

NOVA METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DE MINÉRIOS APLICADA A PROJETOS DE MOINHOS AG/SAG

Ana Carolina Chieregati e Homero Delboni Jr.

carolina@nvcnet.com.br e hdelboni@usp.br

Depto. Eng. Minas – Av. Prof. Mello Moraes, 2373 – Cid. Universitária – 05508-900 – São Paulo/SP

RESUMO

O emprego de moinhos autógenos (AG) e semi-autógenos (SAG) em circuitos industriais de cominuição é atualmente uma regra em operações que envolvam grande capacidade de processamento. Por outro lado, o projeto e dimensionamento de equipamentos e circuitos estão baseados em metodologias, em sua maioria, empíricas e inteiramente dependentes de fatores condicionantes específicos de cada operação. O desenvolvimento de técnicas mais adequadas encontra dificuldades associadas, principalmente na vinculação entre a execução de ensaios de caracterização e a disponibilidade de grandes quantidades de amostras, em fases ainda iniciais do projeto mineiro.

Nesse contexto foi desenvolvida uma metodologia de caracterização de minérios, cuja principal característica é o emprego de amostras com massa extremamente reduzida. O método proposto não visa substituir ensaios completos e métodos consolidados de caracterização, mas sim complementá-los. Os resultados obtidos em ensaios padronizados propostos, conduzidos sobre vários tipos de minérios, são analisados em termos dos desvios observados na simulação da operação de moinhos AG/SAG industriais. As análises têm por base parâmetros estatísticos de correlação e significância. As conclusões demonstram a viabilidade técnica do emprego da técnica proposta, seus limites de aplicação e sua utilização no projeto de moinhos SAG industriais.

INTRODUÇÃO

Este trabalho vem contemplar a emergente necessidade da indústria mineral brasileira de contar com métodos mais abrangentes de caracterização tecnológica de minérios, que possibilitem a parametrização do desempenho de equipamentos de britagem e moagem, de forma a simular circuitos industriais em situações de projeto ou otimização de processos existentes. O método permitirá também incluir nos cenários de simulação, modelos existentes de

equipamentos raramente encontrados em usinas industriais brasileiras, que incorporam importantes melhorias técnicas, como já vêm praticando a Europa, América do Norte e Austrália.

Os métodos tradicionais de caracterização tecnológica de minérios quanto à cominuição limitam-se à determinação de índices de consumo específico de energia, tais como índice de moabilidade de Bond (Bond, 1952), criado no final da década de 50. Os resultados são empregados em métodos empíricos de dimensionamento de equipamentos.

Esses métodos apresentam o grande mérito de terem servido como recursos úteis dentro de seus respectivos domínios de aplicação. Atualmente, os circuitos industriais de cominuição apresentam uma gama relativamente grande de equipamentos, cujo desempenho não pode ser projetado ou analisado com os recursos tradicionais de caracterização tecnológica. Surgiram e evoluíram neste contexto, métodos mais abrangentes de caracterização, sobre cujos resultados foram desenvolvidos modelos matemáticos eficazes, de praticamente todos os equipamentos de britagem e moagem em operação. Em muitos casos, como no de moinhos autógenos ou semi-autógenos, as análises de viabilidade técnica e econômica de seu emprego são totalmente dependentes de métodos inovadores de caracterização tecnológica.

Pela análise da literatura específica, verifica-se uma tendência irreversível de utilização de determinados equipamentos e processos de cominuição, uma vez que introduzem melhorias técnicas e econômicas significativas ao empreendimento mineiro. O Brasil destoa nesse contexto, salvo raras exceções, uma vez que não se verifica no país grande presença de equipamentos como moinhos autógenos, semi-autógenos, prensas de rolos, moinhos verticais, entre outros. As usinas brasileiras apresentam ainda fluxogramas de britagem e moagem multi-estagiadas, quando a tendência em países concorrentes do Brasil por mercados consumidores, é de instalações mais compactas, com investimentos e custos operacionais menores.

A análise de viabilidade para introdução de tais avanços necessita de técnicas de caracterização tecnológica de minérios quanto à cominuição, que estabeleçam:

- Correlações entre energia aplicada e fragmentação resultante;
- Correlações entre resistência à fragmentação e tamanho de fragmento;
- Quantificação da tendência de geração de finos e ultrafinos.

As informações acima são fundamentais à parametrização de modelos de operação de equipamentos, cuja combinação permite simular um espectro amplo de alternativas de circuitos de cominuição e, assim, selecionar a melhor em termos de índices técnicos e econômicos analisados.

O estabelecimento de correlações entre resistência à fragmentação e tamanho de fragmento é determinante da viabilidade técnica de moagem autógena, uma vez que por meio dos resultados dos testes avalia-se a capacidade do minério em gerar corpos moedores competentes à cominuição fragmento-fragmento.

A quantificação da tendência de geração de finos e ultrafinos reveste-se de grande importância no tratamento de minérios parcialmente intemperizados ou alterados, pois a inadequação de circuitos de cominuição a estas características causa a geração excessiva de ultrafinos e/ou lamas, cujo rendimento em processos de concentração tende a ser extremamente menor que o de frações mais grossas. A correta quantificação desse fenômeno permite ao engenheiro tratamentista compatibilizar a operação do circuito, de forma a maximizar a quantidade de massa gerada em determinadas frações granulométricas que apresentem rendimento superior em processos de concentração, como o de flotação.

O equipamento principal necessário à execução dos testes de caracterização – o DWT (*Drop Weight Tester*) – encontra-se instalado nas dependências do Laboratório de Simulação e Controle do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP.

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O “Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre – JKMRC” da Austrália, tem longa tradição no desenvolvimento de modelagem de equipamentos de cominuição, classificação e concentração de minérios e representa uma das instituições mais renomadas neste setor em todo o mundo.

Os métodos desenvolvidos pelo JKMRC apresentam uma separação fundamental entre as características físicas de fragmentação de minérios e os mecanismos de fragmentação atuantes em equipamentos de cominuição. Esses mecanismos são basicamente três que, dependendo do tipo de equipamento envolvido e condições de operação, ocorrerão sob intensidades e frequências próprias (Delboni Jr, 1999). A Figura 1 apresenta esses mecanismos fundamentais de cominuição e suas distribuições granulo-métricas típicas.

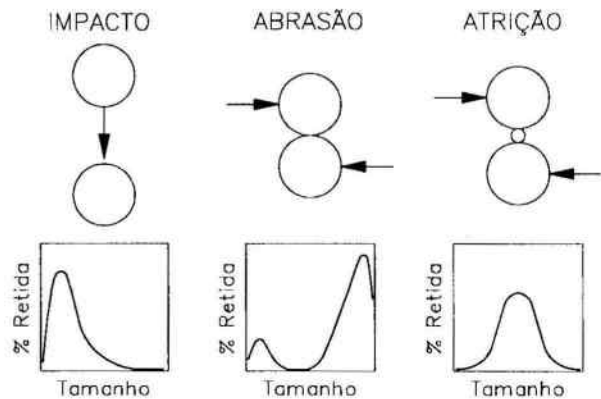
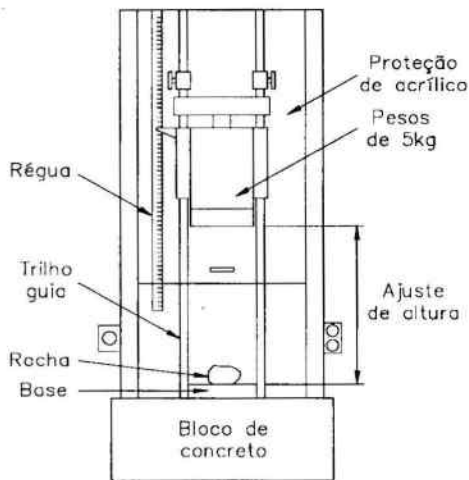


Figura 1 – Mecanismos de fragmentação e distribuições granulométricas resultantes

A metodologia de caracterização tecnológica de minérios empregada neste trabalho baseia-se em índices paramétricos da relação entre energia aplicada e a fragmentação resultante, segundo duas faixas de intensidade de energia. Os valores altos de energia aplicada são obtidos mediante impactos sobre partículas, no equipamento denominado *DWT*. Os valores baixos de energia são obtidos por meio de tamboramento das amostras, também denominado “ensaio de abrasão”.

O *DWT* consiste de uma plataforma metálica, fixa e um cilindro metálico dotado de duas guias laterais que correm em barras verticais. A altura da qual o cilindro iniciará a queda e a massa a ele fixada, determinarão o valor da energia potencial do choque com o fragmento disposto sobre a plataforma inferior. Nesse equipamento considera-se que toda a energia cinética no momento do choque é transferida para o fragmento a ser testado. A energia específica de fragmentação é o quociente entre a energia potencial total e a massa do fragmento (kWh/t). A combinação entre a altura e a massa do peso resulta na energia aplicada ao fragmento de minério testado no *DWT*. A Figura 2 da página seguinte apresenta, de forma esquemática, o *DWT*.

Figura 2 – Equipamento *Drop Weight Tester*

Ensaio Modelo

O procedimento padrão de *DWT* – denominado neste trabalho como *Ensaio Modelo* – estabelece que sejam submetidos ao impacto fragmentos em cada uma das cinco faixas granulométricas que se seguem:

- 63,0 mm × 53,0 mm
- 45,0 mm × 37,5 mm
- 31,5 mm × 26,5 mm
- 22,4 mm × 19,0 mm
- 16,0 mm × 13,2 mm

A partir de cada classe granulométrica são preparados 3 lotes compostos por 30 fragmentos cada e estes, submetidos a impactos com energia específica variando entre 0,25 kWh/t e 2,5 kWh/t. As partículas são assim impactadas individual e separadamente. O material fragmentado proveniente de cada lote de 30 fragmentos é então reunido e encaminhado ao peneiramento, do qual se obtêm parâmetros selecionados de distribuição granulométrica.

A partir dos resultados de ensaios no *DWT* e determinação da distribuição de densidades, é possível analisar:

- Competência do minério para geração de corpos moedores;
- Efeito do tamanho na resistência ao impacto;
- Posição relativa do minério frente a outros minérios ensaiados pelo método;
- Tendência do minério em gerar fragmentos densos e competentes.

O método de caracterização tecnológica empregando-se o *DWT* contrasta conceitualmente com metodologias baseadas em índices de consumo energético específico (kWh/t), ou mesmo com relação a equações empíricas dele derivadas. O principal fator de diferenciação reside na capacidade do *DWT* de reproduzir, separadamente, mecanismos de fragmentação que ocorrem no interior de moinhos AG/SAG, tanto em termos de intensidade como em termos de tamanho de fragmento. Em particular, a avaliação do efeito do tamanho do fragmento na resistência ao impacto é determinante da viabilidade da moagem AG/SAG.

Os ensaios de impacto executados no *DWT* visam determinar os parâmetros descritivos da função paramétrica entre energia aplicada e a fragmentação resultante:

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

onde:

t_{10} = porcentagem passante na malha igual a um-décimo do tamanho original do fragmento

Ecs = energia específica aplicada ao fragmento de minério (kWh/t)

A, b = parâmetros dependentes da resistência à quebra do minério

A função acima representa, portanto, o comportamento característico do minério ensaiado, quando submetido a impactos que ocorrem no interior da câmara de moagem de moinhos AG/SAG. O fenômeno de fragmentação é convenientemente descrito por uma curva com rápido crescimento inicial, determinado pelo parâmetro b , tendendo posteriormente a um valor assintótico, determinado pelo parâmetro A , conforme ilustra o gráfico da Figura 3.

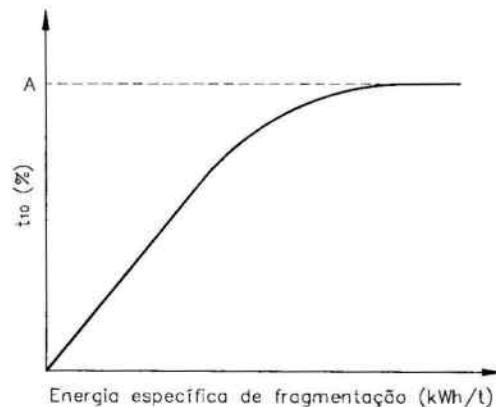


Figura 3 – Representação da relação energia aplicada e fragmentação obtida

Os parâmetros A e b são, portanto, característicos de cada amostra de minério ensaiada. De acordo com a Figura 3, a fragmentação é crescente conforme o aumento da energia específica aplicada à partícula, até que um limite superior seja atingido. Em termos práticos, isto significa que o processo de fragmentação não mais ocorre a partir de um certo valor de energia aplicada às partículas. Assim, quanto menor o valor dos parâmetros A e b , maior a resistência da amostra à fragmentação por impacto.

A resistência ao impacto é analisada em função do produto $A \times b$ e do próprio parâmetro b . O parâmetro $A \times b$ é, conforme descrito na Tabela I, também empregado para análise comparativa entre minérios.

Tabela I – Classificação de resistência ao impacto de amostras segundo o parâmetro $A \times b$

Intervalo de valores do parâmetro $A \times b$	Resistência ao impacto	Sigla
0 – 9,9	Excepcionalmente Alta	ETA
10 – 19,9	Extremamente Alta	EXA
20 – 29,9	Muito Alta	MTA
30 – 39,9	Alta	ALT
40 – 49,9	Moderadamente Alta	MDA
50 – 59,9	Média	MED
60 – 69,9	Moderadamente Baixa	MDB
70 – 89,9	Baixa	BAI
> 90	Muito Baixa	MTB

O parâmetro representativo da resistência da amostra à fragmentação por abrasão é o índice de abrasão, denominado t_a . Este índice é obtido por meio de ensaio de tamboramento em condições padronizadas, quais sejam, 3 kg de amostra de fragmentos com tamanho compreendido entre 55 e 38 mm, submetidos a 10 minutos de tamboramento em moinho de 8" de diâmetro por 8" de comprimento. O valor do parâmetro t_a é numericamente igual a um-décimo do valor do t_{10} obtido por meio de peneiramento do produto tamborado. Desta forma, quanto menor o t_a , maior a resistência da amostra à fragmentação por abrasão.

Em processos industriais de moagem industrial, a abrasão é o principal mecanismo atribuído à fragmentação do minério com tamanho próximo ao extremo superior da carga do moinho.

A Tabela II apresenta a classificação de amostras, em termos de resistência à abrasão, conforme o valor do índice t_a obtido.

Os parâmetros obtidos a partir dos testes de caracterização são empregados em modelos matemáticos

de operação de equipamentos de britagem e moagem, de forma a comparar os resultados das simulações com os resultantes da análise de desempenho dos circuitos industriais amostrados. Os parâmetros objetos de avaliação são o consumo energético, geração de finos e moagem diferencial em função da presença de espécies minerais com diferentes resistências à moagem.

Tabela II – Classificação de resistência à abrasão de amostras segundo o parâmetro t_a

Intervalo de valores do parâmetro t_a	Resistência à abrasão	Sigla
0,00 – 0,19	Extremamente Alta	EAAb
0,20 – 0,39	Muito Alta	MTAb
0,40 – 0,59	Alta	ALAb
0,60 – 0,79	Moderadamente Alta	MAAb
0,80 – 0,99	Média	MDAb
1,00 – 1,19	Moderadamente Baixa	MOAb
1,20 – 1,39	Baixa	BAAb
1,40 – 1,59	Muito Baixa	MBAb
> 1,60	Extremamente Baixa	EBAb

Ensaio LSC

Os ensaios descritos no item anterior estão plenamente consolidados como uma base para a caracterização de amostras, cujos resultados são empregados na calibração de modelos matemáticos de equipamentos de cominuição. Porém, existem situações em que a limitação na quantidade e, principalmente, no tamanho das amostras constitui-se em fator limitante ao seu emprego.

Esse problema é particularmente importante em campanhas de caracterização baseadas em testemunhos de sondagem, que ocorrem em fases de pesquisa ou de análise de variabilidade de jazidas.

Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia de ensaios baseados no emprego de amostras com tamanho inferior a 50 mm. Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Simulação e Controle (LSC) do Departamento de Engenharia de Minas da USP e denominados *Ensaio LSC*.

O método proposto de caracterização tecnológica consiste em submeter ao impacto fragmentos individuais contidos na fração granulométrica compreendida entre 22,4 mm e 19,0 mm, segundo três níveis de energia específica.

Os pares de valores de energia aplicada (Ecs) e fragmentação (t_{10}) resultantes dos ensaios, são submetidos a regressões de forma a estabelecer os valores do parâmetro $A \times b$ segundo a equação paramétrica (1) apresentada anteriormente.

TRABALHOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

O método proposto foi aplicado a uma base de dados composta por oito amostras provenientes de minas situadas em 3 países (Chile, EUA e Brasil).

Todas as amostras consideradas foram submetidas a ensaios completos no *DWT*. Os dados experimentais foram tratados conforme a metodologia do *Ensaio Modelo*, isto é, incluindo ensaios de impacto e tamboramento, e do *Ensaio LSC*, que inclui ensaios de impacto sobre uma mesma fração granulométrica.

A partir dos resultados dos ensaios de *DWT*, foram realizados cálculos de regressão para se determinar os valores do parâmetro $A \times b$ segundo os dois métodos de caracterização.

Para que os resultados do *Ensaio LSC* pudessem ser empregados em modelos matemáticos de moinhos AG/SAG, houve necessidade de estimar-se os valores do parâmetro de abrasão (t_a), visto que, neste ensaio, não se dispõe de amostras de rocha no tamanho necessário para os ensaios de tamboramento. Portanto, realizou-se uma regressão entre os valores $A \times b$ do *Ensaio LSC* e os valores de t_a obtidos nos ensaios de tamboramento.

Com os resultados obtidos, pôde-se classificar cada amostra segundo os critérios apresentados nas Tabelas I e II. As Tabelas III e IV apresentam os resultados dos parâmetros $A \times b$ e t_a obtidos segundo o *Ensaio Modelo* e o *Ensaio LSC*.

Tabela III – Resultados do *Ensaio Modelo* sobre as oito amostras minérios

RESULTADOS DO TESTE SOBRE 15 LOTES DE AMOSTRAS (<i>ENSAIO MODELO</i>)				
Amostra	t_a	Classificação**	$A \times b$	Classificação*
Minério de Cobre (Chile)	0,359	MTAb	38,2	ALT
Minério de Cobre (Chile)	0,504	ALAb	45,3	MDA
Minério de Cobre (EUA)	0,457	ALAb	37,3	ALT
Minério de Cobre (EUA)	0,233	MTAb	35,1	ALT

Tabela III – Resultados do *Ensaio Modelo* sobre as oito amostras minérios (cont.)

RESULTADOS DO TESTE SOBRE 15 LOTES DE AMOSTRAS (<i>ENSAIO MODELO</i>)				
Amostra	t_a	Classificação**	$A \times b$	Classificação*
Bauxita (Brasil)	1,211	BAAb	158,8	MTB
Minério de Zinco (Brasil)	1,413	BAAb	148,8	MTB
Minério Cu-Au (Brasil)	0,369	MBAb	49,5	MDA
Minério Cu-Au (Brasil)	0,311	MTAb	32,2	ALT

* Conforme critérios descritos na Tabela I

** Conforme critérios descritos na Tabela II

Tabela IV – Resultados do *Ensaio LSC* sobre as oito amostras minérios

RESULTADOS DO TESTE SOBRE 3 LOTES DE AMOSTRAS (<i>ENSAIO LSC</i>)				
Amostra	t_a	Classificação**	$A \times b$	Classificação*
Minério de Cobre (Chile)	0,364	MTAb	43,3	MDA
Minério de Cobre (Chile)	0,449	ALAb	48,2	MDA
Minério de Cobre (EUA)	0,326	MTAb	41,1	MDA
Minério de Cobre (EUA)	0,366	MTAb	43,4	MDA
Bauxita (Brasil)	1,286	BAAb	96,3	MTB
Minério de Zinco (Brasil)	1,291	BAAb	96,6	MTB
Minério Cu-Au (Brasil)	0,536	ALAb	53,2	MED
Minério Cu-Au (Brasil)	0,230	MTAb	35,6	ALT

* Conforme critérios descritos na Tabela I

** Conforme critérios descritos na Tabela II

VALIDAÇÃO

O método de validação empregado neste trabalho consistiu na simulação de um circuito de moagem utilizando-se os parâmetros de caracterização resultantes dos dois métodos avaliados.

O fluxograma utilizado nas simulações está ilustrado na Figura 4, constando de um circuito de moagem primária composto por um moinho SAG, uma peneira e um britador de reciclo. O critério de

convergência adotado foi fixar o volume da carga do moinho, ou seja, variar a taxa de alimentação do circuito até atingir o valor pré-fixado do volume da carga.

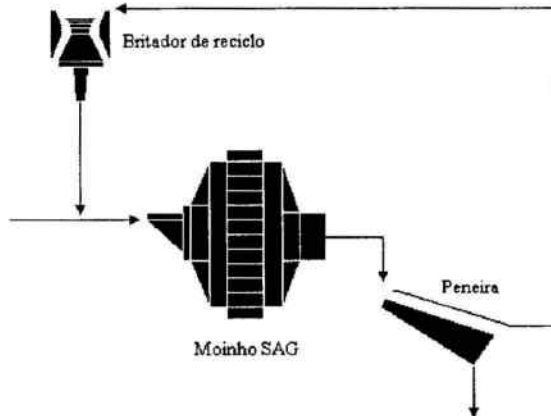


Figura 4 – Fluxograma do circuito de moagem primária

A Tabela V apresenta os resultados das simulações, bem como os erros associados.

Tabela V – Resultados das simulações e erros associados

Ensaio Amostra	Modelo	LSC	Erro relativo (%)
	Alimen- tação (t/h)	Alimen- tação (t/h)	
Minério de Cobre	2565	2687	4,76
Minério de Cobre	2705	2783	2,88
Minério de Cobre	2510	2645	5,38
Minério de Cobre	2527	2694	6,61
Bauxita	3982	3435	-13,74
Minério de Zinco	3911	3447	-11,86
Minério Cu-Au	2838	2870	1,13
Minério Cu-Au	2384	2525	5,91

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

A metodologia de caracterização tecnológica proposta no presente trabalho apresentou resultados promissores, particularmente no que diz respeito a minérios com maior resistência ao impacto ($A \times b$ variando entre 0 e 90).

Para os minérios menos resistentes ($A \times b$ maior que 90), os erros associados ao método são maiores,

havendo uma maior discrepância entre os valores de $A \times b$ obtidos no *Ensaio Modelo* e no *Ensaio LSC*.

De um modo geral, o *Ensaio LSC* indica uma maior resistência para os minérios menos competentes e uma menor resistência para os minérios mais competentes, em se considerando a classificação de resistência ao impacto de amostras segundo o parâmetro $A \times b$ (Tabela I).

O erro relativo médio (excluindo-se as amostras de bauxita e minério de zinco) foi de 4,49%. No entanto, em etapas posteriores de trabalho, esse valor deverá ser confrontado com os erros experimentais associados ao ensaio proposto.

Salienta-se que a metodologia proposta se encontra em estágio preliminar, o qual terá continuidade contando com uma base de dados mais abrangente, bem como se atribuindo os erros devidos a cada etapa de caracterização tecnológica e simulação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – pelo apoio manifestado através da concessão da bolsa de estudos que permitiu a execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- BOND, F.C. 1952. The third theory of comminution. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, v.193, p.484-94.
- DELBONI JR., H. 1999. *A Load-Interactive Model of Autogenous and Semi-Autogenous Mills*. Ph.D. Thesis, University of Queensland, Australia.
- NAPIER-MUNN T.J.; MORRELL, 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., Chap.4, JKMR, Brisbane, p.49-94.