



O Paradigma do Circuito Fechado de Moagem

(do livro: Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares, A. Yovanovic, 2006)

Introdução

A utilização de circuitos fechados de moagem é comumente aceita e é produto de uma tradição da própria determinação dos parâmetros energéticos do modelo de Bond. O fechamento do circuito encontra, como única justificativa, uma tabela utilizada por fabricantes de equipamentos, que define fatores de ineficiência dos circuitos que pretendem ser projetados para operar em aberto. Por exemplo, este fator aumenta arbitrariamente em 20% o consumo específico de energia possível de obter em moinhos operando em circuito aberto, em comparação com o circuito fechado, quando a referência de controle granulométrico é baseada em P80 (80% de partículas abaixo do tamanho P), sem levar em consideração o nível de enchimento de corpos moedores e, o mais importante, sem considerar as condições de liberação da substância de interesse no produto, comprovadamente melhores para a moagem em circuito aberto.

Após uma operação bem sucedida de moagem em circuito aberto, cinquenta anos atrás (1953), os consultores F.C. Lendrum e G. Pare, da Ascot Metals Corp., na mesma data comemoram o fato e comentam o seguinte: (sic) ..."a long way to free the ball mill from its present convicts status".

CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

Para uma melhor compreensão da diferença de capacidade de produção entre ambos os sistemas foi preparada a **Tabela 01** a seguir, a qual é útil apenas para fins qualitativos. Como indicado na Tabela 01, a capacidade de produção é fortemente dependente do nível de enchimento de corpos moedores. Em geral, tem-se observado que a capacidade de produção atinge para cada situação específica (tipo de minério, corpo moedor, etc.) um determinado valor máximo a partir do qual o excesso de enchimento produz uma redução na capacidade de produção, com base num determinado valor de P80. A Tabela define aproximadamente estas faixas.

Tabela 01 – Capacidade Relativa de Produção em Moinhos de Bolas

ENCHIMENTO (% Vol.)	FECHADO	ABERTO	OBSERVAÇÕES
16 a 25%	x ton/hora	x ton/hora	Não se justifica fechar o circuito
25 a 40%	$y > x$ ton/hora	(1) y ton/hora (2) $< y$	P80A > P80F P80A = P80F
> 40%	$z < y$ ton/hora	Não funciona	Sistema ineficiente

A opção mais utilizada está na faixa de 25 até 40% de enchimento. Como veremos ao longo deste artigo, mesmo resultando em um P80A um pouco superior ao observado para circuito fechado (P80F), o circuito aberto consegue igual ou até melhor **grau de liberação**, que é o que realmente interessa nessa operação.

Dependendo de condições próprias do minério, da operação e de características mecânicas do moinho, o **MODELO OPERACIONAL** demonstra que existe um ponto ótimo para o nível de enchimento de bolas. Um caso específico industrial foi simulado no computador e representado graficamente na **Figura 01** abaixo. Outras simulações para diferentes minérios, condições operacionais e tamanhos de moinhos, concluem que o valor ótimo de enchimento encontra-se normalmente na faixa de 16 a 25%, para o mínimo consumo específico de energia.

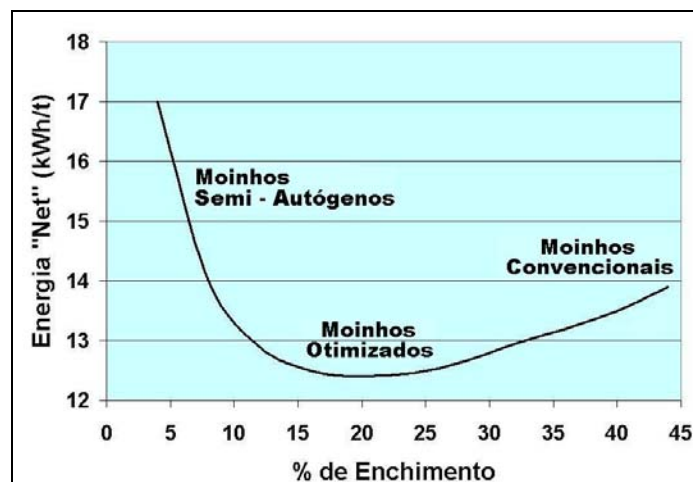


Figura 01 – Nível Ótimo de Enchimento de Bolas

Pesquisadores japoneses concluem que o valor ótimo de enchimento fica em torno de 40% para a máxima capacidade do moinho. **Austin** afirma, com base em experiências de pequena escala, que apesar de existir uma capacidade máxima de moagem na faixa de 40-45% de enchimento, o consumo específico de energia atinge um mínimo na faixa de 15-20%. Esta afirmação, baseada em observações práticas, é confirmada matematicamente, pela primeira vez, pelo Modelo Operacional.

Na Alemanha a prática normal considera um enchimento médio de 22 a 30%, enquanto nos Estados Unidos o valor médio observado é próximo de 36%. **Maurício R. Drumond** relata experiência pessoal reduzindo a carga de bolas de 33 para 23%, sem perda no P80 do produto nem da capacidade de produção, poupando 3,0 kWh/t de consumo específico e reduzindo o make-up de bolas de 1.200 para 800 g/ton.

OPERAÇÃO DE MOINHOS EM CIRCUITO ABERTO

Como veremos a seguir, para atingir os objetivos necessários de liberação do processo, a moagem em circuito aberto não apresenta problemas de capacidade de produção; além disso, o circuito aberto apresenta menor investimento, menor custo de operação e, comprovadamente, melhores resultados metalúrgicos na operação de separação/concentração que se segue. Recentemente, experiências de moagem com minérios com alta presença de micas (Brasil, 2002) mostraram não apenas a viabilidade técnica de operar em circuito aberto de moagem, mas também a absurda recirculação do material micáceo produzida pelo circuito fechado.

Na **Tabela 02** são resumidas as informações obtidas para dois casos industriais de operação em Circuito Aberto.

Tabela 02 – Experiências Industriais de Moagem em Circuito Aberto

CASO 1 – Copperhill (Cobre), Tennessee Copper Co., EEUU. (Moinho de Bolas de 7' x 10')

Item	(ABERTO)	(FECHADO)
Carga de Bolas, tons	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 mesh	65 %	62 %
Moagem Ganga - 200 mesh	35 %	40 %
Rejeito Flotação: Cobre	0,068 %	0,08 %
Enxofre	2,5 %	4,0 %
Coletor (Ethyl Xantato) lb/t	0,28	0,34

CASO 2 – A/S Sydvaranger (Magnetita), Kirkenes, Noruega. (Moinho de Bolas de 21' x 32')

Item	ABERTO	OUTROS MOINHOS DA USINA (CIRCUITO FECHADO)
Nível de Enchimento, % Vol.	22 %	35-40 %
Produto - 208 micras	82,4 %	80 %
Consumo de Bolas, g/t	653	759
Consumo de Liners, g/t	44	66
Consumo Específico, kWh/t	7,9	10,22

Como observado nas rotinas de cálculo do Modelo Operacional de Moagem, pelos dados mostrados na Tabela 02, além de ficar demonstrada a viabilidade prática de operar moinhos em circuito aberto, naquela faixa de enchimento (22 a 29%), fica comprovada a melhor eficiência energética naquela zona de enchimento.

Para o **CASO 1** os resultados são surpreendentes, e não apenas são comprovadas as teses defendidas pelo Modelo Operacional (circuito aberto com baixo enchimento), mas foram também aumentadas a taxa de produção, a liberação de sulfetos e a recuperação do processo de flotação posterior. No **CASO 2**, os dados mostrados na Tabela 02 apresentam uma clara vantagem do circuito aberto de moagem, cujos resultados correspondem a 05 (cinco) anos continuados de operação e comparação.

CLASSIFICAÇÃO INTERNA DO MOINHO

O Modelo Operacional considera, nas suas rotinas de cálculo, o sub mecanismo de classificação interna, mediante a sedimentação das partículas mais grossas e pesadas no fundo do moinho. Esse mecanismo é prejudicado quando o circuito é fechado, pois ele reduz o tempo de residência das partículas novas dentro do moinho. Além disso, aumenta a viscosidade da polpa.

Por outro lado, no circuito aberto, o mecanismo de classificação interna (IMC - In Mill Classification) é prejudicado pelo alto enchimento de corpos moedores, aumentando o refugo de partículas de tamanho indesejado.

Myers, J.F. discute com detalhes esse sub mecanismo (IMC) e, com ajuda dos técnicos da empresa Copperhill (**CASO 1**) estuda o comportamento da polpa em camadas de 10 polegadas de profundidade, num corte transversal interno do moinho situado a 3 pés da boca de descarga, mais ou menos na metade do moinho. O moinho de Copperhill, operando a 63% de sólidos, produz um espessamento próximo de 75% na “zona de moagem”, definida pelo Modelo Operacional como a fração de volume mais profunda, cuja densidade se aproxima do teor de saturação da polpa, ou seja, próximo do valor observado no underflow do ciclone, como ilustrado na **Figura 02**. **H. Hardinge**, Presidente da Hardinge Co., comenta que a gravidade específica do minério de Copperhill é de 4,2, que em relação à água equivale a 3,2. A velocidade de decantação numa polpa diluída (63% sólidos) produz o efeito ilustrado na Figura 02.

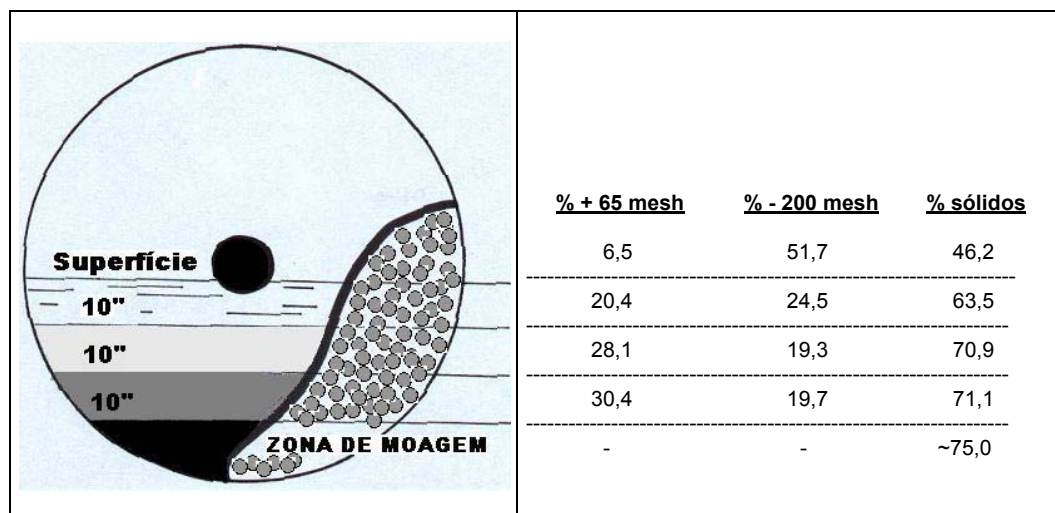


Figura 02 – Classificação Interna do Moinho Aberto, com Baixo Enchimento

J.F. Myers complementa os resultados com os seguintes comentários:

- ❑ 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.
- ❑ Ao atingir o tamanho de liberação definido pelos métodos convencionais (P80), muito minério já foi moído mais que o necessário (overgrinding).
- ❑ A diluição da polpa que alimenta o moinho é fundamental para produzir a classificação interna. Numa certa faixa de diluição não se observam perdas de capacidade, ou seja, a “zona de moagem” mantém a sua alta densidade. Myers testou, com bons resultados, diluições próximas de 35% de sólidos na alimentação.



Para o **CASO 2, Forsund, B. e outros** estudaram a operação do moinho a partir de 40% de enchimento, reduzindo-o gradativamente até atingir o valor ótimo em 22%, como mostrado na Tabela 02. Ficou demonstrado o funcionamento da classificação interna, produzindo uma moagem inclusive mais fina que a produzida pelos moinhos convencionais operando em circuito fechado. O moinho Sydvaranger operou com 65-68% de sólidos, valor este que, na visão do Modelo Operacional, ainda poderia ser reduzido em benefício do processo.

Como Melhorar a Classificação Interna

Diversos estudos internos desenvolvidos por **Yovanovic**, sobre a otimização da moagem via manipulação da reologia da polpa, cujos sub mecanismos são considerados pelo Modelo Operacional, concluem que:

- A moagem em circuito aberto com baixo enchimento apresenta as melhores condições reológicas para o sistema;
- No interior do moinho a polpa atinge maior temperatura no circuito aberto que no circuito fechado. A carga circulante resfria o interior do moinho, jogando calor fora do sistema, no ambiente e tubulações de recirculação;
- Nas mesmas condições de densidade (% de sólidos) e de temperatura, a polpa “suja” com carga circulante possui maior viscosidade que a polpa nova. Este conceito é muito importante, também, para as operações de hidrociclonação;
- Em processos que alimentam a operação de flotação é de muita conveniência a adição antecipada de reagentes, inclusive de espumante, que para o circuito aberto apresenta grande utilidade. Além do melhor condicionamento, aproveitando o moinho como reator e da redução do efeito de oxidação da superfície de determinadas partículas, que reduz a adsorção do coletor, esta nova condição incrementa o gradiente de separação hidráulica aproveitando a hidrofobia de determinadas partículas coletadas, evitando o excesso de moagem de partículas já liberadas;
- Outros reagentes específicos podem ser adicionados como depressores e os chamados “ajuda à moagem”, que colaboram em reduzir a viscosidade da polpa e em aumentar o espessamento na “zona de moagem”;
- Em circuitos alcalinos a reação exotérmica devido à hidratação da Cal [$\text{CaO} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$] pode ser aproveitada adicionando diretamente a Cal granulada dentro do moinho.

NIVEL DE ENCHIMENTO E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

Diferentes cargas de bolas (níveis de enchimento) precisam diferentes velocidades de rotação, diz **Runting S. Crocker**, Mill Superintendent, Lake Shore Mines Ltd.. Para o **CASO 1** a velocidade de rotação corresponde a 63% da velocidade crítica, o qual não era conveniente para o alto enchimento original, de 45% de bolas. Na empresa Lake Shore, operando os moinhos a 81% da velocidade crítica, tentou-se a redução do nível de enchimento, reduzindo o consumo específico de energia, mas a capacidade de produção ficou comprometida, o que levou a R.S. Crocker a afirmar que o caso de Copperhill aconteceria apenas para baixas velocidades de rotação.

Concorda com esta opinião o engenheiro **L.E. Djinghenzian**, do Departamento de Minas, Ottawa, Canadá. Por outro lado, o Professor da Universidade de Alabama **Adrian Dorenfeld**, complementado pelo consultor canadense **H.E.T. Haultain**, chamam a atenção para o benéfico efeito cascata (e não de catarata) observado junto com o baixo enchimento e a baixa velocidade de rotação do moinho.

H. Hardinge agrega que, ao reduzir a carga de bolas aumenta o número de ciclos (golpes) por revolução; o Modelo Operacional considera esse fato na determinação do Índice de Cominuição, que é a propriedade macrofenomenológica introduzida pelo modelo, como 1ª Lei, para as operações de moagem. Hardinge exemplifica esse fato comentando que, para 50% de enchimento, as bolas dão 2 golpes para cada revolução do moinho; mas, para 25% de enchimento, elas dão 4 golpes por cada revolução. Ao reduzir o enchimento as bolas começam a operar apenas na zona de maior densidade de polpa, onde se encontram as partículas mais grossas e pesadas (zona de moagem), ou seja, aquelas que realmente precisam ser cominuídas. A moagem concentrada nesta zona produz uma ação mais efetiva, reduzindo o excesso de moagem (overgrinding), os contatos bola/bola e o consumo de bolas.

O consultor **J.F. Myers** comenta, ainda sobre o **CASO 1**, que a maior eficiência do baixo enchimento é demonstrada claramente com o 20% de menor consumo de bolas observado em Copperhill. Myers atribui menor eficiência ao processo quando aumenta o diâmetro do moinho, fato confirmado nas rotinas de cálculo do Modelo Operacional. Brincando com o tema ele afirma que um moinho de 100 pés de diâmetro não moeria nem ovos. A potência é transferida do casco até as bolas, caindo esta transferência gradativamente entre as camadas de bolas. Segundo **F. Bond**, a primeira camada recebe 15% da potência, depois, vai passando apenas 10% dessa energia para a camada seguinte, etc. Ou seja, poucas camadas de bolas são eficientes e, dependendo do diâmetro delas, se atinge um limite de diâmetro para o moinho. Isso confirma o fato de que, para o **CASO 2**, com diâmetro bem superior (21 pés), o ponto ótimo de enchimento ficou mais baixo (22%). Obviamente existem também outros fatores que justificam a diferença, como o tipo de minério, entre ambos os casos.

O engenheiro **D.H. Fairchild**, Tucson, Arizona, define 3 zonas de moagem dentro do moinho, uma de cascata (ou catarata, dependendo de diversos fatores), outra mais no fundo, de compressão e outra intermediária chamada de zona morta, totalmente ineficiente, que apenas ocorre em moinhos com alto enchimento. Fairchild comenta que, anos atrás, observou efeito similar ao de Copperhill operando dois moinhos da sua usina (Tucson), um deles com 24 tons de bolas e outro com 11 a 14 tons, apresentando este último maior capacidade de produto terminado (resultado similar ao obtido por M.R. Drumond. Fairchild lamenta não ter registrado devidamente essa experiência pela falta de elementos de medida e de controle na época do teste.

Em outro estudo, ainda sobre o **CASO 1**, **J.F. Myers** agrega os seguintes comentários sobre a operação em cascata:



- É esperado um 30% de redução do consumo específico de energia para valores otimizados de enchimento.
- Os lifters utilizados nos liners não devem ultrapassar o diâmetro das bolas de reposição, para manter o efeito cascata e evitar saltos de bolas, que reduziriam a capacidade do moinho.
- A faixa ótima de velocidade de rotação dos moinhos, para essa operação, fica entre 58 a 64% da velocidade crítica. O Modelo Operacional deduz, das suas rotinas de cálculo, que o valor de consumo específico de energia atinge o mínimo para 58% da velocidade crítica, para uma ampla faixa de diâmetros simulados; obviamente com menor capacidade de produção frente a moinhos com maior velocidade, de modo que, normalmente, outras considerações de processo e de custo recomendam a utilização de velocidades um pouco superiores, desde que não se perca o efeito cascata.

LIBERAÇÃO PARA FLOTAÇÃO

Examinando o **CASO 1, Bunting S. Crocker**, da Lake Shore Mines Ltd., comenta que a ganga de Copperhill constitui mais de 60% da massa alimentada ao moinho e essa fração resultou menos moída na situação atual (35% contra 40% - 200 mesh - ver Tabela 02). Ou seja, o moinho não mói mais, apenas proporciona uma cominuição preferencial aos sulfetos. **E.H. Crabtree**, Director of Milling, Eagle Picher Co., comenta que, devido à maior liberação dos sulfetos e, em paralelo, ao tamanho mais grosso da ganga, mais Cobre é flotado com menor quantidade de reagentes. Anteriormente, em 1950, **Jack Myers** tinha detectado uma queda de potencial químico na polpa de 0,26 v entre o casco do moinho e a carga de bolas, no mesmo moinho de Copperhill, quando esse operava com alto enchimento. Em 1953 o próprio Myers observa, na nova condição de baixo enchimento, uma menor corrosão (menor consumo de bolas, menor concentração de ferro em solução) e, portanto, um menor consumo de Xantato e maior recuperação de sulfetos nessa nova condição.

F.C. Lendrum e G. Pare, da Ascot Metals Corp, Quebec, comemoram e comentam o fato acreditando ser o início de: (sic) "...a long way to the free the ball mill from its present convicts status", e que constitui o objetivo do Modelo Operacional e do presente artigo, após 50 anos desse comentário. Lendrum e Pare confirmam, mediante experiência pessoal, que a cominuição produzida na "zona de moagem", com baixo enchimento, libera as partículas sulfetadas no maior tamanho possível, o que é ótimo para o processo.

J.F. Myers, baseado nos resultados mostrados em Figura 02, após avaliar as curvas granulométricas do produto da moagem em circuito aberto, com baixo enchimento, e comparando com o produto do sistema fechado convencional, de alto enchimento, conclui que, devido ao "fator de depressão" (definido por Myers para mostrar a diferença de moagem entre a ganga e o minério), o sistema de classificação interna de Copperhill apresenta uma adequada liberação a 140 micras, contra 112 micras requeridas pelo sistema fechado convencional.



Este aspecto é muito importante, como indicado em Tabela 01, onde o moinho operando em circuito aberto, processando y t/hora (a mesma capacidade do circuito fechado), pode produzir a mesma liberação do minério para um P80 superior, confirmando que **a operação de moagem nem sempre deve ser avaliada como um compromisso de obter um determinado P80, mas de liberação em geral**. J.F. Myers comenta que o sistema de operação em cascata, com classificação interna, reduz o mecanismo de oxidação no circuito de moagem melhorando a recuperação e o teor do concentrado. Myers recomenda especialmente essa moagem para minérios de fácil oxidação, como alguns sulfetos de Cobre. Outros Autores acrescentam que:

- **Para um minério heterogêneo é de esperar, também, que componentes provenientes de diferentes partes da jazida possuam diferentes características de liberação.** O circuito de moagem, quando erradamente é controlado apenas pelo tamanho do produto (P80), e não pela liberação, não responde a essas mudanças de minério (**Malghan, S.G.**, 1986, e **Mc Ivor, R.E. e Finch, J. A.**, 1991).
- Os testes de laboratório são normalmente executados com amostras moídas em moinhos do tipo batch, de modo que a liberação do íon ferro a partir dos corpos moedores é diferente na usina, dependendo do revestimento do moinho, meio de moagem e de outros fatores. Além disso, como o moinho de laboratório é fechado, não acontece uma suficiente aeração na polpa. Esses fatores possuem um profundo efeito sobre as condições físico-químicas da polpa, especialmente nos sulfetos, que consomem grandes quantidades de oxigênio (**Suttill, K.R.**, 1990).

A moagem em circuito fechado é mais um mito tecnológico da mineração.

Alexis P. Yovanovic