entretanto, este fato é amplamente compensado pela maior confiabilidade nas previsões geradas pelo modelo.

Com base nos dados experimentais podemos afirmar que o enchimento de bolas de 50% é o que demanda maior energia por tonelada de minério. Para tempos de curta e média duração (<80min) e para a distribuição granulométrica da alimentação estudada o enchimento de bolas com 37% é o com menor gasto energético por tonelada de minério.

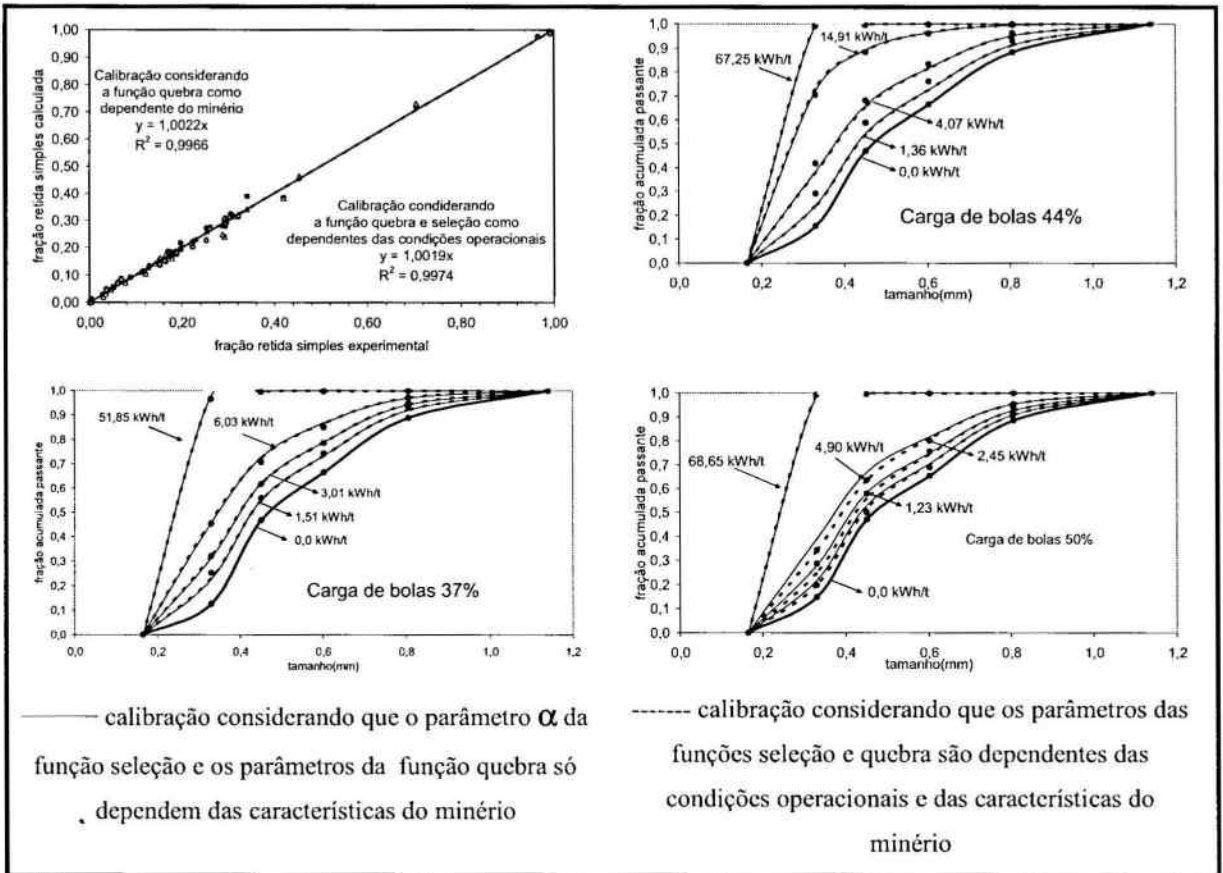


Figura 3 - A comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles estimados pelo modelo para as duas abordagens de calibração.

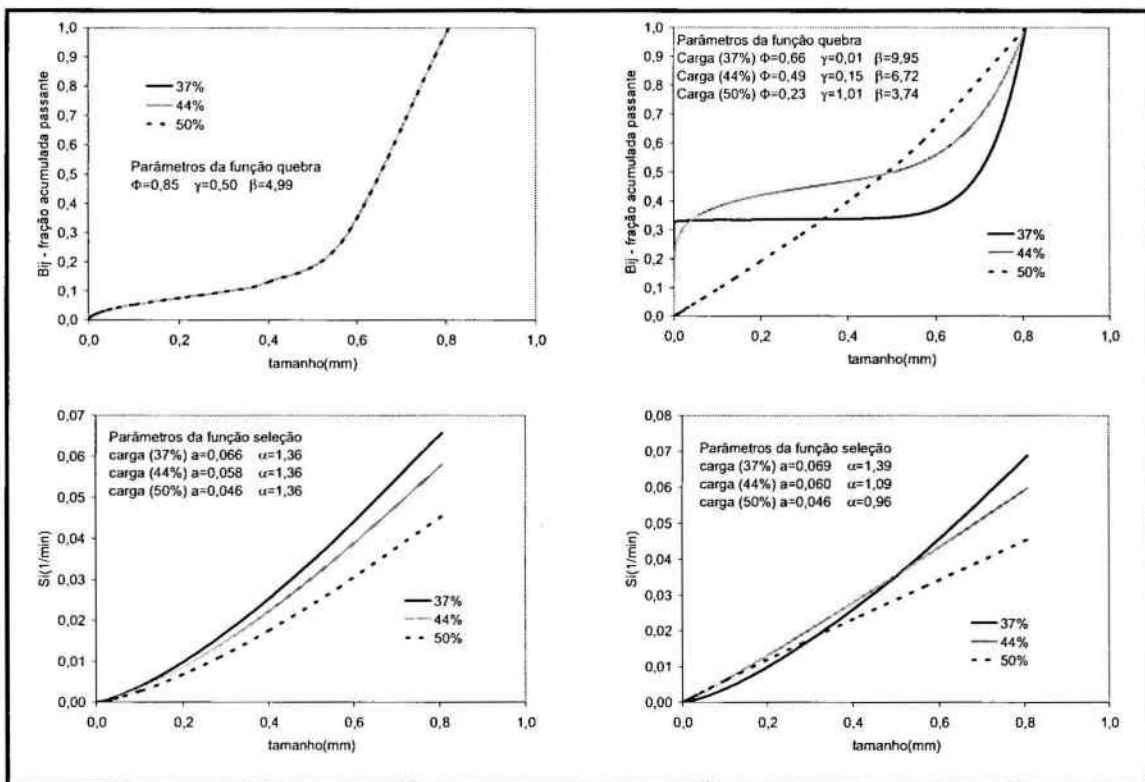


Figura 4 – Função quebra e seleção obtidas para as três condições frações do volume do moinho ocupado pela carga de bolas.

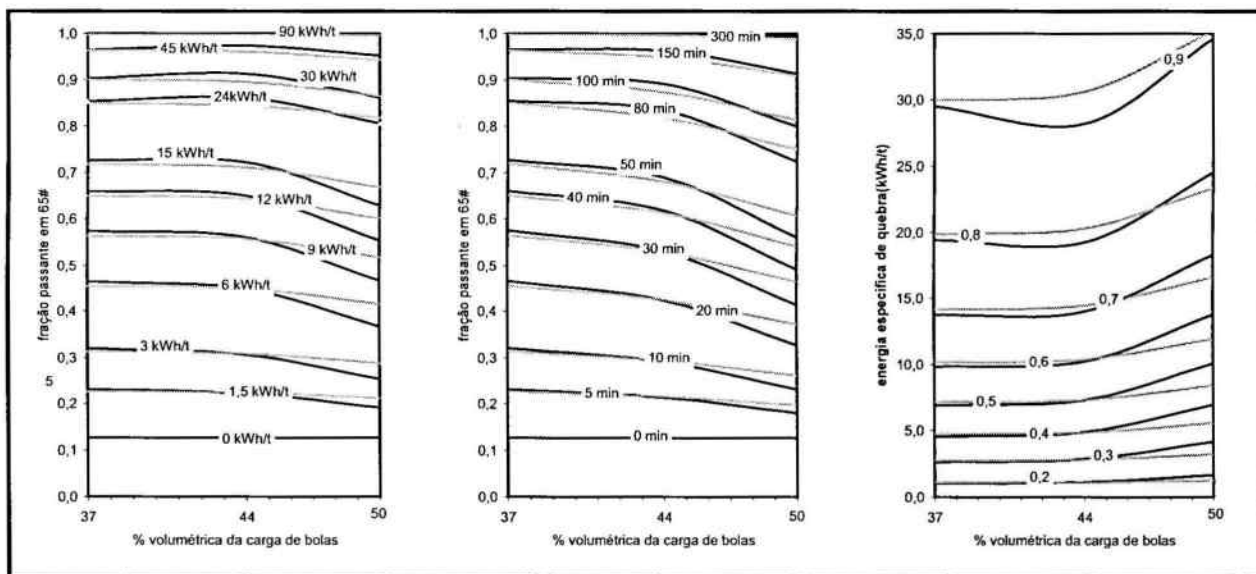


Figura 5 – Curvas de isovalores de energia específica de quebra, tempo de moagem, fração passante em 65# obtidas para as três condições de enchimento da carga de bola.

CONCLUSÕES

A determinação da função quebra e função seleção por meio de retro-cálculo não permite tirar conclusões a respeito da natureza real do processo de quebra, ou que apresentassem resultados representativos.

É necessária a utilização de técnicas experimentais diretas, baseadas em testes de moagem de curta e longa duração, em frações mono tamanho da alimentação para a calibração do modelo do balanço populacional, ou seja, obtenção de parâmetros que possam ser usados com confiança na simulação e otimização do processo de moagem.

A simulação pelo modelo do balanço populacional em condições próximas as experimentais revelou que uma melhoria na eficiência do processo de moagem poderia ser atingida com a fração volumétrica da carga moedora igual a 37%. O enchimento de bolas de 50% é o que demanda maior energia por tonelada de minério para as condições experimentais estudadas.

REFERÊNCIAS

- Austin, L.G., Klimpel, R. R., Luckie, P.T., cap. 10, Process Engineering of size reduction: Ball milling, AIME, p. 561, 1984.
- Austin, L.G., Luckie, P.T., Review Introduction to the Solution of Grinding Equations by Digital Computation, Mineral Sci. Engng, 4, No. 2, pp. 24-51, 1972.
- Herbst, J.A., Fuerstenau, D.W., "Mathematical simulation of dry ball milling using specific power information," trans. SME/AIME, vol. 254, pp. 343-348, 1973.
- Herbst, J.A., Fuerstenau, D.W., "The zero order production of fine sizes in comminution and its implications in simulation," trans. SME/AIME, vol. 241, pp. 538-549, 1968.
- Kapur, P.C., "An improved method for estimating the feed-size breakage distribution functions", Powder Technology, vol. 33. Pp. 269-275, 1982.
- Kapur, P.C., "Kinetics of batch grinding, Part B: An approximate solution to the grinding equation," trans. SME/AIME, vol. 247, p. 309-3013. 1970.
- Kelly, E. G, Spottiswood, D. J, Introduction to mineral processing, Canadá, Wiley-Interscience Publication, 1982.
- Klimpel, R. R., Austin, L. G., 1991, The back calculation of specific rates of breakage from continuous mill data, "Powder Technology, vol. 38, pp. 77-91.
- Reid, K.J., A Solution to the Batch Grinding Equation, Chem. Eng. Sci., 29, pp.589-599, 1965.