



ESTIMATIVA DA FUNÇÃO QUEBRA PRIMÁRIA PARA MINÉRIO DE MAGNESITA MORAES, M.N.¹, BONADIA, P.², MAZZINGHY, D.B.³, SCHNEIDER, C.L.⁴

¹RHI Magnesita, R&D Mineral Processing. e-mail: matheus.naves@rhimagnesita.com

² RHI Magnesita, R&D Mineral Processing. e-mail: paschoal.bonadia@rhimagnesita.com

³Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Geometalurgia e Simulação de Processos. e-mail: dmazzinghy@de.min.ufmg.br

⁴ Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). e-mail: claudiol.schneider@gmail.com

RESUMO

O processo de moagem é de fundamental importância para o processamento mineral, garantindo a liberação do minério. Entretanto, é uma operação com alto consumo energético, impactando no custo das operações. Portanto, o modelamento e otimização deste processo tem impacto relevante na viabilidade e sustentabilidade da operação, justificando os recorrentes estudos na área. O presente trabalho avaliou uma das funções que descrevem o processo de cominuição, a função quebra. Os testes foram realizados em duas etapas, avaliando a reprodutibilidade e o efeito de mudanças de variáveis como diâmetro do moinho, corpo moedor e meio da moagem (seco e úmido) na estimativa dos parâmetros da função quebra. Os resultados mostraram baixa variabilidade e impacto não significativo das variáveis estudadas na estimativa da função. Entretanto, foi possível observar que para as faixas grosseiras de mono-tamanho, houve desvio significativo nos parâmetros estimados, atribuído a energia insuficiente para efetiva quebra das partículas. Nas faixas finas, independentemente do tamanho e condições operacionais estudadas, os resultados foram semelhantes. O estudo foi realizado com um minério de magnesita, com alta pureza e homogeneidade, sendo sugerida avaliação semelhante para outros materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Moagem, Modelagem matemática, Modelo de Balanço Populacional, Função Quebra, Magnesita.

ABSTRACT

The grinding process is utterly important for mineral processing plants, ensuring the ore liberation for the downstream processes. Nevertheless, it is an energetic intensive process, leading to high operational cost. Thus, the process modeling and optimization have significant impact on the mining operation feasibility and sustainability, justifying the frequent studies. The present research assessed one of the functions which describes the comminution process, the breakage distribution function. The trials were set up in two stages, evaluating the test reproducibility and the impact of variables (as mill diameter, grinding media size and, dry and wet processes) on the breakage distribution function parameters. The results showed low variability among the replicates and no significant impact of the process parameters on final function estimation values. However, for the coarse narrow-size, the impact energy was considered not enough to properly break the particles, leading to deviant results from the smaller size fractions. On the other hand, the smaller size fractions presented similar results, independent on the evaluated conditions. Should be noticed that the ore assessed presents high purity and homogeneity, being suggested to carry out similar evaluation for different materials.

KEYWORDS: Grinding, Mathematical Modeling, Population balance model, Breakage Distribution Function, Magnesite.

1. INTRODUÇÃO

A cominuição é um processo fundamental em plantas de processamento mineral e tem como objetivo liberar o mineral-minério da ganga para os processos de concentração seguintes ou mesmo para adequação granulométrica de produtos.

Entretanto, esse processo demanda alto consumo energético, implicando em alto investimento para implementação e alto custo operacional. Como exposto por Ballantyne, Powell e Tiang (2012) a cominuição é responsável por mais de 40% do consumo de energia elétrica nos processos de mineração analisados e mais de 30% do consumo de energia total de uma operação mineira (considerando combustível utilizado em equipamentos).

Napier-Munn (2012) também demonstrou em análise de dados industriais, que não somente a cominuição tem importante consumo energético dentro de uma planta, mas também tem significativa importância no consumo energético de países como Chile (>30%), Austrália (>30%) e Brasil (>15%).

Além disso, conforme publicado pelo departamento de energia do governo dos Estados Unidos da América (2007), os maiores potenciais de redução de consumo energético em plantas de mineração são nas etapas de cominuição, sendo ao menos três vezes maior que o segundo colocado, consumo de diesel.

Logo, o conhecimento e otimização dos circuitos de moagem tem relevante importância para a sustentabilidade da industrial mineral, sendo o modelamento do processo fundamental para atingir tais objetivos.

Este estudo tem como objetivo a determinação da função quebra para um minério de magnesita, assim como observar diferenças em seus parâmetros quando adotadas diferentes condições de determinação.

2. MODELAMENTO DA MOAGEM

Os modelos atuais adotados para a cominuição, especialmente para moagem, são baseados na descrição proposta por Reid (1965) denominado por ele como a equação fundamental da cominuição. Entretanto, essa equação deveria ser discretizada para intervalos definidos de tamanho, possibilitando a aplicação de métodos analíticos de análise de distribuição granulométrica, conseqüentemente, o modelamento de processos reais com base em ensaios. Herbst e Mika (1970) modificaram a equação para o balanço de massas da moagem de uma faixa de tamanho i no intervalo de tempo t , como exposto na Eq.1.

$$\frac{\partial[Hm_i(t)]}{\partial t} = -k_i Hm_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j Hm_j(t) \quad (1)$$

Sendo H a massa total a ser moída, e m_i a fração dessa massa no tamanho i . Esse produto, Hm_i , no intervalo de tempo t , é dependente de duas funções, k_i , conhecida como função seleção e b_{ij} , denominada função quebra primária.

A função seleção é uma função cinética que descreve a taxa de aplicação de energia por faixa granulométrica, sendo dependente de propriedades do minério e de condições operacionais (King, 2012). A função quebra, por outro lado, descreve a distribuição de tamanhos de partículas geradas a partir de um intervalo de tamanho inicial, considerado dependente apenas de propriedades do minério (Austin, Klimpel e Luckie, 1984).

Portanto, o processo de modelamento da moagem é baseado na estimativa das funções quebra e seleção, com metodologias específicas para cada uma delas, sendo a função quebra objeto de estudo deste trabalho.

3. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO QUEBRA

A metodologia para estimativa da função quebra foi desenvolvida a partir de dados empíricos, como proposto por Austin e Luckie (1972). Kelly e Spottiswood (1990) criticam essa abordagem, comparando as críticas recebidas pelo método de Bond por ambas se basearem apenas em correlações empíricas, e fazem uma análise teórica do processo de quebra, mas sem propor uma nova metodologia.

Entretanto, os métodos propostos por Austin e Luckie (1972) são amplamente aceitos e adotados, gerando resultados satisfatórios dentro de suas limitações do desenvolvimento empírico.

Estes autores observaram que partículas de determinado tamanho, após um evento único de quebra, geram uma distribuição de tamanhos que pode ser representada pela soma de duas funções de potência em uma escala log-log, como demonstrado na Eq.2.

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

Onde Φ , γ e β são os parâmetros que descrevem a função.

Por outro lado, King (2012) demonstra uma equação alternativa (equação 3), para quando a distribuição de quebra se caracteriza como bimodal. Este fato pode ocorrer pela falta de energia para realizar a quebra das partículas mais grossas.

$$B_{i,j} = \left\{ \begin{array}{l} \phi \left(\frac{d_{i-1}}{y_0} \right)^\alpha \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1 - \phi) \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, \quad \text{para } d_i < y_0 \\ \phi \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1 - \phi) \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, \quad \text{para } d_i \geq y_0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Sendo y_0 o ponto de inflexão da curva bimodal, representa o maior tamanho produzido no lascamento e é um dos parâmetros da função. Os parâmetros Φ , α , γ e β são parâmetros que descrevem a função.

Neste caso, a função quebra proposta por Austin e Luckie (Eq.2) não consegue descrever a curva granulométrica gerada na quebra, uma vez que a abrasão e quebra nas bordas dos grãos (lascamento) são os mecanismos mais atuantes no processo e não o impacto, como esperado para o processo industrial.

Assim, para partículas incompatíveis com o tamanho do corpo moedor, o corpo moedor é incapaz de aprisionar as partículas para receber o impacto completo, levando a uma tendência maior ao lascamento ao invés da quebra completa.

Apesar de descrever a curva granulométrica gerada, essa forma de expressão da função quebra não tem função seleção correspondente, não sendo possível realizar o modelamento do processo. Portanto, é indicada a utilização da equação 2, quando determinada para intervalos de tamanhos menores.

Na ausência de informações de energia de quebra, como regra prática, normalmente são adotadas as relações do corpo moedor ser no mínimo dez vezes maior que o diâmetro da maior partícula e o diâmetro do moinho ser no mínimo dez vezes maior que corpo moedor.

Para estimar os valores dos parâmetros da função quebra a partir de dados experimentais de testes em batelada, Austin e Luckie (1972) propuseram diferentes metodologias.

O método B2 é o mais adotado devido a sua simplicidade, maior precisão, e aplicabilidade em moagens de curta duração, mesmo nos casos em que uma amostra de mono-tamanho apresenta imperfeição em seu preparo.

Para gerar o conjunto de dados a ser modelado, os valores de abcissa e ordenada são calculados a partir das Eq.3 e 4, respectivamente.

$$x = \begin{cases} x = 1, & \text{para } d_i = d_j \\ x = \frac{d_i}{d_j}, & \text{para } d_i < d_j \end{cases} \quad (3)$$

$$y = \frac{\log \left[\frac{(1-p_i(0))}{(1-p_i(t))} \right]}{\log \left[\frac{(1-p_j(0))}{(1-p_j(t))} \right]} \quad (4)$$

Onde $p_i(0)$ é a fração passante na fração i antes do teste e $p_i(t)$ após o ensaio. Por outro lado, $p_j(0)$ representa a imperfeição da preparação da amostra, sendo a fração passante no faixa granulométrica preparada antes do ensaio, e $p_j(t)$ após o teste. Por fim d_i é o tamanho de partícula que representa a fração analisada e d_j o tamanho que representa a fração inicial.

Após determinada a curva experimental, os parâmetros da função quebra são estimados através de métodos de otimização, neste caso adotou-se a minimização da função objetivo (Eq.5), onde EXP é o valor experimental e MOD o valor obtido pelo modelo (Mazzinghy, 2009). Neste caso foi adotado método dos gradientes reduzidos generalizado presente no software Excel.

$$FO = \sum_{i=1}^n \frac{(EXP - MOD)^2}{EXP} \quad (5)$$

Definida a estrutura de cálculos, os ensaios para determinação da função quebra foram estabelecidos.

4. PROGRAMA DE TESTES PARA DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO QUEBRA E CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Para a determinação da função quebra, duas classes de ensaios foram estabelecidas. A primeira foi composta de ensaios em triplicata considerando diferentes tamanhos iniciais para avaliar a reprodutibilidade de resultados.

Em seguida foram realizados testes da determinação da função quebra em moinhos de tamanhos distintos, e comparando os resultados com o processo via úmida e seca. A Tabela 1 mostra os ensaios e condições adotadas.

Tabela 1 – Condições adotadas para os testes de determinação da função quebra.

Teste	Diâmetro do Moinho (mm)	Diâmetro do Corpo Moedor	Meio de Moagem	Replicas
1	173	25mm	Seco	Triplicata
2	173	25mm	Úmido	Único
3	300	40mm	Seco	Único
4	300	40mm	Úmido	Único

Além das variáveis mencionadas na Tabela 1, o enchimento de bolas adotado foi 20% e o percentual de interstícios preenchidos foi de 50% (vazios entre as bolas), similares aos trabalhos descritos por Austin, Klimpel e Luckie (1984). Esses dois parâmetros não foram variados, pois Shoji, Lohrasb e Austin (1980) demonstraram que os resultados são pouco sensíveis a estas variáveis. O tempo de moagem adotado foi de 20 segundos, suficiente para fragmentar de 20-30% da massa inicial, como sugerido pelos autores do método, evitando eventos de quebra consecutivos (remoagem).

Para a realização dos testes foi selecionado um minério de magnesita com grande homogeneidade química e mineralógica nas faixas escolhidas. Quatro faixas de tamanho foram selecionadas para a realização dos testes: (i) 4,75-3,35mm (faixa 0); (ii) 2,36-1,70mm (faixa 1); (iii) 1,18-0,85mm (faixa 2); e (iv) 0,600-0,425mm (faixa 3).

A Figura 2 mostra o teor de MgO em base calcinada por faixa de tamanho, mostrando a alta pureza e pouca variabilidade do minério analisado.

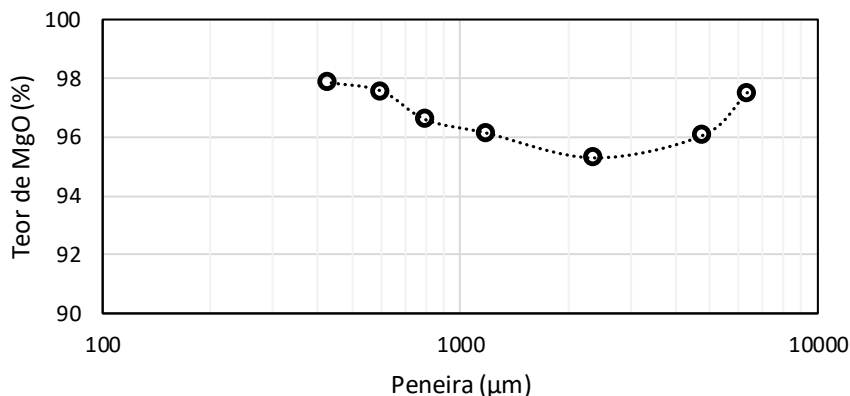


Figura 2 – Teor de MgO em base calcinada por faixa analisada.

Com a definição das amostras e programa de ensaios, os testes foram realizados para análise de variabilidade e estimativa dos parâmetros da função quebra.

5. VARIABILIDADE DA EXECUÇÃO DO MÉTODO

A primeira análise foi realizada com os resultados das triplicatas em cada faixa granulométrica, com os resultados expostos na Figura 3.

O intuito da realização destes ensaios foi validar a reprodutibilidade dos resultados e resumir a quantidade de testes necessários na próxima etapa. Como pode ser observado na Figura 3, considerando cada faixa granulométrica testada, houve baixa variabilidade nos resultados, com as triplicatas (a), (b) e (c) com pontos praticamente coincidentes para as três faixas de tamanho.

Esse fato valida a execução de um único ensaio para os testes variando as condições operacionais, reduzindo a quantidade de ensaios necessários na avaliação. Com esta definição, a análise principal pode ser realizada, com a determinação dos parâmetros para cada alternativa de condição de teste.

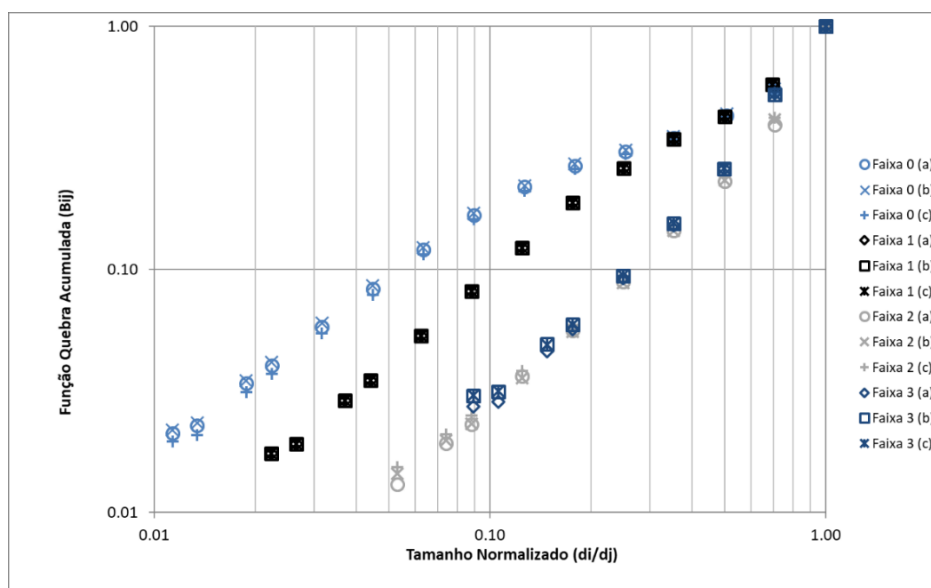


Figura 3 – Resultados experimentais das triplicatas para moagem a seco.

6. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO QUEBRA EM DIFERENTES CONDIÇÕES

Para avaliação dos efeitos das variáveis dimensionais e de meio de moagem, serão descritos na Tabela 2 os resultados dos parâmetros da função quebra para cada ensaio.

Tabela 2 – Resultados da determinação da função quebra.

Teste	Faixa de Tamanho	Diâmetro do Moinho (mm)	Meio de Moagem	Φ	γ	β	γ_0	α
1	0	173	Seco	0,63	0,45	4,82	368	0,58
1	1	173	Seco	0,76	0,70	4,68	384	0,47
1	2	173	Seco	0,40	0,93	2,30	-	-
1	3	173	Seco	0,35	0,95	2,32	-	-
2	0	300	Seco	0,63	0,48	4,98	370	0,55
2	1	300	Seco	0,76	0,71	4,12	392	0,50
2	2	300	Seco	0,34	0,94	2,34	-	-
2	3	300	Seco	0,34	0,84	2,24	-	-
3	0	173	Úmido	0,68	0,43	4,92	393	0,58
3	1	173	Úmido	0,77	0,66	5,54	383	0,49
3	2	173	Úmido	0,36	0,97	2,34	-	-
3	3	173	Úmido	0,35	0,86	2,28	-	-
4	0	300	Úmido	0,66	0,41	5,32	356	0,71
4	1	300	Úmido	0,77	0,72	5,62	379	0,50
4	2	300	Úmido	0,36	0,94	2,23	-	-
4	3	300	Úmido	0,36	0,84	2,33	-	-

Com base nos resultados encontrados, pode ser observado valores muito similares para os parâmetros da função quebra em uma mesma faixa de tamanho. Esse fato foi observado independente da condição testada, seja para moinhos de diferentes tamanhos e

corpo moedor correspondente, ou para o meio de realização da moagem. Entretanto, foi possível observar grande diferença nos valores dos parâmetros quando comparados os resultados para faixas granulométricas diferentes.

Este fato pode ser explicado pela falta de energia para realizar a quebra efetiva das partículas mais grossas independentemente do tamanho do moinho testado, caso das faixas de tamanho 0 e 1, levando a distribuição bimodal descrita por cinco parâmetros. Como descrito, este efeito ocorre devido a incompatibilidade de tamanho de bola e tamanho de partícula, sendo que seriam esperados valores semelhantes para todos os tamanhos caso o problema fosse resolvido.

Entretanto, mesmo com essas considerações, as diferenças encontradas são as mesmas, independentes do meio de moagem e no range de diâmetro de moinho e corpo moedor testado, mostrando a reprodutibilidade do teste e baixa influência dos parâmetros de moagem na estimativa da função quebra (a exceção do tamanho do corpo moedor).

Levando em consideração os problemas relacionados à energia para moagem de partículas grossas e a maior representatividade das faixas 3 e 4 na alimentação da moagem, elas foram escolhidas para a determinação final da função quebra, como exposto na Figura 4.

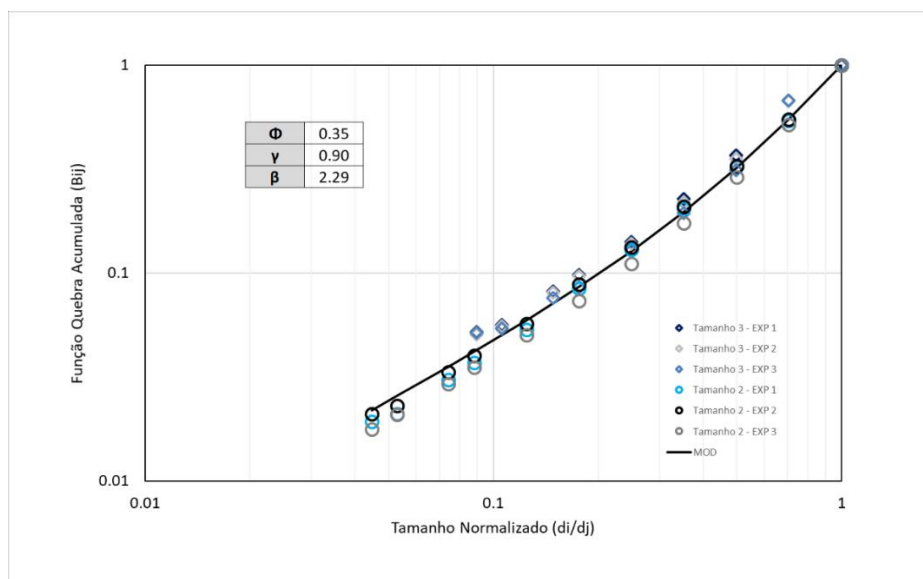


Figura 4 – Função quebra estimada com as faixas 2 e 3 para todas as condições testadas.

Portanto, o diâmetro do moinho, corpo moedor e meio de moagem não impactaram na determinação da função quebra. Entretanto, a relação destes parâmetros com o tamanho de partícula inicial deve ser observado, pois caso não haja energia suficiente para a quebra das partículas não há boa descrição do processo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A determinação da função quebra é fundamental para o modelamento do processo de moagem. Na metodologia mais utilizada, esta função é considerada dependente apenas do material e não do processo. Alguns autores já exploraram algumas variáveis na parametrização da quebra, mas ainda há poucos trabalhos sobre o tema.

Neste estudo foi observada a validade da premissa variando-se o meio de moagem (seco e úmido), o diâmetro do moinho e o corpo moedor. Entretanto, para tamanhos mais

grossos, a energia aplicada pode não ter sido suficiente para uma quebra efetiva, gerando resultados divergentes. Por outro lado, para as faixas mais finas, a função quebra não só descreveu o processo com boa aderência, como a modificação nas variáveis teve impacto insignificante no resultado.

Vale ressaltar que os testes foram realizados com um minério de magnesita que tem como característica homogeneidade química e mineralógica nas faixas avaliadas. É recomendado que o estudo seja também realizado para diferentes minérios.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe do centro de pesquisas em processamento mineral da RHI Magnesita pela contribuição e cuidadosa execução dos ensaios.

8. REFERÊNCIAS

Ballantyne GR, Powell MS, Tiang M. Porportion of energy attributed to comminution . In: 11th Mill Operators' Conference 2012. Proceedings do 11th Mill Operators' Conference 2012; Oct 29– 31; Hobart, Australia. p. 25–30.

Napier-Munn T. Comminution Energy and How to Reduce it [Internet] 2012. Disponível em: <http://www.ceecthefuture.org/wpcontent/uploads/2013/01/Napier-Munn-CEEC-3-12.pdf>

US Department of Energy. Mining industry energy bandwidth study [internet] 2007. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/mining_bandwidth.pdf

Reid KJ. A solution to the batch grinding equation. Chemical Engineering Science, 1965; 20; 953-963.

Herbst JA, Mika TS. Mathematical simulation of tumbling mill grinding: an improved method. Rudy, 1970; 18(3/4); 70-75.

King, RP. Modeling and simulation of mineral processing systems. 2a. ed. SME; 2012.

Austin LG, Klimpel RR, Luckie PT. Process engineering of size reduction: Ball mill. Nova York: SME; 1984.

Austin LG, Luckie PT. Methods for determination of breakage distribution parameters. Powder technology, 1972; 5; 215-222.

Kelly EG, Spottiswood DJ. The breakage function; What is it really?. Minerals Engineering, 1990; 3(5); 405-414.

Klimpel RR, Austin LG. The back-calculation of specific rates of breakage and non-normalized breakage distribution parameters from batch grinding data. International Journal of Mineral Processing, 1977; 4; 7-32.

Mazzinghy DB. Modelagem e simulação de circuito de moagem através da determinação dos parâmetros de quebra e da energia específica de fragmentação. [Dissertação de mestrado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2009.

Shoji K, Lohrasb S, Austin LG. The variation of breakage parameters with ball and powder loading in dry ball milling. Powder Technology, 1980; 25; 109-114.