WWW.REVISTAMINERIOS.COM.BR

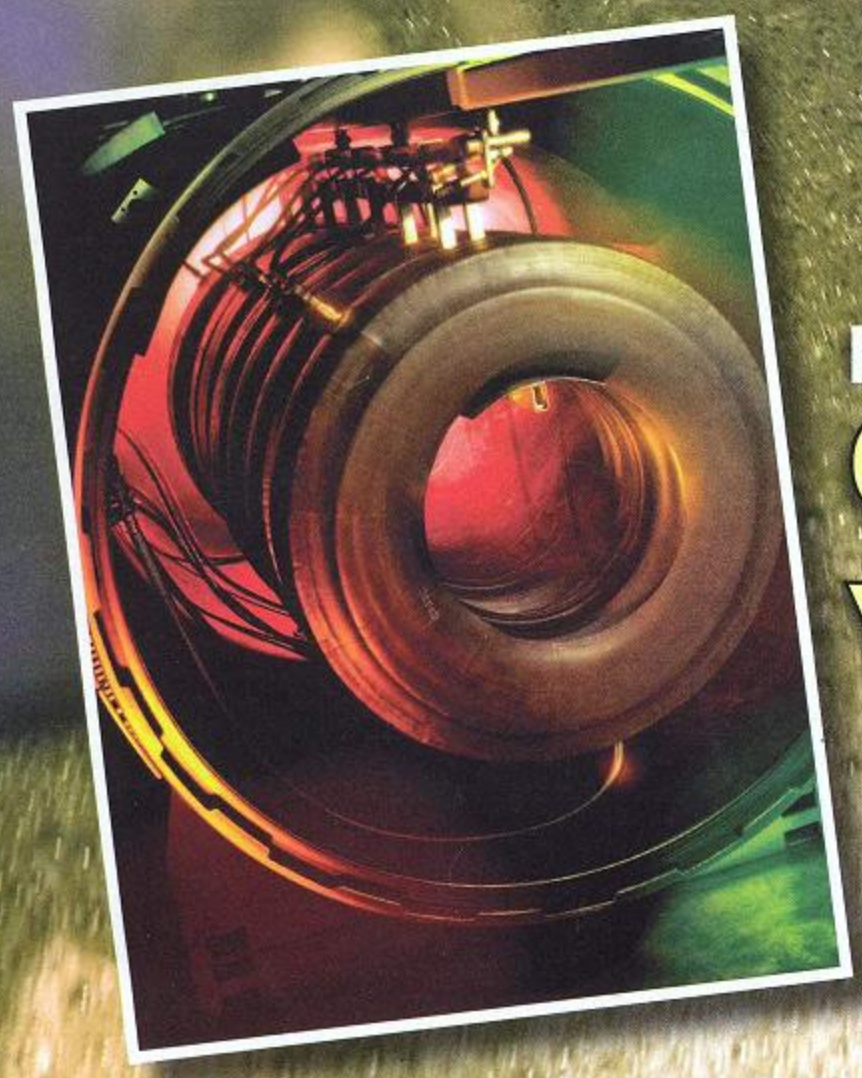
Minérios & Minerales

ANO XXXV - Nº 332 - JULHO 2011 - R$ 10,00

Dedicada à Redução de Custos, Aumento de Produtividade e Manutenção Industrial na Mina e na Planta

FLOTAÇÃO

Imagens 3D facilitam ajustes em tempo real



PNEUS

Quantas vezes é viável a recapagem?

Edição Exposibram terá tiragem recorde de 20 mil exemplares!!!

Novos moinhos com velhos paradigmas

Por Alexis P. Yovanovic*

As operações de moagem representam, com raras exceções, quase 40% do Capex e do Opex de uma usina de beneficiamento mineral e, ainda, quando mal concebidas, podem piorar o desempenho metalúrgico da usina e até duplicar o restante do investimento e dos custos de processamento à jusante (perdas de ultrafinos, maior tamanho da barragem, maior dosagem de reagentes de flotação, baixa taxa de filtragem, etc.).

Pouco conhecimento do minério a ser moído assim como a utilização de conceitos ultrapassados no cálculo tem gerado, nestes últimos anos no Brasil, instalações de moagem geralmente muito aquém das expectativas das mineradoras em relação aos projetos concebidos. A gravidade desta situação tende a piorar, considerando que os novos depósitos em exploração apresentam minérios cada vez mais pobres e de difícil tratamento (há que moer mais toneladas para atingir o teor) e que o custo da energia tem mais do que triplicado nestes últimos 10 anos (hoje acima de 13 centavos de dólar o kWh).

Este trabalho tenta explicar, do ponto de vista do autor, as razões que geram tanta incerteza nos dimensionamentos e, ainda, recomenda soluções concretas para sua mitigação.

Alguns problemas no dimensionamento

Os minérios mais comumente beneficiados no Brasil são secundários (alterados) e ainda, muito heterogêneos na sua distribuição mineralógica. As metodologias globais de dimensionamento comumente utilizadas não são úteis para os minérios muito heterogêneos, onde a característica do fragmento é muito diferente da rocha original que lhe deu origem.

Pela pouca "competência" dos minérios locais para produzir a sua auto-cominuição, entre outros diversos fatores, a implantação de moinhos SAG no Brasil tem resultados controversos. *(Dois trabalhos – SAG: Acabou o Mito? partes 1 e 2 - foram publicados pelo autor na revista Minérios: Nº 290 Set/Out 2006 e Nº 295, Maio 2007).*

Recente publicação da revista Minérios, relativa ao III Workshop de Redução de Custos na Mina e na Planta (Belo Horizonte, nos dias 10 e 11 de maio de 2011) destaca a apresentação da Kinross Paracatu (MG). Os resultados obtidos na implantação do novo circuito de moagem ilustram – a meu ver - o equívoco de ter implantado a moagem SAG em Paracatu (produção quase 40% abaixo do previsto).

Num recente encontro de tratamento de minérios (XXII ENTMME, 20 a 24 de novembro 2007, Ouro Preto, MG), os autores do trabalho relativo à cominuição em Sossego explicaram ao público que, se fosse hoje, não teriam recomendado o moinho SAG, mas sim britadores HPGR em combinação com moinhos convencionais (experiência que fez retirar a opção SAG no projeto de cobre Salobo).

Para a moagem convencional, diversos projetos brasileiros que procuram no teste de Bond (BWi) a solução do seu escalonamento industrial, ficam perplexos ao perceber que "n" testes geram "n" valores muito diferentes de BWi. Qual utilizar? O valor do BWi não era constante segundo Bond?. Vários colegas têm-nos consultado sobre este mesmo assunto e alguns desses casos são citados ao longo deste texto.

O minério e o seu Índice de Consumo de Energia

Relacionando o minério ao equipamento, podemos citar os seguintes testes mais comuns: O teste de Bond para calcular o BWi – Bond Work Índex, em escala de bancada; o teste piloto para determinar o "net-power" em projetos de moagem SAG (atualmente com baixo prestígio, depois de comprovados fracassos no *scale-up* de dezenas de moinhos SAG) e o teste piloto que determina o Wio - Work Índex Operacional, que calcula o índice de consumo energético relacionado a condições operacionais reais, em escala piloto.

Visando a caracterizar a quebra do minério, é utilizado frequentemente o DWT – Drop Weight Test, independentemente do equipamento e das condições operacionais. Este método se baseia na premissa de que as partículas geradas são idênticas à originais (minério homogêneo). Neste texto, iremos falar principalmente do índice de Bond.

O Work Índex de Bond - O Índice de Trabalho, o Work Índex, expressa a resistência de um material a ser britado e moído. São os kWh por tonelada curta requeridos para reduzir um material desde um tamanho teoricamente infinito a um produto 80% menor que 100 µm.

Este índice é uma estimativa do consumo específico de energia a ser aplicado ao moinho para reduzir a granulometria do minério dentro de uma faixa definida. Uma determinada rocha, de índice de dureza Wi, supostamente constante, consome W (kWh/st) para ser reduzida de tamanho F80 para P80. Esta propriedade é obtida em moinhos de laboratório operando em batelada, mas a experiência encontra-se padronizada com a operação de um moinho industrial de 8,0 pés de diâmetro interno, que Bond utilizou para calibrar o seu modelo.

Testes de Wi executados no Brasil apresentam usualmente resultados diferentes, dependendo do F80 de alimentação ao teste, demonstrando nesses casos que haverá diferente consumo de energia dependendo do tamanho dos grãos de ganga dentro do minério.

Nas faixas mais finas o Wi aumenta, pois a quebra acontece nos próprios grãos de ganga e não necessariamente na liberação entre estes e o mineral minério, como ilustrado na Figura 1, que corresponde a uma fotografia digital de minério de itabirito moído seletivamente, onde se mostra

que o tamanho do grão de quartzo é quase quatro vezes maior.

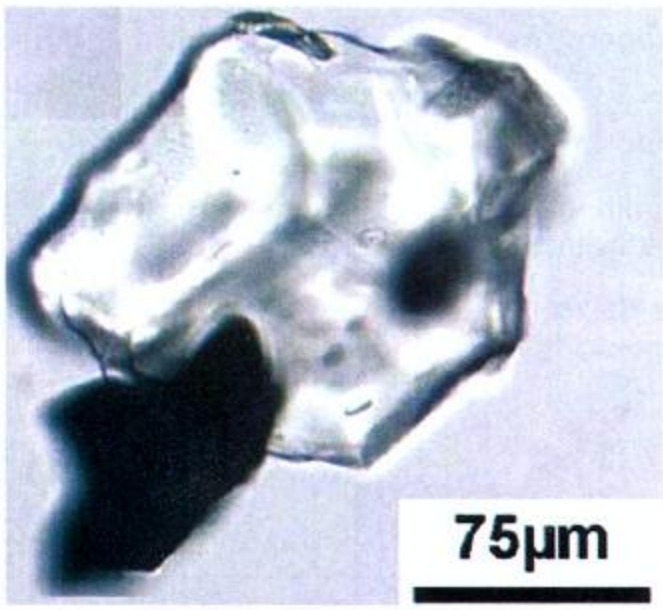


Figura 1 – Fotografia digital de itabirito

Textura da Andesita	Wi (kWh/st)
Grossa	12,82
Média	14,35
Fina	15,24

Tabela 1 - Dureza da Andesita Primária em função da sua matriz (Yovanovic, 1975)

Numa determinada rocha, a condição de dura ou mole é da ganga que dissolve a substância e não da substância em si (como tirar o amendoim de um "pé-de-moleque"). A aplicação de energia é inversamente proporcional ao tamanho dos grãos, se desprendendo mais rápido as partículas de maior grão, como ilustrado na Tabela 1, para minério de "El Teniente".

Como visto nas figuras 2 e 3, extraídas de recentes exemplos no Brasil, o valor de Wi não é uma constante, como estabelecido por F. Bond. Observa-se que o valor de Wi varia conforme muda o valor de F80, contrariando a "Lei de Bond". Assim, para uma operação de moagem mais grosseira, o Wi é mais baixo que para uma moagem secundária, onde o F80 é geralmente menor que 0,5 mm.

Esta variação do Wi com o F80 é apenas um caso dentre diversas outras condições que fazem mudar o Wi, como o enchimento de bolas, a carga circulante, o tipo de moinho e de moagem (AG, SAG, Bolas) e outras variáveis operacionais. O Wio substitui o tradicional BWi, apenas que sem precisar de nenhum fator de escalonamento, pois o teste seria executado em continuidade, em condições operacionais similares às do projeto industrial.

O Work Índex Operacional - O Wio é determinado em teste de operação contínua, e depende tanto da moabilidade do material como da *eficiência* das condições operacionais do moinho e do circuito utilizado. A existência deste tipo de índice já fala por si só: que as operações de moagem podem ser otimizadas, e isto acontece porque o BWi é determinado em condições padrão, definidas por Bond, não necessariamente otimizadas. Por exemplo, mudanças em nível de enchimento, velocidade de rotação e % de carga circulante (inclusive circuitos abertos), podem conduzir a menores valores de Wio, particularmente quando são aproveitadas as características dos componentes em materiais heterogêneos.

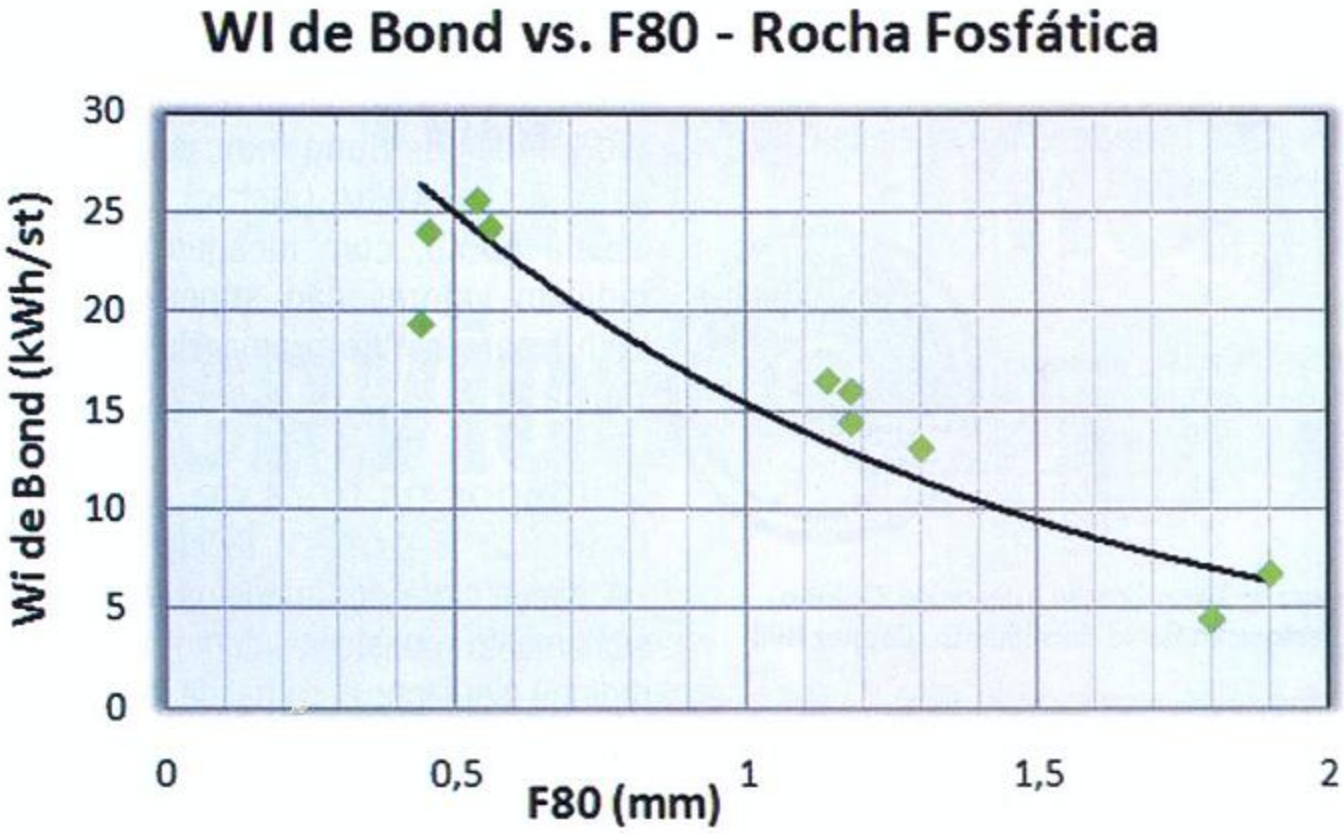


Figura 2 – Variação do Wi de Bond de acordo com o F80 para recente projeto de Fosfato

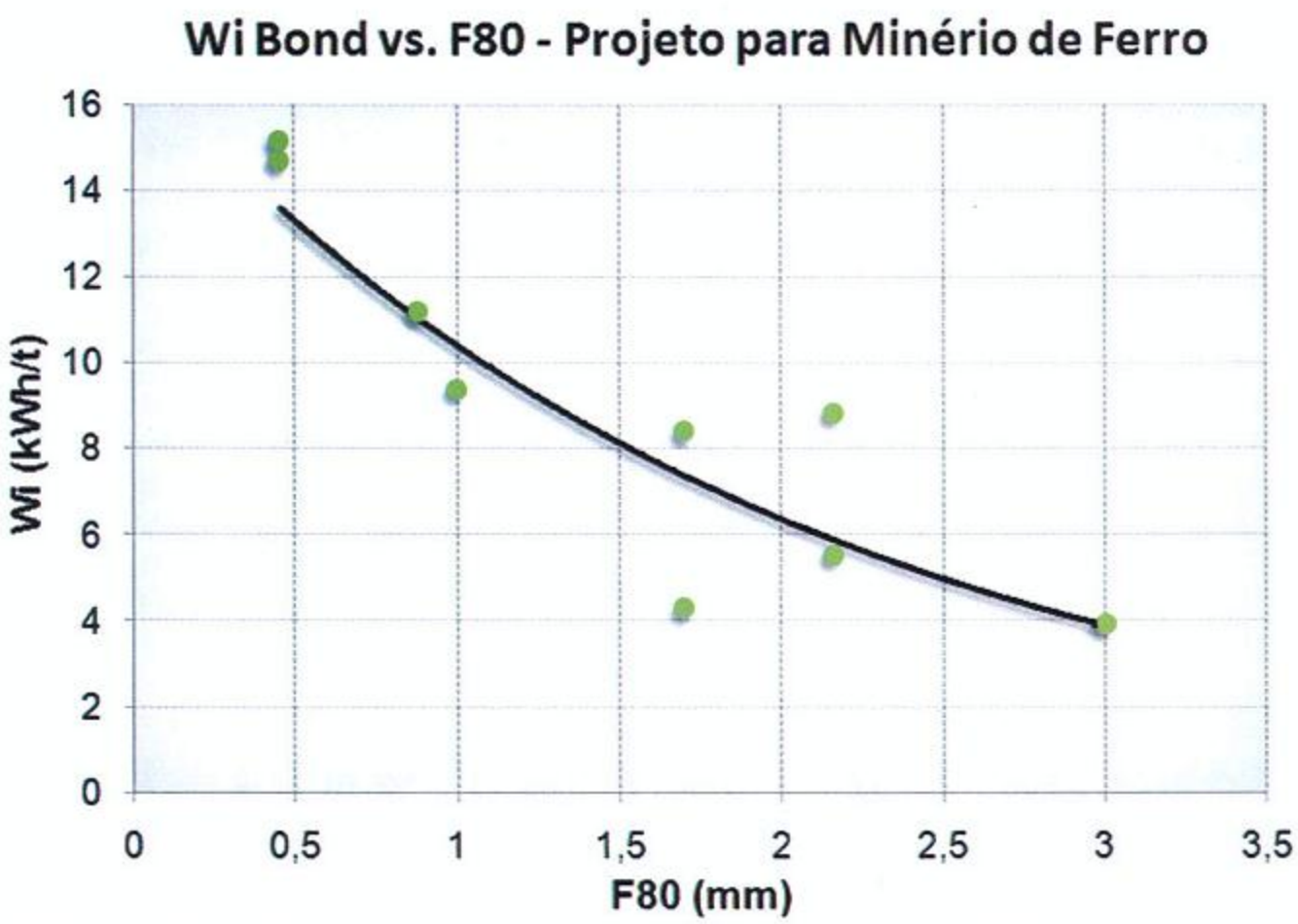


Figura 3 – Variação do Wi de Bond de acordo com o F80 para projeto de minério de Ferro

Problemas do escalonamento industrial

As dificuldades do modelo de Bond para dimensionar moinhos de diferentes tamanhos ou condições operacionais foram compensadas (apenas para minérios homogêneos e condições padrão de moagem) por Rowland C. (1980). Esse

autor criou uma série de fatores de correção, chamados: fatores de "eficiência", os quais também estão hoje fora da realidade.

Na prática, ao mudar as condições de Bond (referidas a circuito fechado com ciclones, com 250% de carga circulante e elevado enchimento de bolas), podemos observar que existem condições operacionais que poderiam incrementar ou reduzir significativamente o consumo específico de energia, e isso poderia ser observado em laboratório se fosse executado o teste piloto relativo ao Wio (Work Índex Operacional). Por exemplo, em recente teste industrial para minério de Ouro, em moinho de 11,5' x 11,5', ao reduzir a carga de bolas (de 40 para 30%) e a carga circulante, o Wio do minério caiu de 15,52 para 12,7 kWh/t.

Na Figura 4 se ilustra, em números estimados pela experiência do autor, a diferença de consumo esperado na escala industrial a partir de um determinado valor de BWi. Ao contrário do postulado por todos os modelos mais conhecidos, o circuito aberto de moagem é o mais eficiente energeticamente e, ainda, o que produz maior seletividade no produto final.

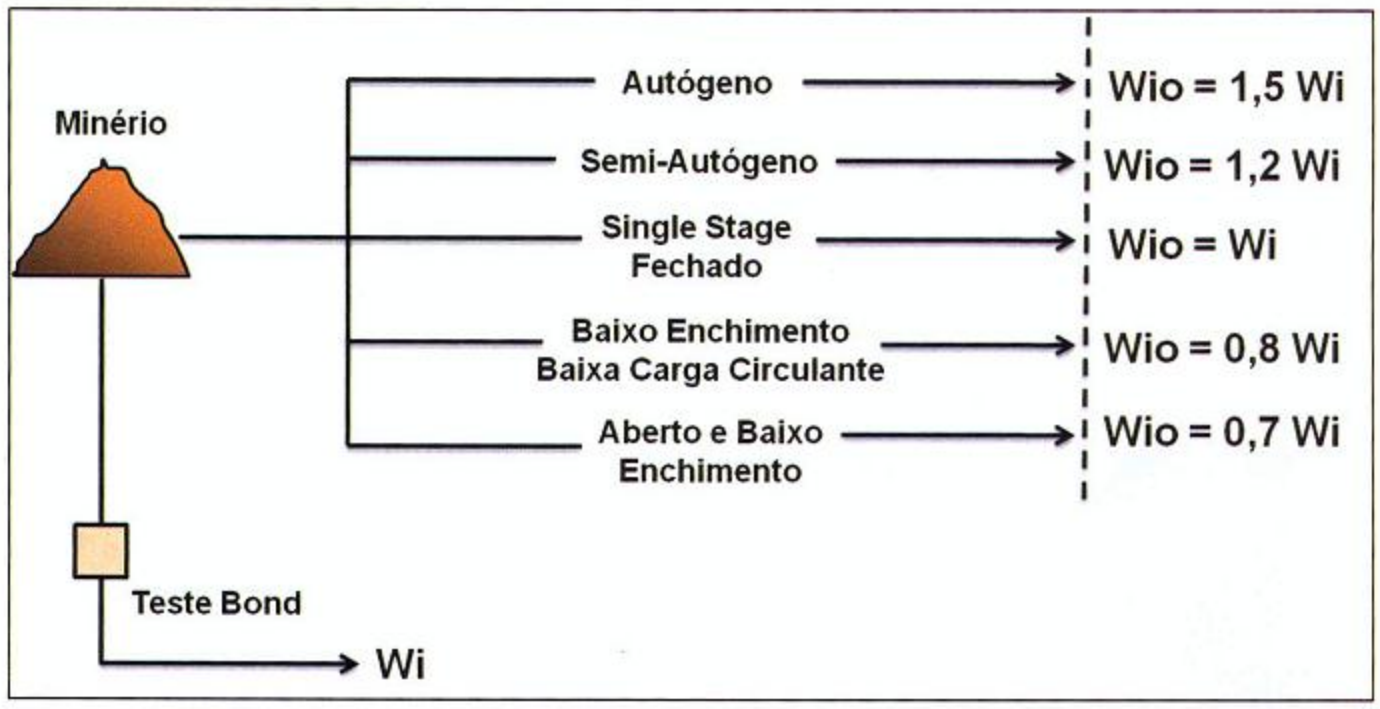


Figura 4 – Exemplos de *scale-up* de energia específica na moagem

Moagem seletiva e pré-concentração

No caso acontecido na usina de Copperhill (Tennessee Copper Co., EUA) o moinho de bolas de 7 x 10 pés, após muitos anos de operação em circuito fechado, teve a sua carga de bolas reduzida de 45 para 29% em volume, colocando em evidência o mecanismo de classificação interna e a seletividade na moagem, comprovando a viabilidade de operar em circuito aberto e, junto com isso, inúmeros outros "paradigmas" da moagem foram derrubados.

Devido à maior gravidade específica do mineral minério, em geral (sulfetos, hematita, etc.), em comparação com a ganga, o primeiro afunda no moinho sendo preferencialmente atingido pelos corpos moedores. A ganga, mais leve, mesmo grosseira, avança no fluxo de polpa, dentro do moinho, e é descarregada quase sem sofrer ações de cominuição.

Operações industriais que moem normalmente materiais constituídos por diferentes espécies minerais, com diferentes gravidades específicas, produzem diferentes curvas: % passante vs. mesh, para cada substância.

Os minérios mais pesados são moídos mais finamente (sulfetos, por exemplo).

Ao atingir o tamanho de liberação definido pelos métodos convencionais (P80), muito minério já foi moído mais que o necessário (*overgrinding*). O efeito é ilustrado na Figura 5.

%+65#	%-200#	%sólidos	
6,5	51,7	46,2	
20,4	24,5	63,5	10"
28,1	19,3	70,9	10"
30,4	19,7	71,1	10"
-	-	~75,0	

Figura 5 - Classificação Interna do Moinho Aberto, com Baixo Enchimento (Copper Hill)

Geralmente a moagem não é uma questão de atingir um determinado P80 para todo o fluxo, mas de liberar o mineral minério da sua ganga.

O autor testou a moagem seletiva para diversos tipos de minério, com excelentes resultados (Fundação Gorceix, Ouro Preto). Junto com a redução drástica no consumo de energia, o processo permitiu o descarte de uma boa parcela de ganga grosseira (entre 15 a 35%, dependendo do teor do minério). Minérios pobres precisam de mais pré-concentração.

No caso de recente projeto para minério de ferro de baixo teor, embora o Work Índex de Bond indicasse valores entre 7 a 12 kWh/t (metric), testes em escala piloto, com moagem seletiva, indicam valores não superiores a 4 kWh/t para o Wio, como ilustrado na Tabela 2.

Cuidados na hora de calcular a potência do motor

A maior parte dos modelos de dimensionamento considera como carga do moinho somente a carga de bolas, esquecendo o peso da polpa de minério. Isso é válido na prática para enchimento de corpos moedores acima de 35%, mas envolve sérios erros de dimensionamento para operações com enchimento inferior a 30%.

Em recente projeto para minério de ferro, onde o moinho iria operar com 20% de bolas, pela fórmula de três fabricantes globais a potência do motor teria sido sub-dimensionada, como ilustrado na Tabela 3.

TESTE (nome)	TAXA (Kg/h)	F80 (mm)	P80 (µm)	Wio (kWh/t)	Consumo Específico (kWh/t)
OC	1000	3,0	212	2,59	1,31
OC	800	3,0	202	3,13	1,63
OC	605	3,0	189	3,96	2,16
Teste Final	507	2,8	125	3,84	2,71

Tabela 2 – Testes de Wio em moagem seletiva (OC – Open Circuit), FG – Ouro Preto

POTÊNCIA APLICADA AO PINHÃO MOINHOS EXEMPLO	
METODOLOGIA UTILIZADA	kW, net
FABRICANTE 1	6.805
FABRICANTE 2	7.570
FABRICANTE 3	7.340
MODELO OPERACIONAL	8.867
MOLYCOP	8.761

Tabela 3 – Exemplo de cálculo de potência do motor

Excetuando a Mope (Modelo Operacional), apenas a metodologia da MolyCop (Jaime Sepúlveda) considera a polpa no cálculo da densidade de carga no moinho. O projeto adotou o valor recomendado pela Mope, depois de discussões com os fabricantes envolvidos.

Como melhorar a moagem

Mesmo com o seu moinho já dimensionado e funcionando ainda é possível conseguir significativas melhorias, como aumento de taxa, redução de energia e de corpos moedores. Nas Tabelas 4 e 5 se apresenta alguns resultados industriais.

ITEM	ABERTO	FECHADO*
Nível de Enchimento (% Vol)	22%	35 – 40 %
Produto – 208 µm	82,40%	80%
Consumo de Bolas (g/ton)	653	759
Consumo de Liners (g/ton)	44	66
Consumo Específico (kWh/ton)	7,9	10,2

Tabela 4 – Usina de Kirkeness, média de 5 anos de operação (Ferro, Noruega)

Item	Aberto	Fechado
Carga de Bolas (t)	35	55
Nível de Enchimento (% Vol)	29%	45%
Produção (t/dia)	2.250	2.130
Potencia Aplicada (HP)	370	490
Consumo de Bolas (lb/t)	0,84	1,02
Moagem Sulfetos – 200#	**65%**	**62%**
Moagem Ganga – 200#	**35%**	**40%**
Rejeito Flotação (% Cu)	0,068	0,08
Coletor (lb/t)	0,28	0,34

Tabela 5 – Usina de Copper Hill (Cobre, EUA)

Potencia, MW	PROJETO	REV. MOPE	OTIMIZAÇÃO
Primária	15,4	3,4	3,0
Secundária	4,9	8,0	0
TOTAL	20,3	11,4	3,0

Tabela 6 – Projeto Itabiritos Pobres, Brasil (revisado pela Mope)

Outros exemplos:

Projeto recente de itabiritos pobres considerava quatro moinhos primários e um secundário, de acordo com o BWi, em circunstância que, ao revisar os cálculos pelo método do Work Índex Operacional (em planta piloto), comprovou-se que era necessário apenas um moinho primário e dois moinhos secundários. Um estudo de moagem seletiva veio a mostrar que nem era necessária a moagem secundária, reduzindo o total para apenas um único moinho.

Projeto Pedra de Ferro, onde os cinco moinhos primários do projeto original (BWi)) foram reduzidos para apenas dois, e ainda de menor tamanho (Wio e moagem seletiva). O projeto ganhou o prêmio Excelência da Revista Minérios, em 2009.

Para moinho SAG já em operação, ainda poderia haver alguma medida mitigadora: transforme-o num grande moinho de bolas primário, inclusive em overflow (arranque a grelha), operando de forma seletiva (20% de enchimento e circuito aberto); experimente peneirar e descartar alguma ganga grosseira; opere os moinhos secundários também de forma seletiva, com baixo enchimento e em circuito aberto. Se a moagem em circuito fechado for imprescindível, pelo menos ajuste o APEX dos ciclones e reduza ao mínimo a carga circulante.

Conclusões e recomendações

SAG – Não serve para minérios heterogêneos na nossa opinião. Com os altos valores da energia, em breve serão preteridos também nos minérios primários do Chile e Peru, provavelmente substituídos por HPGR + Bolas.

Execute os testes de moagem convencional em escala piloto contínua e determine o Wio. O Wi de Bond não serve para a grande maioria dos minérios brasileiros.

Conheça melhor o seu minério. Teste a quebra em britador de impacto e observe a granuloquímica da descarga. Desconfie de testes em batelada com amostras minúsculas, reduzidas abaixo de 2 mm, como é feito na maioria das vezes.

Faça o teste nas condições mais seletivas possíveis (circuito aberto e baixo enchimento);

Tente a pré-concentração – examine a granuloquímica do fluxo de descarga do moinho, operando em forma seletiva, e verifique essa possibilidade.

Um bom dimensionamento de moagem, seguido de pré-concentração, pode trazer reduções entre 30 a 40% do CAPEX e do OPEX geral de uma usina de beneficiamento. Temos experiência comprovada nisso.

Acredite na indústria nacional. Moinhos de até 21 pés já são fabricados no Brasil.

Nos projetos de curta vida útil, os moinhos (e em geral os equipamentos de mineração) são um ativo da empresa, mesmo depois de exaurida a jazida. Esse ativo vale muito mais se o equipamento for de tamanho padronizado, nacional e de fácil adaptação em novos projetos. Dois excelentes moinhos da Caraíba (dos quatro originais) estão hoje funcionando em Timbopeba (Vale) e o outro na RPM (Kinross). O mercado de equipamentos usados vai crescer significativamente nos próximos anos.

Faça uma re-avaliação do seu projeto ou da sua usina. Nunca é tarde para isso!

Mude o antigo paradigma de ser "conservador" e de fazer o que tradicionalmente outros fazem. Seja um dos primeiros em fugir dos erros aqui apresentados ao invés de ser um dos últimos a cair neste tipo de armadilha tecnológica, nutrida pela nossa própria insegurança.

*Alexis P. Yovanovic, diretor da Modelo Operacional - Mope