

ANÁLISE DA TAXA DE QUEBRA NA MOAGEM A SECO EM MOINHO DE BOLAS PLANETÁRIO

Tavares, L.M.M.¹; Kreischer, A.T.²

1, 2 – Departamento/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE – Universidade Federal do
Rio de Janeiro – Cx. Postal 68505 – 21949-900 – Rio de Janeiro – RJ
tavares@ufrj.br

O modelo do balanço populacional oferece uma excelente descrição quantitativa do processo de moagem, encontrando ampla aplicação na otimização e projeto de circuitos de cominuição. Na sua formulação mais usual é comum supor que a cinética de quebra é de primeira ordem. Esse, entretanto, não é o caso de um número de situações de interesse prático, como a da quebra de partículas grossas – que ocorre invariavelmente na moagem autógena e semi-autógena – e da desaceleração da quebra das partículas devido ao acúmulo de finos no interior do moinho. Nesses casos, as taxas de quebra se tornam não-lineares e devem ser descritas quantitativamente. Relativamente poucos ainda são os estudos detalhados na literatura que descrevem em detalhe esse fenômeno, e ainda menos numerosas são as tentativas de descreve-lo quantitativamente. No presente trabalho é estudada a influência da resistência das partículas da alimentação, do tamanho de partícula e das condições operacionais do moinho na taxa de quebra, com especial atenção ao aparecimento da taxa de quebra não-linear na moagem a seco. Para isso, ensaios foram realizados em um moinho de bolas planetário de laboratório com monotamanhos de hematita, sienito e calcário. Os resultados foram analisados à luz dos modelos empíricos conhecidos. O potencial da descrição desses efeitos não-lineares através de modelos que levam em consideração as distribuições de resistências das partículas e da distribuição de energias de impacto no interior do moinho é discutido.

Palavras-chave: moagem de alta energia, taxa de quebra, modelo do balanço populacional

Áreas Temáticas: Cominuição, Simulação de processos

INTRODUÇÃO

O modelo do balanço populacional é uma excelente ferramenta para a modelagem e simulação da moagem descontínua e contínua. Ele tem sido usado em inúmeras aplicações, descrevendo desde a moagem autógena até a moagem ultrafina de alta energia (Austin et al., 1984; King, 2001).

Uma importante simplificação frequentemente utilizada no modelo é considerar que a taxa de quebra de cada intervalo de tamanhos segue uma cinética de primeira ordem, em analogia à cinética química. Embora essa consideração seja normalmente válida, desvios em relação ao modelo de primeira ordem podem ser encontrados. Esses desvios tipicamente são associados a efeitos de material ou a efeitos do ambiente de moagem.

Quando a energia cinética de cada impacto no interior do moinho é superior à energia necessária para a quebra das partículas, as taxas de quebra tendem a ser adequadamente descritas pelo modelo de primeira ordem. Esse normalmente é definido como o regime de fratura normal e geralmente ocorre quando o tamanho dos corpos moedores é muito maior que o das partículas cominuídas, como é o caso da moagem fina e ultrafina. No caso da moagem convencional de grossos, bem como da moagem autógena e semi-autógena, uma proporção significativa dos eventos ocorre com magnitude insuficiente para causar ruptura de todas as partículas. Como resultado, as taxas de quebra se tornam não-lineares e a fratura anormal. Austin (Austin et al., 1973; Austin et al., 1982) define essa não-linearidade como sendo associada a um efeito de material. Isso é particularmente importante na modelagem matemática de circuitos fechados de moagem, nos quais o produto grosso do classificador retorna de volta para o moinho. Inclusive, Tavares e King (1998) observaram que partículas de minério de ferro contidas em um dado intervalo de tamanhos no produto do moinho eram mais resistentes do que aquelas presentes na sua alimentação. Essa diferença de resistência, entretanto, desaparecia para partículas com tamanho inferior a, aproximadamente, 0,5 mm.

Efeitos de ambiente também podem ser responsáveis pelo aparecimento de taxas de quebra não-lineares (Austin e Bagga, 1981; Fuerstenau et al., 2002). Condições podem existir nas quais as partículas mais grossas são cominuídas preferencialmente ou em outros casos partículas mais grossas podem se tornar protegidas pelos finos após algum tempo de moagem. Na moagem a úmido, a baixas densidades de polpa, a suspensão de partículas finas na polpa pode resultar no aumento da probabilidade de partículas grossas serem moídas, ou, a altas densidades, a polpa pode se tornar tão viscosa que a moagem é retardada, a menos que algum aditivo de moagem seja utilizado (Fuerstenau et al., 2002). No caso da moagem a seco, desvios da linearidade e reduções das taxas de quebra podem ocorrer devido ao acúmulo de finos na carga (Austin e Bagga, 1981).

O presente trabalho analisa a influência do tipo de material e condições de moagem na taxas de quebra na moagem a seco. Um moinho planetário descontínuo de laboratório é utilizado, o qual permite a realização de ensaios de moagem com pequenos volumes de material e com o controle da intensidade do campo centrífugo.

MODELAGEM MATEMÁTICA

A fim de descrever quantitativamente os resultados experimentais na moagem planetária o modelo do balanço populacional da moagem descontínua (Austin et al., 1984) é utilizado. Considerando o moinho como um reator de mistura perfeita e a validade da hipótese de desaparecimento de primeira ordem, tem-se

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

sendo $m_i(t)$ a fração em massa presente no intervalo de tamanhos i após um tempo t de moagem, S_i a função taxa de quebra – invariável com o tempo – e b_{ij} a função distribuição de quebra. Por convenção, considera-se $i = 1$ para o intervalo mais grosso presente na alimentação.

Para a classe de tamanhos mais grossa da alimentação ($i = 1$) a solução da equação (1) é dada por

$$m_1(t) / m_1(0) = \exp(-S_1 t) \quad (2)$$

Algumas formas funcionais têm sido consagradas na literatura pela sua capacidade em descrever efetivamente as funções taxa de quebra e distribuição de quebra. A função taxa de quebra para partículas finas é freqüentemente dada por (Austin et al., 1984)

$$S_i = a \left(\frac{x_i}{x_0} \right)^\alpha \frac{1}{1 + |x_i / \mu_i|^\lambda}, \quad (3)$$

na qual α é parâmetro do modelo e x_0 e a são, respectivamente, o tamanho representativo da faixa de tamanhos de referência (tomada tipicamente como 1 mm) e a sua taxa de quebra.

A função distribuição de quebra, a qual representa a distribuição de tamanhos média resultante da fratura primária de partículas individuais dentro do moinho, pode ser descrita usando a soma de duas funções potência (Austin et al., 1984).

Diferentes formulações têm sido propostas para o modelo do balanço populacional da moagem descontínua quando ocorrem desvios da cinética de primeira ordem devido a efeitos de material (Austin et al., 1973; Austin et al., 1982). Um tratamento empírico simplificado foi proposto considerando que o gráfico de primeira ordem é composto por uma fração Ψ de material com baixa taxa de quebra, com velocidade específica de fratura S_B e uma fração $1 - \Psi$ de material com fratura rápida, de taxa específica de fratura S_A . O resultado é (Austin et al., 1982)

$$m_1(t) / m_1(0) = \Psi \exp(-S_B t) + (1 - \Psi) \exp(-S_A t) \quad (4)$$

A taxa específica média da classe de tamanhos pode ser estimada por (Austin et al., 1982)

$$\bar{S}_1 = \frac{1}{\frac{1 - \Psi}{S_A} + \frac{\Psi}{S_B}} \quad (5)$$

Soluções têm sido propostas para o modelo do balanço populacional quando efeitos não-lineares encontram-se presentes (Austin et al., 1982).

EXPERIMENTAL

Amostras de sienito, calcário e hematita, provenientes de Nova Iguaçu (RJ), Cachociro do Itapemirim (ES) e do quadrilátero ferrífero (MG) foram utilizadas nos ensaios. As suas densidades específicas (determinadas por picnometria) são $2,77 \text{ g/cm}^3$, $4,90 \text{ g/cm}^3$ e $2,80 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. A preparação das amostras para os ensaios consistiu de peneiramento em intervalos estreitos de tamanhos.

Ensaio de moagem foram realizados utilizando um moinho de bolas planetário de laboratório (PM-4 da *Retsch*) que opera descontinuamente. A moagem é realizada usando recipientes cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 500 ml de volume com revestimento liso, os quais são posicionados diametralmente a um braço de rotação (com raio de 15 cm), que por sua vez é acionado por um motor de 750 W. Um inversor de frequência e um controlador lógico programável (PLC) são usados no controle da velocidade de rotação, a qual pode atingir 300 rpm. As velocidades angulares dos braços e jarros são iguais em módulo, mas inversas em sentido, de modo que a superposição das forças centrífugas muda constantemente, resultando no movimento de Coriolis. Assim, é possível produzir movimentos dos corpos moedores similares aos de cascata e catarata dos moinhos convencionais. O eixo de rotação do sistema é vertical, de maneira que a força gravitacional age perpendicularmente às forças centrífugas que atuam sobre os corpos moedores.

Corpos moedores de 20 mm de diâmetro e recipientes de ágata (99% SiO_2), com densidade de $2,6 \text{ g/cm}^3$, foram utilizados nos ensaios. O grau de enchimento e o preenchimento de vazios foram mantidos em 22 e 42 %, respectivamente, o que representou o uso de dezesseis corpos moedores em cada ensaio. Considerou-se porosidade da carga de 40% no cálculo do grau de enchimento e do preenchimento de vazios.

Um total de 62 ensaios de moagem a seco foram realizados a partir de amostras contidas em monotamanhos, os quais permitiram analisar o efeito da velocidade de rotação e do tamanho de partícula na cinética de moagem dos diferentes materiais. Após cada experimento o produto do moinho era descarregado e peneirado. O material era inicialmente peneirado a úmido usando a peneira de menor abertura ($37 \mu\text{m}$) e, após a secagem do material, o material retido era novamente peneirado, agora usando uma série de peneiras com aberturas seguindo uma progressão com razão de $\sqrt{2}$. Pelo menos quatro experimentos foram realizados para diferentes tempos de moagem para cada condição estudada, a fim de permitir uma adequada estimação dos parâmetros do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A influência do tempo na fração remanescente no tamanho mais grosso da alimentação é ilustrada na Figura 1 para a amostra de sienito. Observa-se que, para as frações mais finas, taxas de desaparecimento seguem cinética de primeira ordem, o que é evidente pelo comportamento linear das curvas, adequadamente ajustadas usando a Equação (2). Taxas de quebra não-lineares, contudo, foram observadas para partículas mais grossas, sendo que a Equação (4) fornece um bom ajuste aos dados experimentais. Em geral, para os demais materiais e frequências de rotações estudadas, observa-se que, na faixa intermediária de tamanhos, taxas de quebra lineares são predominantes (Tabela 1). As maiores frequências e para materiais mais frágeis, taxas de quebra mesmo das faixas mais grossas tendem a seguir a cinética de primeira ordem.

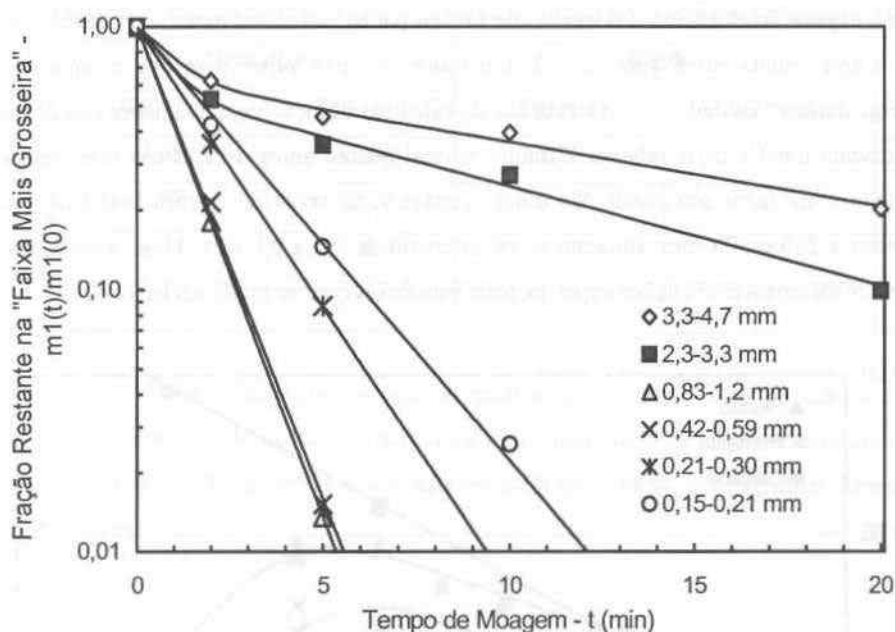


Figura 1 – Taxa de desaparecimento em função do tempo para sienito, moído a 200 rpm

No caso da moagem à condição altamente energética (300 rpm), foram observados efeitos de quebra acelerada no período inicial (aprox. 1 ou 2 minutos), com desaceleração da quebra no período seguinte (2 a 5 minutos), seguido por aceleração final no tempo restante de moagem. Variações similares da taxa de quebra também foram observadas por Verma e Rajamani (1995) na moagem a úmido, sendo as mesmas atribuídas a variações da composição granulométrica da carga durante a cominuição.

Tabela 1 – Taxas de quebra dos materiais estudados, mostrando as taxas rápida e lenta dos componentes.

Dados de sienito moído a 300 rpm e calcário moído a 200 rpm são omitidos, uma vez que não foi necessário o ajuste dos dados experimentais usando a Equação (4)

Tamanho (mm)	Sienito				Hematita							
	200 rpm				200 rpm				300 rpm			
	ψ	S_A	S_B	\bar{S}_1	ψ	S_A	S_B	\bar{S}_1	ψ	S_A	S_B	\bar{S}_1
3,35-4,75	0,361	1,03	0,056	0,085	0,073	5,97	0,016	0,017	0,376	0,363	0,028	0,043
2,36-3,35	0,410	1,30	0,087	0,141	-	-	-	-	-	-	-	-
1,68-2,36	-	-	-	-	0,55	0,56	0,022	0,046	0,346	14,1	0,236	0,267
0,83-1,18	-	-	-	0,859	0,57	2,51	0,169	0,360	0,292	1,27	0,426	0,806
0,42-0,59	-	-	-	0,828	-	-	-	0,266	-	-	-	0,776
0,21-0,30	-	-	-	0,483	-	-	-	-	-	-	-	-
0,15-0,21	-	-	-	0,380	-	-	-	0,193	-	-	-	0,547
0,063-0,075	-	-	-	0,246	0,319	0,82	0,057	0,081	-	-	-	0,224

Uma comparação entre as taxas médias de quebra par os diferentes materiais e frações estudadas e a Equação (3) é apresentada nas Figuras 2 e 3. Em todos os casos observa-se que a equação é capaz de descrever adequadamente os dados. Com a exceção do calcário, a função taxa de quebra dos demais materiais estudados apresenta tanto a parte relativa à fratura normal quanto anormal. Embora com resistência muito distinta e sujeita à moagem sob condições muito variáveis, as taxas de quebra máximas para sienito e hematita, moídos a 200 e 300 rpm, situaram-se no intervalo de 0,5 a 0,8 mm. Uma síntese dos parâmetros para os diferentes materiais e condições experimentais estudadas é apresentada na Tabela 2.

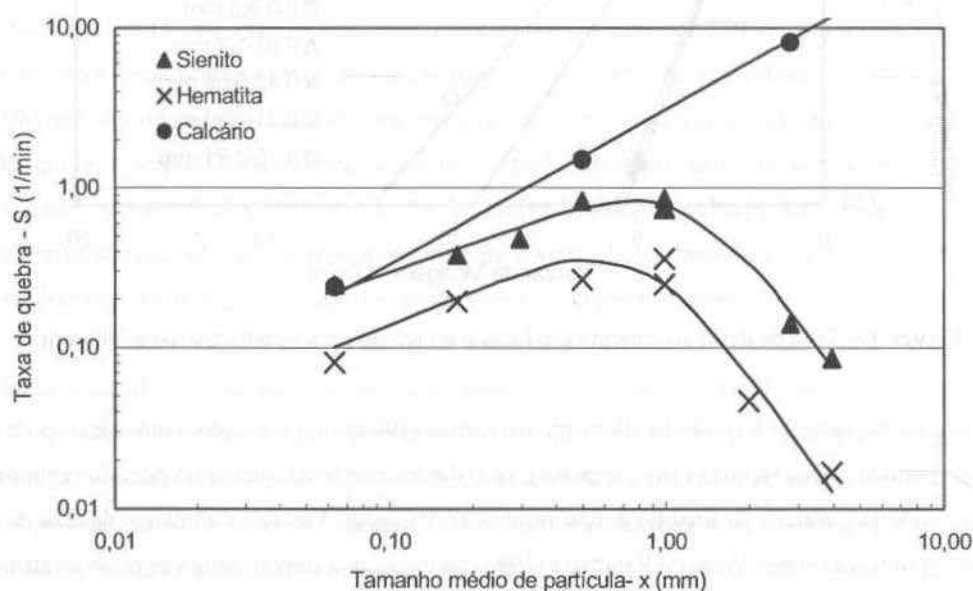


Figura 2 – Variação da taxa de quebra com o tamanho de partícula para a moagem planetária a 200 rpm

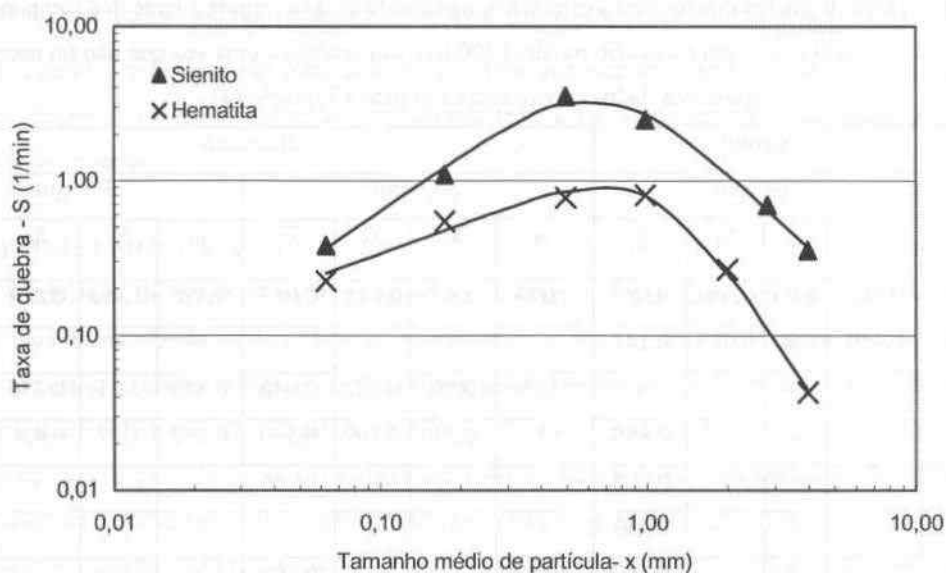


Figura 3 – Variação da taxa de quebra com o tamanho de partícula para a moagem planetária a 300 rpm

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros ótimos da função taxa de quebra (Equação 3)

Parâmetro	Hematita		Sienito		Calcário
	200 rpm	300 rpm	200 rpm	300 rpm	200 rpm
a (min^{-1})	0,69	1,43	1,22	10,3	3,1
α	0,77	0,63	0,62	1,21	0,97
A	3,04	3,29	3,04	2,86	-
μ (mm)	0,83	1,07	1,21	0,69	-

A fim de explorar a relação entre a taxa de quebra na moagem e a resistência do material foram determinadas as características de quebra de partículas individuais submetidas a impacto em uma célula de carga de impacto (Tavares e King, 1998). Os resultados de fragmentação das partículas foram ajustados de acordo com a expressão

$$t_{10} = A \left[1 - \exp(-b E_{cs}) \right] \quad (6)$$

sendo t_{10} a proporção menor que 1/10 do tamanho original da partícula, E_{cs} a energia específica de impacto a A e b parâmetros do modelo, determinados a partir dos resultados experimentais.

A Tabela 3 demonstra que, de fato, existe uma relação entre a taxa de quebra e a resistência de partículas à fragmentação por impacto. Esses resultados são consistentes com estudos já realizados por Everell (1972).

Pesquisas encontram-se em andamento no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE que visam prever as taxas de quebra na moagem a partir de informações da quebra de partículas, como a energia específica de quebra (Tavares e King, 1998), a susceptibilidade do material à quebra por impactos sucessivos (Tavares e King, 2002) e a simulação do movimento dos corpos moedores pelo método dos elementos discretos (Rajamani et al., 2000).

Tabela 3 – Valores dos parâmetros de quebra de partículas individuais (3,35 x 4,75 mm)

	Hematita	Sienito	Calcário
A	34,06	38,10	83,92
b	0,6204	0,6248	3,930
$A b/\rho$ (m^3/kWh)	0,044	0,086	1,178
S^* (min^{-1})	0,013	0,076	12,5

* Moagem com corpos moedores esféricos de ágata em moinho planetário a 200 rpm

SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Taxas de quebra não-lineares associadas a efeitos de material foram observadas na moagem de sienito e hematita com tamanhos de partículas tipicamente superiores a alguns milímetros. Esses efeitos foram mais freqüentemente encontrados para baixas freqüências e materiais mais resistentes, não sendo observados na moagem de sienito a altas freqüências e calcário. Taxas não-lineares associadas a efeitos de ambiente também foram observadas para partículas com tamanhos inferiores a 0,075 mm.

Relações entre a resistência de partículas individuais à fratura por impacto e a sua taxa de quebra no moinho planetário sugerem que a combinação de informações de quebra de partículas individuais à simulação do movimento dos corpos moedores no interior do moinho será capaz de descrever mecanisticamente a taxa de quebra na moagem, inclusive possíveis efeitos não-lineares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Edital Universal 2002 e CT-Petro) pelo auxílio financeiro para a realização desse projeto. Um dos autores (A.T.K.) também agradece ao PIBIC/CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTIN, L.G., BAGGA, P., Powder Technol., vol. 28, 83-90, 1981.
- AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R.; LUCKIE, P.T., Process Engineering of Size Reduction, AIME-SME, 1984.
- AUSTIN, L.G., SHOJI, K., EVERELL, M.D., Powder Technol., vol. 7, 3-8, 1973.
- AUSTIN, L.G., SHOJI, K., BELL, D., Powder Technol., vol. 31, 127-133, 1982.
- EVERELL, M.D., Trans. SME/AIME, vol. 252, 300-306, 1972.
- FUERSTENAU, D.W., DE, A., KAPUR, P.C., Linear and non-linear particle breakage processes in comminution systems, Anais, 10th European Symposium on Comminution, Heidelberg, 2002.
- KING, R.P., Modeling and simulation of mineral processing systems, 1ª edição, Butterworth-Heinemann, 2001.
- RAJAMANI, R.K., SONGFACK, P., MISHRA, B.K., Powder Technol., vol. 108, 116-121, 2000.
- TAVARES, L.M.M., KING, R.P., Int. J. Miner. Proces., vol. 54, 1-28, 1998.
- TAVARES, L.M.M., KING, R.P., Powder Technol., vol. 123, 138-146, 2002.
- VERMA, R., RAJAMANI, R.K., Powder Technol., vol. 84, 127-137, 1995.