

CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS PARA MOAGEM AG/SAG – ESTUDOS DE CASO

E.N.C. Araujo, A.C.Chierigati, H. Delboni Jr.

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP: 05508-900 São Paulo SP

eduardo.nozawa@poli.usp.br, ana.chierigati@poli.usp.br, hdelboni@usp.br

RESUMO

Modelos matemáticos de moagem são baseados em dois grupos principais de variáveis que incluem tanto as características do equipamento como as do minério a ser processado. O método de caracterização tecnológica quanto à cominuição utilizado em moagem autógena (AG) e semi-autógena (SAG) baseia-se nessas variáveis para a obtenção de parâmetros para previsão do comportamento do minério nas diversas faixas de tamanho que compõem a alimentação de moinhos AG/SAG industriais. Os parâmetros referentes ao minério são obtidos mediante ensaios de fragmentação, conduzidos em fragmentos individuais, sob condições controladas e padronizadas. Tais parâmetros são, posteriormente, utilizados em programas de simulação de processos minerais.

O presente trabalho objetiva analisar as características de fragmentação de três minérios distintos, resultantes de ensaios realizados em equipamento *drop weight*, sob aspectos de resistência em função do tamanho da partícula, bem como parâmetros derivados da relação energia aplicada e fragmentação resultante. Os resultados dos ensaios são utilizados em simulações para comparações de desempenho a título de verificação.

PALAVRAS-CHAVE: cominuição, moagem, caracterização, simulação.

1. INTRODUÇÃO

As peculiaridades associadas à moagem autógena e semi-autógena exigem extremo cuidado dos projetistas de circuitos de cominuição. A escala das operações e dos investimentos praticamente obriga a realização de cautelosas campanhas de investigação, dado o risco técnico associado. Sob tais exigências, a simulação constitui-se em um recurso útil, particularmente na integração da operação de moagem com os demais equipamentos de processo envolvidos.

A caracterização de minérios, particularmente aplicada à moagem AG/SAG, evolui paralelamente aos modelos matemáticos, pois os parâmetros obtidos através da caracterização dos minérios são determinantes para representar a operação desses moinhos.

A modelagem de circuitos de moagem é um recurso que permite selecionar equipamentos, prever desempenhos, prever a potência requerida por uma instalação, fornecer informações para planejar medidas que reduzam o consumo energético, ou ainda estabelecer um controle simplificado para a dinâmica da operação. Os modelos atuais são baseados em dois grupos principais de variáveis. O primeiro grupo de variáveis se refere ao equipamento que executa a operação, cujos ajustes são obtidos mediante retro-cálculo ou ainda com base em dados de equipamentos semelhantes. O segundo grupo inclui as características do minério processado, que são assim submetidos a ensaios de fragmentação sob condições controladas e padronizadas, em fragmentos individuais ou populações de partículas.

O método de caracterização de partículas individuais empregado na moagem autógena e semi-autógena deve permitir a fragmentação de partículas de tamanhos relativamente grandes em relação ao minério a ser processado, de forma a caracterizar o comportamento do mesmo em faixas de tamanho que compõem a alimentação de moinhos industriais. O presente trabalho visa caracterizar as frações mais grossas em relação às demais, no que diz respeito a sua resistência à fragmentação por impacto. Para isto, aplicou-se o ensaio padrão do equipamento DWT – *Drop Weight Tester*, desenvolvido pelo JKMRC (*Julius Kruttschnitt Mineral Research Center*, Austrália), para um minério de ouro, um de bauxita e outro de cobre, de modo a investigar a influência do tamanho de partícula em sua resistência ao impacto, além de avaliar parâmetros de energia aplicada e a fragmentação resultante.

2. METODOLOGIA

O método de ensaio sobre partículas individuais em DWT, desenvolvido pelo JKMRC, foi escolhido por permitir a obtenção de parâmetros que evidenciam diferenças de resistência à fragmentação por impacto sob aspectos de granulometria e de simulação de processo. A resistência ao impacto não poderia ser mensurada em outros testes como o WI de Bond, onde o minério é britado até que todo ele seja passante numa determinada malha, ou ainda em testes de resistência à compressão simples, ensaio que se aplica a corpo de prova padronizado.

2.1. *Drop Weight Tester* - DWT

O equipamento no qual foram executados os ensaios de fragmentação descritos neste trabalho é denominado *Drop Weight Tester* (DWT) e permite que fragmentos de rocha sejam submetidos, individualmente, ao impacto de um peso cilíndrico e sofram fragmentação conforme a energia aplicada. O peso é elevado até uma dada altura, o que lhe confere uma determinada energia potencial que, após o acionamento de liberação, converte-se em energia de movimento, aplicando um impacto sobre a partícula. É um equipamento robusto, disposto sobre uma base de concreto, conforme o desenho esquemático da figura 1 (Chierigati, 2001).

O DWT é um equipamento que apresenta evoluções importantes em relação ao seu precursor, o duplo-pêndulo, embora ambos os ensaios tenham as mesmas finalidades: obter parâmetros que caracterizem a relação entre energia aplicada e fragmentação resultante. No DWT, entretanto, é possível o emprego de energias substancialmente maiores, resultando no emprego de partículas maiores, mais próximas, portanto, de corpos moedores de moinhos AG/SAG. Além disso, é um equipamento mais ágil e robusto, sendo assim mais adequado para a caracterização de partículas de frações mais grossas em relação à resistência ao impacto, foco deste trabalho.

O equipamento utilizado nos ensaios está instalado na Escola Politécnica da USP, no Laboratório de Simulação e Controle de Processos Mineraiis do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

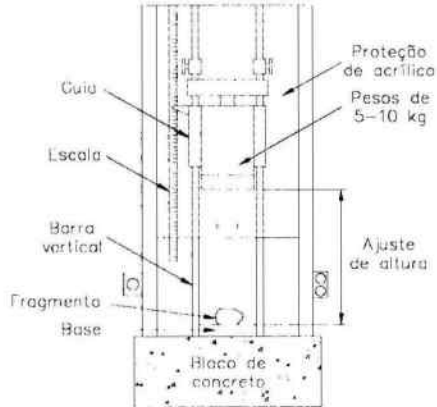


Figura 1: O equipamento *Drop Weight Tester* e suas principais partes.

2.2. Conceitos

O DWT permite a avaliação de grupos de partículas de mesma fração granulométrica, denominados lotes, sob variados níveis de energia específica (ECS ou *specific comminution energy*). O equipamento pode ser configurado para fornecer a energia de impacto desejada, conforme a equação 1 encontrada em Napier-Munn *et al.* (1996).

$$ECS = \frac{0,0272 \cdot M \cdot (h_i - h_f)}{\bar{m}} \quad (1)$$

Onde

ECS é a energia específica de cominuição (kWh/t) - a razão entre a energia aplicada e a massa da partícula,

0,0272 é uma constante para conversão de unidades,

M é a massa do peso cilíndrico (kg),

h_i é a altura inicial (cm)

h_f é a altura remanescente após o impacto (cm) e

\bar{m} é a massa média de cada lote de partículas (g).

A massa do peso cilíndrico e a massa média das partículas são conhecidas. A altura inicial é definida através de uma estimativa da altura remanescente que provém de experiências anteriores. A energia específica efetivamente aplicada nos ensaios é calculada posteriormente, depois de obtida a altura média remanescente de cada lote.

O DWT permite a obtenção da relação entre a fragmentação resultante e a ECS, relação esta denominada "funções quebra". A partir da fragmentação resultante, é calculado o parâmetro t_{10} , que representa a porcentagem passante na malha de tamanho igual a 1/10 do tamanho da partícula inicial. Este parâmetro é uma forma de quantificar a magnitude da fragmentação. O método relaciona o parâmetro t_{10} com a ECS através da curva parametrizada descrita pela equação 2, desenvolvida por Whiten (*apud* Delboni, 1999):

$$t_{10} = A(1 - e^{-b \cdot ECS}) \quad (2)$$

Onde

A é o valor de t_{10} quando a curva assume valor assintótico e

b é um coeficiente associado ao crescimento inicial da curva.

A e b são conhecidos como parâmetros de fragmentação por impacto e são obtidos através de regressões. Segundo Delboni (comunicação pessoal), a resistência ao impacto pode ser representada pelo produto $A \times b$. Quanto mais elevado o produto, menos resistente é o minério, conforme a classificação apresentada na tabela I.

Tabela I: Classificação de resistência ao impacto de amostras segundo o produto $A \times b$.

Intervalo de valores do produto $A \times b$		Resistência ao impacto
Menor	Maior	
10	19.9	Extremamente Alta
20	29.9	Muito Alta
30	39.9	Alta
40	49.9	Moderadamente Alta
50	59.9	Média
60	69.9	Moderadamente Baixa
70	89.9	Baixa
90	149.9	Muito Baixa
> 150		Extremamente Baixa

O parâmetro t_{10} também está relacionado à completa distribuição granulométrica do produto de fragmentação, através das relações entre o próprio t_{10} e os demais t_n . Estas relações foram desenvolvidas por Narayanan (1983) e Whiten (1988), ao comparar as distribuições granulométricas de diversos ensaios e submetê-las a regressões, conforme a figura 2.

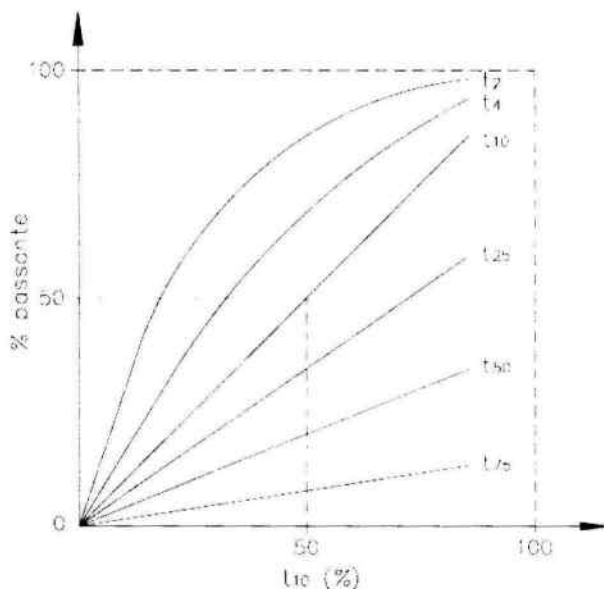


Figura 2: Curvas para obtenção de distribuição granulométrica a partir do parâmetro t_{10} .

2.3. Simulação

O JKSimMet 5.1 é um *software* de simulação de processos capaz de representar circuitos e prever seus comportamentos através dos modelos inseridos. Para simulação de processos de moagem o programa incorpora os modelos de Whiten para moinhos de bolas, de Leung para moinhos SAG, de taxas variáveis para moinhos SAG/AG e de conversão de tamanhos. Mais detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Leung (1987).

3. TRABALHOS EXPERIMENTAIS

Foi aplicado o ensaio padrão de DWT para três tipos de minérios, sendo um de ouro, um de bauxita e outro de cobre. Cinco frações granulométricas de cada minério foram submetidas ao impacto sob três níveis de energias específicas por fração, constituindo, portanto, 15 lotes com até 30 fragmentos por amostra, conforme descrito na tabela II.

Tabela II: Configurações de energia específica dos lotes.

Fração (mm)	Lote	Fragmentos	ECS (kWh/t)
-63,0 +53,0	1	10	0,40
	2	10	0,25
	3	10	0,10
-45,0 +37,5	4	15	1,00
	5	15	0,25
	6	15	0,10
-31,5 +26,5	7	30	2,50
	8	30	1,00
	9	30	0,25
-22,4 +19,0	10	30	2,50
	11	30	1,00
	12	30	0,25
-16,0 +13,2	13	30	2,50
	14	30	1,00
	15	30	0,25

Após submeter ao impacto cada partícula individualmente, o material referente a cada lote foi reunido e enviado para análise granulométrica, de modo a serem calculados os valores experimentais de t_{10} , através de interpolações lineares em escala di-log. Foram determinados os parâmetros A e b associados às curvas de regressão relativas a todas as frações de cada amostra e outros parâmetros A e b referentes às curvas das frações mais grossas -63,0 + 53,0 mm. Apesar de já existirem rotinas que calculam os parâmetros A e b, foi elaborado um programa em linguagem VBA para Microsoft Excel que se baseou em método de mínimos quadrados e na ferramenta Solver com iterações para duas variáveis.

O teste de abrasão não foi realizado, uma vez que foge do escopo do trabalho, visando determinar o comportamento de partículas sob níveis muito baixos de energia de fragmentação.

No software JKSimMet 5.1 foram realizadas simulações através do modelo de Leung para um circuito padronizado, constituído de um moinho SAG e de um rebitador cônico, conforme ilustra a figura 3. Como medida de controle, foi mantido um grau de enchimento constante do moinho, variando-se apenas a vazão de alimentação.

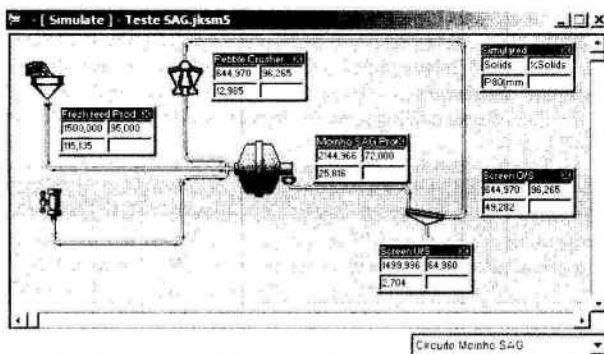


Figura 3: Circuito empregado nas simulações dos três tipos de minérios.

4. RESULTADOS

Os gráficos apresentados nas figuras 4, 5 e 6 mostram as curvas parametrizadas dos valores de t_{10} associados às respectivas energias específicas de cominuição. A tabela III indica os valores de A e b, determinados a partir das regressões, e a variação média de t_{10} no intervalo de ECS compreendido entre 0 e 1,0 kWh/t.

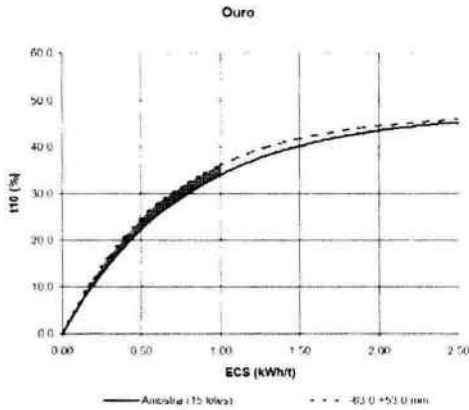


Figura 4: Curvas $t_{10} \times ECS$ do minério de ouro.

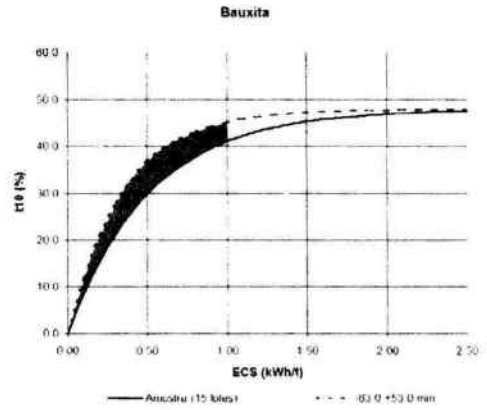


Figura 5: Curvas $t_{10} \times ECS$ da bauxita.

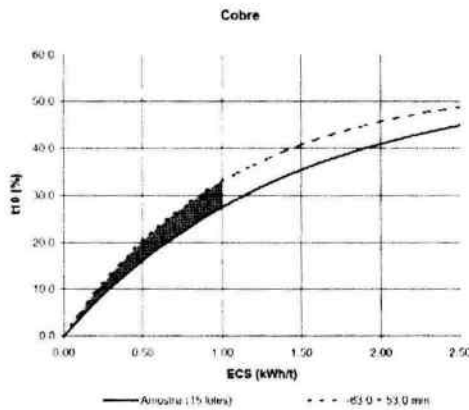


Figura 6: Curvas $t_{10} \times ECS$ do minério de cobre.

Tabela III: Parâmetros A e b.

Parâmetro		Minério de Ouro	Bauxita	Minérios de Cobre
15 lotes	A	47,1	47,9	54,1
	b	1,28	1,94	0,71
	A×b	60,2	93,0	38,3
-63,0 +53,0 mm	A	47,1	47,9	54,1
	b	1,45	2,91	0,93
	A×b	68,5	139,2	50,5
Variação média de t_{10} (%) para ECS entre 0 e 1,0 kWh/t		1,8	5,5	3,6

Nota-se que os valores do parâmetro A para as frações mais grossas foram pré-fixados, o que é justificado: (a) pela relativa dificuldade de se obterem energias específicas elevadas – maiores que 0,50 kWh/t – para blocos maiores, o que em realidade industrial também o é, e (b) pela observação de que, para níveis mais elevados de energia, a resistência ao impacto é governada pelos grãos menores que compõem os blocos, ou seja, por ser a contribuição dos primeiros fraturamentos, favorecidos por fissuras pré-existentes, muito baixa em relação à resistência propiciada por grãos menores e maciços de fato.

Um critério para comparação quantitativa entre as curvas foi estabelecido como a variação média de t_{10} num intervalo de ECS. Esta variação é calculada através da razão da área entre as curvas e o comprimento de um intervalo definido – ECS entre 0 e 1,0 kWh/t, conforme as figuras 3, 4 e 5. O cálculo da área foi realizado por somatório de áreas de retângulos infinitesimais através de um programa em linguagem VBA para Microsoft Excel.

As simulações realizadas no JKSimMet, comparando a fração grossa com todas frações, estão resumidas na tabela IV, onde é observado o comportamento das vazões de alimentação e a variação do produto $A \times b$ para manutenção de um grau de enchimento constante do moinho.

Tabela IV: Comportamento da alimentação.

Simulação	Alimentação (t/h)		
	Minério de Ouro	Bauxita	Minério de Cobre
15 lotes	978	1153	788
-63,0 +53,0 mm	1030	1310	910
Diferença	52	157	122
Variação da Alimentação (%)	5,32	13,6	15,3
Variação de $A \times b$ (%)	13,8	49,6	32,0

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em todos os minérios, as curvas $t_{10} \times ECS$ mostraram uma taxa de crescimento maior do parâmetro t_{10} das frações mais grossas, comprovando diminuição de resistência para estas frações. Os argumentos de Rittinger e Bond (apud Chierigati, 2001) justificam este comportamento: visto que a ruptura se inicia em pontos de fraqueza ou falhas na estrutura atômica do material, as partículas maiores tendem a ser menos resistentes, pois possuem um maior número de fraturas disponíveis para iniciar a ruptura.

No minério de ouro a diferença entre as curvas não é tão acentuada como nos demais minérios, o que pôde ser quantificado, para fins de comparação, pela variação média do parâmetro t_{10} no intervalo de ECS definido. O ouro apresentou a menor variação, cerca de 1,8 %; a bauxita apresentou a maior variação, de 5,5 % e o cobre de 3,6 %.

O produto $A \times b$ também se elevou em todas as frações. Segundo a classificação de Delboni (comunicação pessoal), o minério de ouro ainda se manteve classificado com resistência *moderadamente baixa*, mas migrou entre os extremos da classificação no sentido de perder resistência; a bauxita, analogamente, variou do início da faixa de resistência *muito baixa* até o limite oposto; com o cobre a resistência caiu de *alta* para *média*, apesar de o produto $A \times b$ partir do limite inferior da classificação *alta* para o limite superior da classificação *média*.

Com relação às simulações, os parâmetros A e b são interpretados pelo modelo de Leung como representativos de todo o minério alimentado no moinho, ou seja, não há distinção entre as características individuais de faixas de tamanho da alimentação do moinho, quer representem corpos moedores ou não. Dessa forma, simulações do moinho com minérios que apresentam menor resistência resultam em elevação na vazão de alimentação do equipamento. Para os minérios submetidos a ensaios os resultados das simulações indicaram aumentos na vazão de sólidos do moinho de 5,3% para o ouro, 13,6% para a bauxita e 15,3% para o cobre.

Embora o modelo de Leung de moinhos AG/SAG reproduza com boa precisão variações de vazão de alimentação em função das características de resistência do minério, a inclusão da relação resistência em função da granulação do minério aumentaria a reprodutibilidade do modelo a processos industriais. Esse aspecto modula a operação de moinhos industriais conforme a dependência do processo da fragmentação proporcionada por corpos moedores formados pelo próprio minério.

Assim, em moinhos autógenos a menor resistência em frações mais grossas do minério alimentado pode resultar em aumento da taxa de alimentação até o ponto em que a baixa resistência implique em falta dessas frações na câmara de moagem, causando a redução de fragmentação e, conseqüentemente, a diminuição na vazão de alimentação do moinho. Já em moinhos SAG essa dependência é atenuada pois parte da fragmentação é proporcionada por bolas de aço.

6. CONCLUSÕES

Os ensaios executados mostram resultados que evidenciam, para as frações mais grossas, a diminuição da resistência ao impacto em todos os minérios. Essas diminuições de resistência foram quantificadas através dos parâmetros obtidos, específicos para cada amostra.

Fica portanto demonstrado que a variação média de t_{10} para um intervalo de ECS é uma forma adequada de quantificar a diferença de resistência ao impacto entre as frações granulométricas.

Como a relação de resistência ao impacto em função da granulação do minério modula a operação de moinhos AG/SAG, a sua incorporação em modelos matemáticos de tais equipamentos aumentaria a fidelidade de reprodução de processos industriais em exercícios de simulação. Trata-se de uma linha de pesquisa que deverá ser adotada em trabalho de mestrado.

7. BIBLIOGRAFIA

- Chieregati A.C. 2001. **Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.
- Delboni Jr. H. 1999. **A Load-Interactive Model of Autogenous and Semi-Autogenous Mills**. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.
- Leung K..1987. **An Energy Based Ore Specific Model for Autogenous and Semi-Autogenous Grinding**. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.
- Napier-Munn T.J.;Morrel, S.;Morrison, R.D.; Kojovic, T. 1996. Rock testing – determining the material-specific breakage function. In: **Mineral Comminution Circuits – Their Operation and Optimisation**. Napier-Munn, T.J. Ed., JKMR, Brisbane.
- Narayanan S.S.; Whiten W.J. 1983. Breakage characteristics for ores for ball mill modeling. Australian Institute of Mining and Metallurgy. n. 286, p.9-31.
- Narayanan S.S.; Whiten W.T. 1988. Determination of comminution characteristics from single-particle breakage tests and its application to ball-mill scale-up. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section C, v.97, p.C115-124.