

AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE MOAGEM DO MINÉRIO DA JACOBINA MINERAÇÃO E COMÉRCIO

DE ANDRADE LIMA, L.R.P.¹, NUNES, J.N.²

¹Universidade Federal da Bahia. E-mail: lelo@ufba.br

²Universidade Federal da Bahia. E-mail: josevandonunes@gmail.com

RESUMO

O minério aurífero da Jacobina Mineração e Comércio foi amostrado e usado para a determinação das funções de seleção S e de quebra B usando moagem descontínua de nove faixas granulométricas entre 2000 e 75 micra. A taxa de desaparecimento segue o modelo de primeira ordem e a função de seleção apresenta o clássico comportamento de aumento com o aumento do tamanho das partículas seguido por uma redução do valor para partículas grandes. A função de quebra tem um comportamento normalizável. As funções puderam ser ajustadas com os seguintes modelos:

$$S_i = \frac{0,86d_i^{1,14}}{1 + \left(\frac{d_i}{1,56}\right)^{4,67}} \text{ e } B_{i,j} = 0,29 \left(\frac{d_{i-1}}{d_j}\right)^{0,76} + 0,71 \left(\frac{d_{i-1}}{d_j}\right)^{2,21}$$

PALAVRAS-CHAVE: moagem; modelo matemático; minério de ouro.

ABSTRACT

The Jacobina Mineração e Comércio gold ore was sampled and used to evaluate the selection S and breakage B using batch grinding experiments and nine size fractions between 2000 and 75 micron. The grinding rate follows the first order model and the selection function presents the classical behavior of enhancement with the particle size followed by a reduction for large particles size. The breakage function could be normalized. The grinding functions S and B could by fit with the models:

$$S_i = \frac{0,86d_i^{1,14}}{1 + \left(\frac{d_i}{1,56}\right)^{4,67}} \text{ and } B_{i,j} = 0,29 \left(\frac{d_{i-1}}{d_j}\right)^{0,76} + 0,71 \left(\frac{d_{i-1}}{d_j}\right)^{2,21}$$

KEYWORDS: grinding; mathematical model; gold ore.

1. INTRODUÇÃO

A simulação de circuitos de moagem de minérios vem sendo usada há mais de 30 anos e atualmente é uma ferramenta indispensável para o projeto e para a otimização sistemática de usinas de beneficiamento, sobretudo devido ao fato que a cominuição representa uma importante parcela do custo total destas unidades industriais. Na usina da Jacobina Mineração e Comercio, por exemplo, o custo da moagem corresponde a cerca de 50% do custo operacional da usina e 30% deste custo, o que não está relacionado ao consumo de corpos moedores, pode ser reduzido através da otimização do circuito de moagem-classificação.

Os modelos fenomenológicos usados para descrever a moagem de minérios tiveram origem nos 1950. BASS (1954) apresentou uma teoria matemática e um modelo fenomenológico para a moagem descontínua, que resultou na equação integro-diferencial que descreve a evolução temporal da distribuição granulométrica das partículas ($F(d,t)$) durante a moagem :

$$\frac{\partial^2 F(d,t)}{\partial d \partial t} = -S(d) \frac{\partial F(d,t)}{\partial d} + \int_d^{d_0} \frac{\partial B(d,\alpha)}{\partial d} S(\alpha) \frac{\partial F(\alpha,t)}{\partial d} d\alpha \quad (1)$$

onde d é o tamanho das partículas, d_0 é o tamanho inicial das partículas, t é o tempo de moagem, F é a frequência acumulada passante, S é a taxa de quebra das partículas (ou função de seleção) e B é a função de quebra das partículas. A equação 1 é conhecida com equação fundamental da cominuição e tem soluções analíticas apenas para casos muito particulares o que limitou a sua ampla utilização por vários anos.

Na equação 1 a cinética de fragmentação das partículas do minério de dimensão d é descrita pela função de seleção ($S(d)$). A fragmentação de minérios em geral segue uma cinética de primeira ordem, sendo válida equação (AUSTIN *et al.*, 1984, AUSTIN e CONCHA, 1993):

$$\frac{dM(d,t)}{dt} = -S(d)M(d,t) \quad (2)$$

onde M é a massa de partículas de tamanho d . Incluindo a distribuição granulométrica do minério, a equação 2 pode ser reescrita como:

$$\frac{d[M_{Total}f(d,t)]}{dt} = -S(d)[M_{Total}f(d,t)] \quad (3)$$

Onde M_{Total} é a massa total do minério e f é a frequência simples das partículas de dimensão d . Para a moagem descontínua o sistema é fechado, portanto a massa total é constante e a equação resultante pode ser simplificada:

$$\frac{df(d,t)}{dt} = -S(d)f(d,t) \quad (4)$$

A integração da equação 4 para o caso em que a distribuição de tamanhos inicial $f(d,0)$ é conhecida resulta:

$$f(d,t) = f(d,0)e^{-S(d)t} \quad (5)$$

A discretização da equação 5 permite obter:

$$f_i(t) = f_i(0)e^{-S_i t} \quad (6)$$

Onde f_i é a frequência simples da distribuição granulométrica das partículas de diâmetro d_i e S_i é a correspondente taxa de desaparecimento das partículas da faixa granulométrica i . Portanto, utilizando-se a moagem de mono-tamanhos (ou seja, faixas granulométricas estreitas), o gráfico semi-log para cada tamanho produz retas, caso a hipótese de cinética de primeira ordem seja atendida, o que não se aplica no caso de materiais quebradiços. As inclinações destas retas fornecem os valores estimados das velocidades específicas de quebra do minério para cada faixa de tamanho (S_i).

REID (1965) propôs a discretização da equação 1 como uma aproximação prática, uma vez que a forma corrente de análise das distribuições granulométricas de minério uma serie de peneiras padronizadas, o que permite inferir a distribuição de tamanhos real das partículas. A versão discretizada da equação 1 tem a seguinte forma:

$$\frac{df_i(t)}{dt} = -S_i f_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ i>j}}^{i-1} b_{i,j} S_j f_j(t) \quad n \geq i \geq j \geq 1 \quad (7)$$

Onde f_i é a frequência simples da classe granulométrica i , t é o tempo de moagem, S_i é a taxa de quebra do material (ou função de seleção) da classe granulométrica i e $b_{i,j}$ é a função de quebra (na forma não-acumulada, $b_{i,j} = B_{i,j} - B_{i+1,j}$) das partículas do minério da classe granulométrica i gerando a classe granulométrica j . A equação 7 é similar a equação 4, mas além do desaparecimentos das partículas da classe granulométrica i , leva em consideração a formação das partículas nesta classe oriundas da fragmentação das partículas maiores.

O conjunto de n equações diferenciais ordinárias (equação 7) que fornece a evolução temporal da distribuição granulométrica das partículas do minério durante a moagem descontínua foi resolvido analiticamente por REID (1965), resultando nas seguintes equações:

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^i a_{i,j} e^{-S_j t} \quad (8)$$

Onde

$$a_{i,j} = f_i(0) - \sum_{\substack{k=1 \\ i>j}}^{i-1} a_{i,k} \quad , \quad i=j \quad (9)$$

$$a_{i,j} = \frac{1}{S_i - S_j} \sum_{k=j}^{i-1} S_k b_{i,k} a_{i,k} \quad , \quad i>j \quad (10)$$

Outras soluções para a equação 7, assim como a versão para o caso de moagem contínua são encontradas na literatura (AUSTIN *et al.*, 1984, BERALDO, 1987, AUSTIN e CONCHA, 1993), mas fogem ao escopo do presente trabalho.

A determinação dos parâmetros cinéticos da moagem (funções S_i e $B_{i,j}$), característicos do mineral e das condições de ensaio podem ser feitas por retro-cálculo, quando há disponibilidades de

informação da unidade de moagem, ou através de ensaios de moagem e classificação em laboratório, como é o caso do presente trabalho (AUSTIN *et al.*, 1984, AUSTIN e CONCHA, 1993). A função de seleção pode ser estimada através da moagem de partículas de faixas granulométricas estritas em diferentes tempos e a determinação da inclinação das curvas de $f(t)$ linearizadas, como indica a equação 7. A função S depende do tamanho das partículas do minério e da razão diâmetro dos corpos moedores do moinho: diâmetro de partícula. Nota-se S aumenta com o aumento do tamanho das partículas, mas depois de certo tamanho de partículas a função atinge um valor máximo e esta em seguida esta tendência é invertida (AUSTIN *et al.*, 1984, AUSTIN e CONCHA, 1993). Algumas equações foram propostas para descrever a função S , uma delas é a equação proposta por AUSTIN *et al.* (1984), que consegue descrever muitos casos:

$$S_i = \frac{\alpha_0 d_i^{\alpha_1}}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{crit}}\right)^{\alpha_2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Onde α_0 , α_1 , α_2 e d_{crit} são os parâmetros ajustáveis do modelo.

A função quebra B pode ser estimada através de moagens por curto período de partículas de minério de faixas granulométricas estreitas. Este procedimento evita a fragmentação secundária das partículas, o que levaria a valores incorretos da função B . Deve ser assegurado que menos de 30% das partículas de cada mono-tamanho sejam fragmentadas neste procedimento (AUSTIN e LUCKIE, 1972, AUSTIN *et al.*, 1984). Neste caso se o maior tamanho é j a função de quebra é dada pela equação:

$$B_{i,j} \approx \frac{\log \left[\frac{1 - F_i(0)}{1 - F_i(t)} \right]}{\log \left[\frac{1 - F_{j+1}(0)}{1 - F_{j+1}(t)} \right]}, \quad i > j \quad (13)$$

Nota-se que os valores de $B_{i,j}$ não devem ser influenciados pelas condições de moagem, tais como carga do material, carga de bolas, diâmetro do moinho, etc. Nota-se também que para a maior parte dos minérios os valores de $B_{i,j}$ são normalizáveis, ou seja uma vez que as partículas se quebram com uma distribuição dimensionalmente similar. Por esta razão na maior parte dos casos os valores de B_{ij} podem ser ajustados por uma relação empírica, que é composta pela soma de duas funções lineares em escala log-log (AUSTIN *et al.*, 1984, AUSTIN e CONCHA, 1993):

$$B_{i,j} = \Phi \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1 - \Phi) \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, \quad i > j \quad (14)$$

Onde Φ , γ e β são os parâmetros ajustáveis do modelo e são característicos do material. Os valores de Φ estão entre 0 e 1, γ estão entre 0,5 e 1,5 e de β estão tipicamente na faixa de 2,5 a 5,0. A função da equação 13 o também é chamada de função distribuição da quebra normalizada (AUSTIN *et al.*, 1984).

O material estudado no presente trabalho é o minério de ouro da Jacobina Mineração e Comércio Ltda. (JMC). Neste estudo foram realizados ensaios de moagem e classificação do minério com o objetivo de determinar os parâmetros das funções de quebra ($B_{i,j}$) e de seleção (S_i), os quais são necessários para a caracterização do minério.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma amostra do minério da Jacobina Mineração e Comércio coletada na alimentação da moagem foi preparada para os ensaios de moagem. A amostra foi homogeneizada e re-amostrada usando um amostrador Jones da Rodoteste. Foi usado para a fragmentação do minério um moinho de bolas de laboratório de aço com 19,2 cm de diâmetro interno e 20,5 cm de altura interna. Este moinho foi carregado com 72 bolas de aço de 2,46 cm de diâmetro e 16 bolas de 4,08 cm de diâmetro. A velocidade de rotação usada foi de 485 RPM. Após cada ensaio de moagem o material foi classificado em um Ro-tap da Marconi modelo MA750 usando uma serie de peneiras com os seguintes diâmetros: 2000, 1180, 850, 600, 500, 300, 250, 150, 106 e 75 μ m (10, 16, 20, 30, 35, 50, 60, 100, 140 e 200 malhas ABNT). O material retido em cada faixa granulométrica foi pesado em uma balança Shimadzu modelo BL3200H.

Para preparação das amostras e determinação dos parâmetros das funções seleção (S) e quebra (B) foram realizados ensaios de moagem descontínua no moinho de bola nos tempos de um, dois, quatro e sete minutos. O primeiro tempo, um minuto, foi necessário para permitir estimar os parâmetros da função quebra (B) e os intervalos de tempos seguintes foram escolhidos de maneira a caracterizar adequadamente a taxa de desaparecimento das faixas granulométricas de maneira a permitir a estimativa precisa da função seleção (S).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a evolução frequência acumulada passante durante a moagem das nove faixas granulométricas do minério considerados no presente estudo. Foram considerados os tempos de moagem de um, dois, quatro e sete minutos. Usando a frequência acumulada retida para cada classe granulométrica em função do tempo e a equação 5 foi possível estimar a cinética de quebra de cada classe de tamanho. A Figura 2 mostra que para todas as frações granulométricas consideradas o minério da JMC segue uma cinética de fragmentação de primeira ordem.

No presente caso a taxa de fragmentação aumenta com o aumento do tamanho das partículas, mas para partículas muito grandes esta taxa diminui, conforme descrito por AUSTIN e CONCHA (1993). A Figura 3 mostra a velocidade de quebra em função do diâmetro médio das faixas granulométricas usadas assim como é mostrado o modelo ajustado usando o método dos mínimos quadrados:

$$S_i = \frac{0,86d_i^{1,14}}{1 + \left(\frac{d_i}{1,56}\right)^{4,67}} \quad (15)$$

Usando o tempo de um minuto de moagem para as nove faixas granulométricas e a equação 13, foi possível estimar a função de quebra (B) do minério da JMC. A Tabela 1 sumariza os resultados da função quebra (b) e da função quebra acumulada (B) para a fração granulométrica mais grosseira. Os valores da função quebra acumulada para as nove faixas granulométricas consideradas neste estudo são mostrada na Figura 4. Nota-se que há alguma dispersão, mas há uma tendência a normalização dos resultados. Na Figura 4 também é mostrado o modelo ajustado para todos os dados usando o método dos mínimos quadrados:

$$B_{i,j} = 0,29 \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^{0,76} + 0,71 \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^{2,21} \quad (16)$$

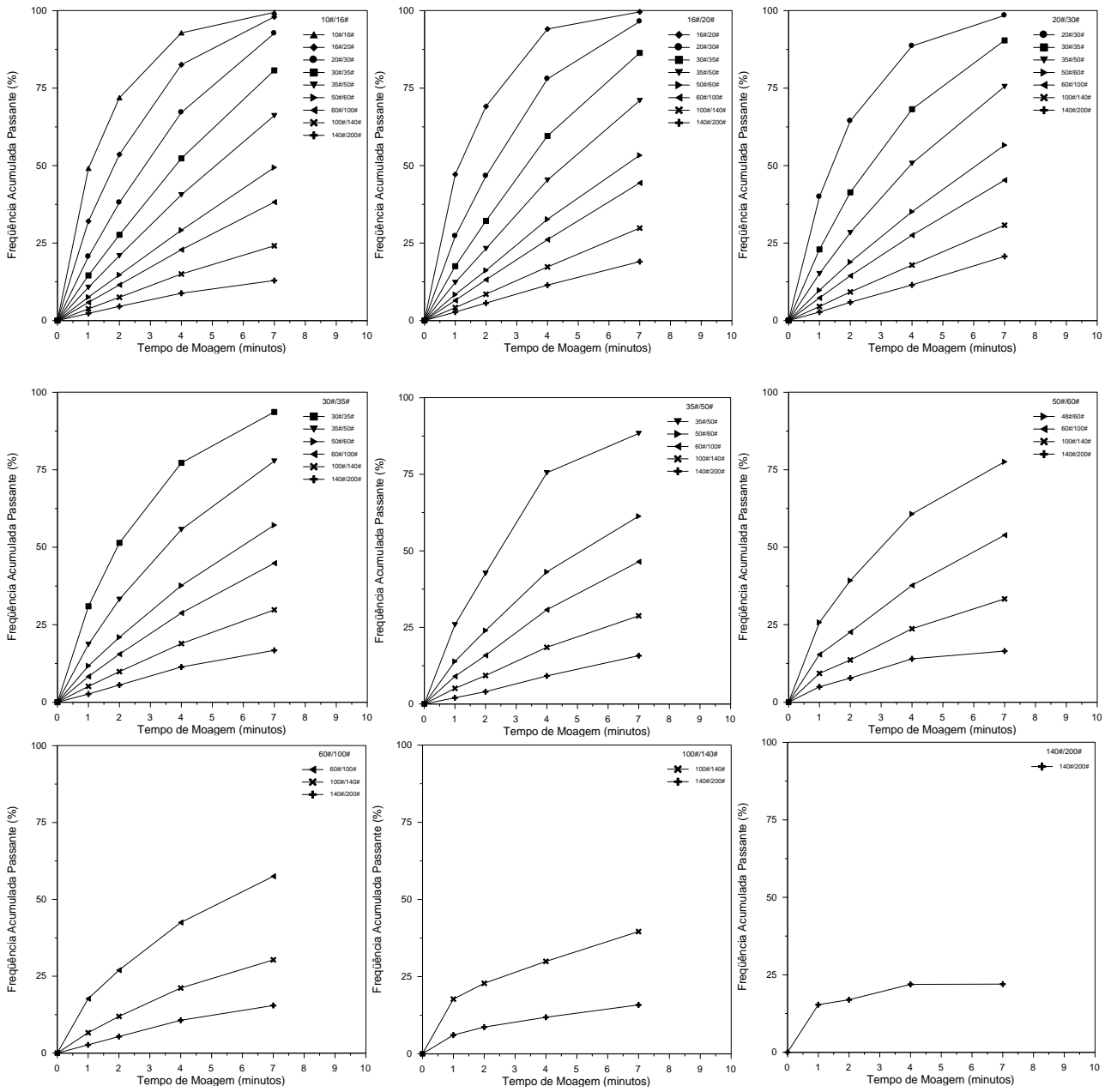


Figura 1. Evolução temporal da moagem de mano-tamanhos.

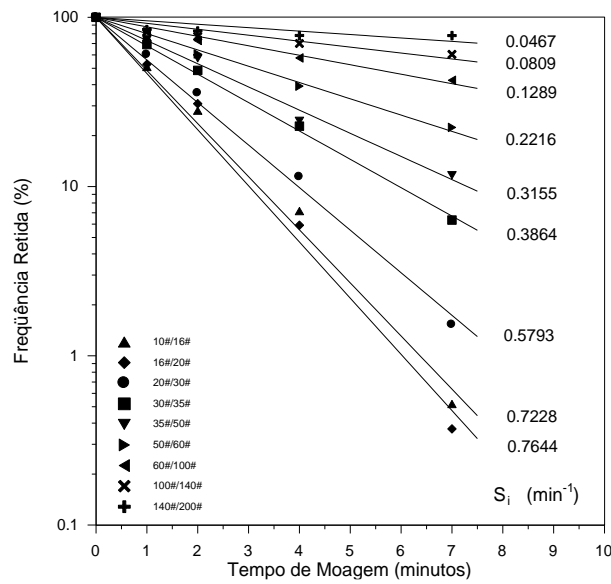


Figura 2. Cinética da moagem em função do tamanho das partículas.

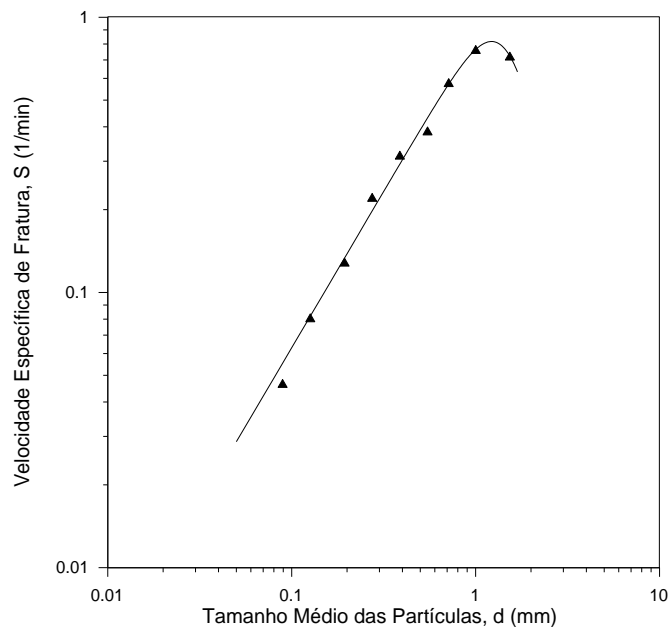


Figura 3. Velocidade específica de quebra das partículas em função do tamanho.

Tabela I. Função quebra (b) e função quebra acumulada (B) para as partículas de 10/16 malhas ABNT.

Numero do Intervalo	Tamanho ABNT (malha)	Abertura (\$\mu\text{m}\$)	\$B_{i1}\$	\$b_{i1}\$
1	10/16	2000/1180	1.00	
2	16/20	1180/850	0.57	0.23
3	20/30	850/600	0.34	0.11
4	30/35	600/500	0.23	0.07
5	35/50	500/300	0.17	0.05
6	50/60	300/250	0.12	0.03
7	60/100	250/150	0.09	0.03
8	100/140	150/106	0.06	0.02
9	140/200	106/75	0.03	0.03

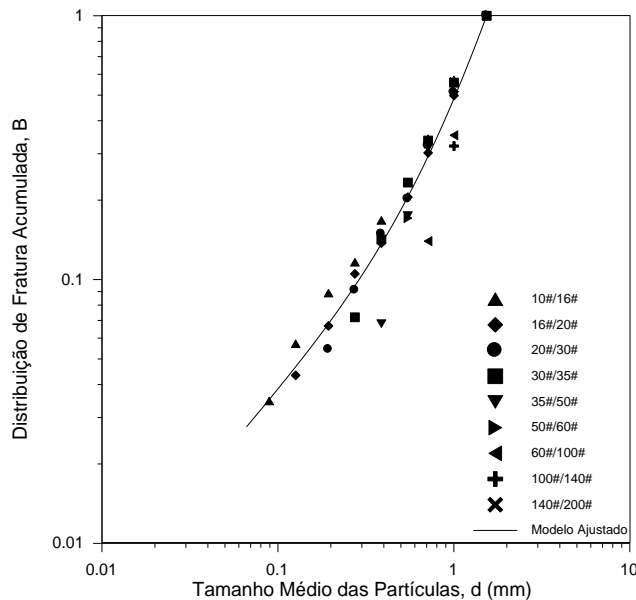


Figura 4. Função quebra acumulada em função do tamanho das partículas.

4. CONCLUSÕES

O minério aurífero da Jacobina Mineração e Comércio foi amostrado e usado para a determinação das funções de seleção S e de quebra B usando moagem descontínua de nove faixas granulométricas entre 2000 e 75 micra. A taxa de desaparecimento segue o modelo de primeira ordem e a função de seleção apresenta o clássico comportamento de aumento com o aumento do tamanho das partículas seguido por uma redução do valor para partículas grandes. A função de quebra tem um comportamento normalizável. Ambas funções puderam ser bem ajustadas com modelos empíricos previamente descritos na literatura.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Jacobina Mineração e Comércio no desenvolvimento deste trabalho e ao CNPq pelo apoio financeiro na forma de bolsa de Iniciação Científica para este projeto.

6. REFERÊNCIAS

- AUSTIN, L.G., LUCKIE, P.T., Methods for determination of breakage distribution parameters, Powder Technology, v.5, n.4, p. 215-222, 1972.
- AUSTIN, L.G., KLIMPEL, R.R., LUCKIE, P.T., Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1984.
- AUSTIN, L.G., CONCHA, F., Diseño y simulación de circuitos de molyenda y clasificación, CYTED. 1993.
- BASS, L., Zur theorie der mahlvorgänge, Z. angew. Math. Phys., v.5, p.283-292, 1954.
- BERALDO, J.L., Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares, Edgard Blucher Ltda, 1987.
- REID, K.J., A solution to the batch grinding equation, Chemical Engineering Science, v.20, n.11, p.953-963, 1965.