

## DESEMPENHO E OTIMIZAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DA MINERAÇÃO SERRA DA FORTALEZA

*Fernando Karam Delbim e Homero Delboni Jr*

Fernando.delbim@poli.usp.br e hdelboni@poli.usp.br.

EPUSP- AV. MELLO MORAES,2373 CID. UNIVERSITARIA SÃO PAULO

### RESUMO

O desempenho do circuito de moagem da Mineração Serra da Fortaleza- MSF foi analisado através da utilização de características específicas do minério.

Diversas metodologias, com base em métodos tradicionais foram empregadas, como o *Work Index de Bond - WI*, não apresentando resultados adequados.

A metodologia descrita no presente trabalho apresentou resultados excelentes, com a previsão da taxa de alimentação dentro de margens estreitas em função de características do minério e algumas variáveis de processo.

A metodologia proposta de previsão da taxa de alimentação pelas características do minério constitui-se em uma ferramenta útil que não se restringe à MSF, podendo ser aplicada potencialmente a qualquer operação que apresente um circuito de moagem autógena/ semi-autógena- AG/SAG.

### INTRODUÇÃO

O conceito de melhorias incrementais ou contínuas já faz parte da filosofia de operação de várias empresas de mineração.

Assim, processos minerais individuais foram melhorados com a aplicação de novas técnicas, equipamentos ou mudanças em práticas de trabalho. Muitas dessas melhorias estão sendo consolidadas através de procedimentos que assegurem a qualidade e princípios da gestão de qualidade total.

Tradicionalmente, o empreendimento mineiro é dividido em duas grandes áreas: mina e usina de tratamento. Empresas de mineração incorporam esta distinção, frequentemente atribuindo gerências separadas e, como consequência, centros de custo diferenciados.

Esse modo de operação assume que cada setor operando no custo mínimo, garante o mínimo global. Ocorre porém, que os custos mínimos locais não refletem necessariamente o mínimo global do empreendimento, que realmente deve ser o índice principal de análises.

O mínimo global é portanto função de duas áreas que encontram-se intimamente ligadas e, além disso, interdependentes já que uma mudança realizada em uma delas afeta diretamente a outra.

De fato, variações nos teores de alimentação da usina, diluição, distribuição granulométrica têm um efeito significativo na taxa de alimentação e recuperações na planta de beneficiamento. Investigar, identificar e quantificar esse impactos é um grande passo para a otimização global do empreendimento, desde o modelo de blocos até o concentrado final. Desse modo, é possível a melhora da eficiência dos sistemas de lavra e beneficiamento estendendo-se o foco dos processos individuais, passando a incluí-los em uma cadeia de processos que comporiam um sistema unificado mina-usina.

Portanto, um desafio mais distante e complexo que a simples melhoria individual dos processos começa a ser explorado pelas empresas de mineração, envolvendo a otimização das operações de lavra e beneficiamento como um único sistema. A esta nova abordagem é dada o nome de *Mine to Mill*.

Esse trabalho aborda a questão do uso de características tecnológicas de minérios e suas implicações no desempenho da moagem primária AG/SAG da Mineração Serra da Fortaleza, sendo um primeiro passo para uma abordagem *Mine-to Mill*.

### REVISÃO DA LITERATURA

#### Limitação do uso do WI em moinhos AG/SAG

O *Work Index* proposto por Bond tem aplicação consagrada no projeto de moinhos de bolas e barras. No

entanto, este índice não é um parâmetro adequado para descrever o desempenho de moinhos AG/SAG.

O WI é obtido a partir de um teste executado sob condições padronizadas, segundo as quais todo o material na alimentação passa na malha 3,36 mm, tamanho típico da alimentação de um moinho de bolas, substancialmente menor que a alimentação de moinhos AG/SAG, nos quais o *top size* pode chegar até 10".(Napier-Munn)

Partículas grossas possuem, via de regra, uma resistência a moagem menor do que partículas finas. Esse fato decorre da existência de fraturas e fissuras nos fragmentos maiores. Conforme o fragmento original vai sendo cominuído, novos fragmentos são gerados. Assim, fissuras desaparecem uma vez que são regiões de menor resistência, nas quais a quebra dos fragmentos ocorre preferencialmente.

Em um moinho AG/SAG há três mecanismos de quebra: Impacto, Atrição e Abrasão.

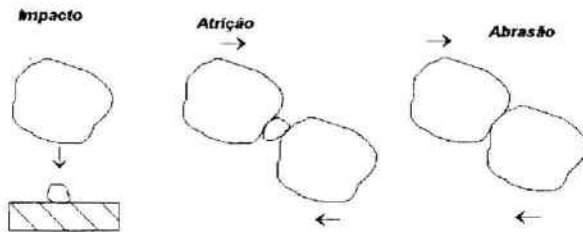


Figura 1 - Mecanismos de Fragmentação: Impacto, Atrição e Abrasão

- Impacto: A partícula impactante move-se obliquamente ao plano de contato, não estando em contato constante com a partícula impactada.
- Atrição: Fenômeno similar à abrasão, no qual uma partícula pequena é presa entre duas partículas muito maiores e quebra por ação da força exercida.
- Abrasão: Fenômeno de fragmentação da superfície que é resultante do movimento entre duas partículas paralelo ao plano de contato

Em moinhos em que os corpos moedores são exclusivamente barras ou bolas, a quebra se dá basicamente pela atrição ou impacto, não ocorrendo quebra por abrasão, uma vez que a massa do fragmento a ser cominuído é pequena em relação aos corpos moedores. O mesmo não ocorre em moinhos AG/SAG, nos quais a abrasão desempenha um papel importante no processo de quebra.

Uma das premissas do método de Bond é o paralelismo entre as distribuições granulométricas da

alimentação e produto, quando plotadas em curvas acumuladas passantes em relação ao tamanho. Esta premissa é aplicável a moinhos de bolas e barras, mas não a moinhos AG/SAG. A descarga nestes moinhos não é paralela a alimentação, sendo necessária a adoção de parâmetros mais adequados (Napier-Munn).

Esses fatores, aliados às próprias restrições ao uso do WI para moinhos de barras ou bolas, como a consideração da carga circulante constante, determinam o WI como um índice insatisfatório para parametrizar o desempenho de um moinho AG/SAG.

Um outro complicador reside no fato do WI não ser um índice ponderável. Assim, ao blendar-se dois ou mais tipos litológicos, cada um com um diferente WI, o WI desta composição não é o WI médio ponderado pelas quantidades de cada tipo. Isso ocorre uma vez que a rocha mais resistente auxilia a cominuir a de menor competência.

No caso de operações em que há a blendagem, essa imponderabilidade inviabiliza o emprego do *Work Index*. Um estudo de moabilidade diferencial do material blendado torna-se necessário. A dificuldade de um estudo dessa natureza torna-se mais cada vez mais complexa com o aumento do número de minérios a serem blendados.

### Índices de quebra

A distribuição de quebra é a distribuição granulométrica após um evento de quebra, ocorrido no interior de um moinho AG/SAG.

Durante décadas foram realizados estudos com o objetivo de obter-se parâmetros auto-correlacionáveis. Constatou-se que, se a distribuição de quebra for expressa em relação ao tamanho original do fragmento, os resultados seguem um padrão definido, independentemente do tamanho inicial selecionado. Esse padrão é conhecido como auto-similaridade. (Delboni Jr.)

Esse conceito, quando aplicado aos testes de quebra incluídos neste trabalho, permite estabelecer uma função que descreve a relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante, conforme mostrado a seguir:

$$t_{10} = A \left( 1 - e^{-b E_{cs}} \right) \quad (1)$$

onde:

$t_{10}$  = porcentagem passante na malha igual a 1/10 do tamanho original

$E_{cs}$  = energia específica aplicada ao fragmento de minério (kWh/t)

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

A função descrita na equação (1) tem a forma de uma curva com rápido crescimento inicial, determinado pelo parâmetro b, tendendo posteriormente a um valor assintótico, determinado pelo parâmetro A. Na prática isto significa que o processo de fragmentação não mais ocorre a partir de um certo valor de energia aplicada às partículas.

Os parâmetros A e b são, portanto, característicos de cada amostra de minério testada.

O produto de A por b é considerado um parâmetro de resistência à quebra por impacto da rocha. Quanto maior esse valor de A por b menos resistente ao impacto é o material. Em situações nas quais o valor do parâmetro A é mantido constante, quanto menor o valor do parâmetro b maior a resistência da amostra ao impacto. (Napier-Munn)

Existe correlação entre o parâmetro de impacto  $Axb$  e o WI. Entretanto, o WI mede a reação de uma alimentação de top size igual a 3,35mm a uma combinação de atrição e impacto em um moinho de bolas a seco. Os índices de quebra A e b são parâmetros de quebra por impacto e por este motivo a correlação entre o WI e  $Axb$  é baixa conforme mostra a Figura 2 abaixo.

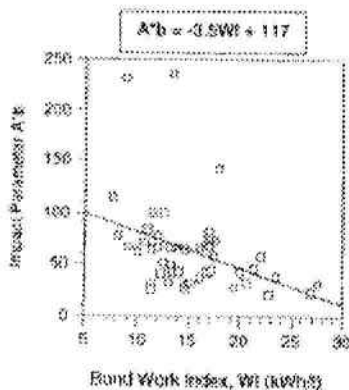


Figura 2 – Correlação entre os parâmetros  $Axb$  e WI

## ESTUDO DE CASO: MSF

### Generalidades

A Mineração Serra da Fortaleza- MSF pertencente ao grupo Rio Tinto Brasil, situa-se a cerca de 5 km da cidade de Fortaleza de Minas e a 20 km da cidade de Passos no sudoeste do Estado de Minas Gerais.

O projeto contempla a lavra, concentração de minério de níquel além da metalurgia extrativa deste metal.

As operações da MSF tiveram início em 1997. A lavra foi realizada a céu aberto durante os primeiros 4 anos, com uma gradual passagem para o método subterrâneo a partir do terceiro ano. A recuperação das reservas geológicas de níquel foi de 95,4% com obtenção de teor médio de 1,65% de níquel, considerando-se a diluição da lavra.

### Geologia

A jazida de níquel sulfetado de Fortaleza de Minas é estimada em 10,6 milhões de toneladas e, ao ritmo atual de lavra, prevê-se uma vida útil de 20 anos.

O mineral de minério de níquel é a pentlandita que ocorre associada a outros sulfetos como a pirrotita, calcopirita, talco e outros filossilicatos.

Com base em teores e desempenho metalúrgico, a litologia dessa jazida é subdividida em 4 tipos de minérios além do estéril, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 1 - Tipos de Minério da MSF

Tipo de minério	Distribuição na Jazida (%)	WI Bond (kWh/t)
Brechóide	40	14,5
Chert	20	20,8
Intersticial	20	18,3
Disseminado	20	20,4

### Circuito primário de moagem

O minério britado é retomado da pilha de estoque a uma taxa de 70 t/h e alimentado no moinho SAG, de 18'x6', através de transportador de correia dotado de balança integradora.

Água é adicionada ao moinho SAG em proporção adequada para manter 60% de sólidos. O moinho SAG é carregado com cerca de 10% de bolas de 125 mm, e é equipado com uma grelha de descarga que permite apenas a saída de produto abaixo de 35 mm. A descarga do moinho alimenta uma peneira vibratória horizontal, de onde a fração retida (acima de 12 mm) é retornada a alimentação do moinho SAG, através de um transportador de correia de alto ângulo. A fração fina, abaixo de 12 mm, é conduzida a uma caixa de bomba, e alimenta uma flotação de talco para retirada deste mineral deletério ao circuito de fundição. O rejeito dessa

flotação é conduzido a uma caixa de bomba que alimentará os circuito secundário de moagem.

**Taxa de alimentação e produção**

O cenário de produção que se apresentava na MSF em junho de 1999 era de grandes variações de desempenho no circuito de moagem primária, resultando em taxas de alimentação inferiores à nominal.

Essa deficiência na alimentação levava a dois problemas principais. O primeiro era uma menor produção de concentrado final, e conseqüentemente menores quantidades de níquel. O segundo diz respeito ao processo em si, que determinava condições de operação totalmente diferentes da projetada. Na concentração, o fator limitante ao aumento da taxa de alimentação era o moinho SAG.

A previsão da taxa de alimentação na MSF era realizada a partir do *Work Index de Bond* para cada minério, que no entanto, não apresentava correlações aceitáveis. Assim sendo, o controle adotado não era satisfatório. Nesse contexto, minérios cujo WI ponderado eram baixos apresentavam taxas de alimentação baixas. Da mesma forma, minérios extremamente resistentes, segundo o WI, resultavam em altas taxas de alimentação, não correspondendo ao desempenho previsto. Assim, o WI não se constituía em um parâmetro útil ao planejamento das operações da MSF.

No entanto, permanecia a necessidade de estimar a taxa de alimentação da usina. Considerando que os parâmetros de quebra por impacto (A, b) são utilizados no dimensionamento e modelagem de moinhos AG/SAG, decidiu-se adotá-los na metodologia proposta para estimativa de desempenho do circuito.

**Caracterização do minério a partir de índices de quebra**

Os principais tipos de minério da MSF foram objetos de ensaios de fragmentação por impacto, cujos resultados são apresentados na Tabela 2 abaixo:

**Tabela 2- Índices de Quebra Obtidos a Partir de Amostras da MSF**

Amostra	Índices de Quebra	
	A	b
Brechóide	60	1,02
Stringer no Chert	60	0,44
Disseminado	60	0,28
Intersticial	60	0,61

O índice de quebra é uma propriedade característica do tipo de minério. Normalmente, o produto A por b seria por si só uma indicação da resistência do minério. No entanto, com o parâmetro A igual a todos os minérios, o índice de resistência à quebra por impacto é simplesmente o parâmetro b de cada minério, constituindo-se no Índice de Quebra ( IQ ), utilizado para os minérios da MSF.

A cada fogo na mina a céu aberto, atribui-se valores de partição do material desmontado para cada tipo de minério, bem como de estéril. A partir desses valores e dos IQs individuais, calcula-se o IQ do fogo mediante média ponderada. Desse modo, à cada fogo é associado um valor de IQ.

**RESULTADOS**

A partir de registros de taxas de alimentação do circuito de cominuição da MSF e valores de IQ calculados para os minérios alimentados, foram levantadas correlações entre esses parâmetros, conforme mostrado na Figura 3.

O índice de correlação (R<sup>2</sup>) foi obtido através de regressões exponenciais, cuja equação é mostrada na Figura 3. Considerando que nenhum tratamento prévio foi feito, os valores obtidos foram considerados muito bons, demonstrando o potencial do IQ como índice aplicável à previsão do desempenho do moinho SAG da MSF.

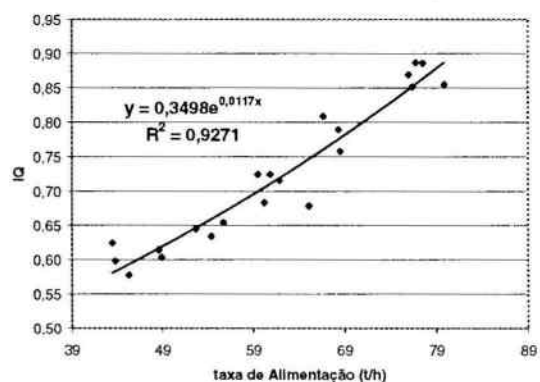


Figura 3 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ- maio de 1999

Apesar de apresentar um índice de correlação aceitável, as regressões realizadas sobre períodos mais longos apresentavam valores bastante inferiores. Análises desses resultados indicaram conjuntos de pontos representativos de diferentes condições de operação do circuito, ainda que em modo SAG.

Uma das principais causas dessas dispersões foram atribuídas a diferentes cargas de bolas, diferentes granulometrias na alimentação do moinho primário, velocidade de rotação, bem como a porcentagem de sólidos de polpa do moinho. Decidiu-se assim analisar em detalhe os dados de operação diária do circuito em relação à essas variáveis.

Após testes preliminares de sensibilidade entre a relação taxa de alimentação/IQ e as variáveis acima mencionadas, observou-se que o fator individual com maior influência nos resultados foi a granulometria de alimentação. Dessa forma, esta variável foi selecionada para análises ainda mais detalhadas.

Com base nessas informações foram estabelecidos três conjuntos de modos de operação do britador e da forma de alimentação, conforme descritas na Tabela 3 abaixo.

**Tabela 3 –Características dos grupos de correlação**

Grupo	Granulometria	Britador		Pilha
		Abertura	Mandíbulas	
1	grossa	Grande	gastas	Virada
2	média	Média	gasto médio	Virada/ Normal
3	Fina	Pequena	novas	Normal

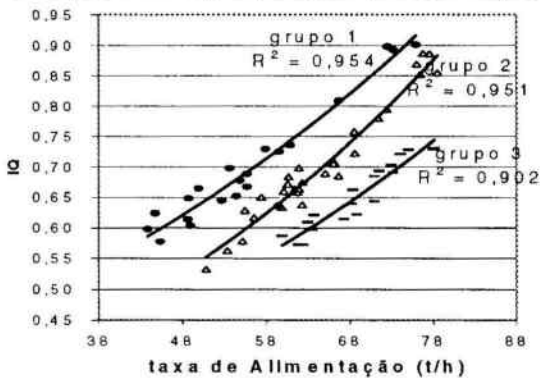


Figura 4 – Correlação entre taxa de alimentação do circuito e IQ.

**Aderência do modelo proposto**

Com base na definição do modelo de previsão da taxa de alimentação em função do IQ, descrito no item anterior, foram executadas rotinas de testes estatísticos para avaliação da qualidade das estimativas.

Para esse propósito selecionou-se um conjunto de dados de operação que não havia sido usado para a obtenção das correlações. Conforme estabelecido no item anterior, o critério usado para estabelecimento dos conjuntos foi a granulometria de alimentação.

As análises foram realizadas comparando-se as taxas de alimentação estimadas pelo modelo e os valores da operação, conforme apresentadas na Figura 5 abaixo.



Figura 5 – Aderência do modelo proposto

A comprovação quantitativa da aderência dos dados foi realizada através do cálculo da média e desvio padrão das taxas de alimentação calculadas, das observadas e da diferença entre as duas. Esses dados estatísticos são apresentados na Tabela 4 a seguir.

**Tabela 4 – Resultados Estatísticos**

	Valor Calculado (Vc)	Valor Observado (Vo)	Diferença (Vc-Vo)
Média	59,08	59,15	-0,07
Desvio Padrão	-	-	1,42
Erro (2DP) absoluto	-	-	2,83
Erro padrão	4,79%	Média de erros padrão	4,86%

A média da diferença observada na Tabela 4 demonstra a proximidade entre os valores calculados e os observados.

Para determinar a probabilidade das médias das duas amostras serem iguais foi utilizado o teste estatístico de T-Student, apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 – Teste de T-student**

Hipótese da diferença de média	0
Grau de confiança	95%
Probabilidade de Calculado = observado	97,72%

Estatisticamente, a probabilidade das médias serem iguais foi de 97,72%, como mostra a Tabela 5. O erro padrão entre os dados calculados e os observados, foi de 4,79%. Esse erro padrão foi calculado como o quociente do erro absoluto pela média dos valores de taxa de alimentação calculadas. Ainda, foi calculado a média dos erros padrão definida como a média dos quocientes do erro padrão e cada valor calculado, cujo resultado foi 4,86%.

Dessa forma é comprovada a eficácia dessa metodologia de previsão da taxa de alimentação através do IQ.

### CONCLUSÕES

A metodologia de caracterização tecnológica, com base na resistência que o minério apresenta a impacto, foi empregada para análise de desempenho do moinho SAG do circuito de cominuição da MSF.

Inicialmente foram conduzidos ensaios de caracterização em amostras representativas dos 5 tipos de minério processados pela MSF, dos quais resultaram índices de quebra (IQ) individuais. Com base em tais resultados e nas informações do *blending* empregado, foram obtidas correlações nítidas entre o IQ ponderado da alimentação do moinho e a taxa de alimentação registrada pela operação. Embora preliminares, esses resultados indicaram resultados melhores do que os obtidos pelo emprego do método de Bond.

Estudos complementares sobre períodos longos de operação permitiram hierarquizar as variáveis de operação em função de sua influência no desempenho do moinho SAG da MSF. Dentre tais variáveis a que apresentou maior influência foi a granulação da alimentação do moinho.

As análises estatísticas executadas indicaram assim, correlações nítidas entre a taxa de alimentação do moinho SAG e a combinação do IQ ponderado com estimativas da granulação da alimentação do moinho.

O método descrito revelou-se portanto em recurso útil, não apenas à operação do circuito de cominuição, mas também como subsídio ao planejamento das operações de lavra do minério da MSF, de forma a permitir a integração efetiva da empreendimento mineiro.

O método proposto não se restringe à operação estudada e, mediante adaptações, pode ser empregado em circuitos similares.

### AGRADECIMENTO

Meus sinceros agradecimentos à Fundação de amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-Fapesp pelo apoio e confiança em todo os momentos neste projeto.

### BIBLIOGRAFIA

- DELBONI JR, H. **Otimização do circuito de moagem da MSF**. Fortaleza de Minas, MSF, s.d. (Relatório Interno)
- LYNCH, A.J. **Mineral crushing and grinding circuits- Their simulation, optimization and control**, Elsevier, 1977
- McKEE, D.J., SCOTT, A. **The inter-dependance of mining and mineral beneficiation processes on the performance of mining projects**. In: The AusIMM Annual Conference . Darwin, 1994. p. 303-08
- KLIMPEL, R.R. Evaluating comminution efficiency from the point of view of downstream froth flotation. **Minerals & Metallurgical Processing**, v. 15, n.4, p 1-8, Nov. 1998
- MINERAÇÃO SERRA DA FORTALEZA LTDA. **Descrição do empreendimento da MSF**. Fortaleza de Minas, MSF, s.d. (Relatório Interno)
- NAPIER-MUNN, T.J. et al. **Mineral cominution circuits: their operation and optimisation**. Indooroopilly, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996. Cap.4. P.63-87. Cap.7, p.154-90. Cap.9, p.209-11. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing )
- PANGUM, L.S. et al. Mineralogical and metallurgical examination of fluoro-silicate mineral flotation in Ok Tedi Circuit. In: MINE TO MILL CONFERENCE, Brisbane,1998. **/Proceedings/** Brisbane, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy,1998. p.19-28 (Publication Series, n. 4/98)
- PITARD, F.F. A strategy to minimize ore grade reconciliation problems between the mine and the mill. In: MINE TO MILL CONFERENCE, Brisbane,1998. **/Proceedings/** Brisbane, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy,1998. p.77-82 (Publication Series, n. 4/98)