

## MOPE E A QUEBRA DE PARADIGMAS

# Circuito Aberto: Moer menos é mais!



---

### RESUMO

*Apresentam-se os resultados de testes piloto com moagem seletiva, que consiste na operação de moinho em circuito aberto e com baixo enchimento de bolas. No caso aqui descrito, foram realizados testes de moagem e de flotação com minério sulfetado, comparando os resultados provenientes da moagem seletiva com os da moagem convencional (circuito fechado com ciclones), para o mesmo P80 de moagem. A moagem seletiva mói com maior qualidade (distribuição granuloquímica) e gera maior liberação, permitindo aumentar a seletividade da flotação, incrementando o desempenho metalúrgico, além de reduzir significativamente os custos de operação do moinho (a potência aplicada ao moinho cairia em 20% do seu valor atual). A redução do OPEX e o acréscimo de recuperação metalúrgica apresentaram um ganho líquido conjunto próximo a US\$13.000/ano por cada tonelada/hora de minério processado na usina.*

---

### ABSTRACT

*Here are presented the results of pilot tests using selective grinding, a procedure that consists on the operation of open grinding with low ball filling. In the case described here, grinding and flotation tests were performed with sulfide ore, comparing the results from the selective grinding with the ones from the conventional grinding (closed circuit with cyclones), for the same P80. The selective grinding gives a product with better quality (granulochemical distribution) and generates a more liberated material, allowing an increase in the selectivity of the flotation process, enhancing the metallurgical recovery and reducing, significantly, the mill's operational costs. The reduction in the OPEX and the increase of metallurgical recovery present a net joint gain close to US\$13.000/year for each t/hour of processed ore in the plant.*

## 1. INTRODUÇÃO

A **moagem seletiva** é um procedimento operacional estudado e defendido pela MOPE, com base nas teorias do Modelo Operacional e, ainda, com suporte industrial baseado em poucas, mas bem sucedidas experiências industriais ao redor do mundo.

O moinho, com baixo enchimento de bolas e operando em circuito aberto, permite que, dentro dele, haja sedimentação das partículas mais pesadas (ex. sulfetos) e/ou de maior tamanho (mistos grossos). Estas partículas sedimentam no fundo do moinho e, então, são atingidas preferencialmente pelos corpos moedores, gerando uma distribuição granulométrica diferente na descarga, quando comparada à moagem dita convencional.

A moagem seletiva (circuito aberto e com baixo enchimento de bolas), para o mesmo P80 de uma moagem convencional (circuito fechado com ciclones e elevado enchimento de corpos moedores), gera menos ultrafinos e gasta menos energia ao moer menos ganga.

A MOPE já testou, com sucesso, a moagem seletiva, em escala piloto, para minérios de Ferro, Tantalita, Cassiterita e de Terras Raras, dentre outros.

Este estudo tem como objetivo a demonstração dos benefícios da adoção da moagem seletiva em um circuito de beneficiamento de sulfetos. O nome da usina não é citado, pois o projeto ainda está em processo de implantação.

## 2. OPERAÇÃO ATUAL

Na usina alvo deste estudo, que trata minério sulfetado, cuja dureza vem crescendo em grandes proporções, e, para manter a taxa de produção, a usina se vê obrigada a aumentar gradualmente o P80 de descarga da moagem.

Por causa disso, a recuperação metalúrgica da usina caiu mais de 2% em relação ao seu passado recente. Os estudos aqui descritos visaram à procura de opções para melhorar o desempenho metalúrgico da usina, mantendo a taxa atual de tratamento.

## 3. TESTES

### 3.1 Moagem

Foram realizados quatro testes contínuos de moagem seletiva, em moinho piloto, visando à obtenção de diferentes valores de P80, a fim de definir o ponto ideal de moagem que garantisse uma conveniente liberação do material.

Alguns parâmetros operacionais utilizados em cada um dos quatro testes podem ser vistos na **Tabela 3.1**, a seguir.

*Tabela 3.1 - Parâmetros básicos dos testes de moagem*

Teste	Enchimento (%)	% de Sólidos	Rotação (RPM)	Taxa (kg/h)
1	30	47,3	39	131,6
2		47,4		144,0
3	25	43,66	41	110,4
4		43,05		102,4

Embora a densidade da polpa seja diluída, a polpa no fundo do moinho, na zona de moagem, supera 75% de sólidos, como já tem sido comprovado em testes industriais, inclusive de sulfetos.

A taxa de alimentação, embora calibrada de forma precária pela correia de alimentação, foi confirmada mediante amostragem da descarga com ajuda de cronômetro. As taxas mais baixas visam a um P80 de descarga mais fino.

Os ensaios foram realizados em um moinho piloto, de dimensões 0,6 x 0,9 m, amostrando-se a alimentação da moagem (para obter o F80) e a descarga do moinho, para realização de análises granulométricas.

### 3.2 Flotação

Os testes visaram a verificar o desempenho da flotação entre as diferentes condições de moagem (usina atual e moagem seletiva).

As comparações entre testes diferentes devem considerar a mesma proporção de massa flotada. Tal ajuste foi realizado através do programa **COMPARAFLOT**, da MOPE (da ferramenta **MOPETOOLS**).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Moagem

*Tabela 4.1 - Resultados dos Testes de Moagem*

Teste	F80 (µm)	P80 (µm)	Wio (kWh/t)	% material >100#
1	4600	300	26,57	43,8
2	4600	337	26,35	46,4
3	4600	211	23,90	33,6
4	4600	191	24,20	28,8

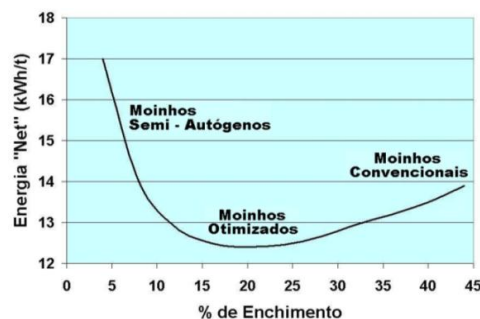
Depois de executado o teste piloto e conhecidos os seus parâmetros: F80, P80, taxa de alimentação, velocidade de rotação do moinho, peso da carga de bolas, etc., é possível determinar o Wio (Work Índice Operacional) que surge desta operação. O valor do Wio pode ser extrapolado para a escala industrial com maior correlação que o teste comum de Bond, em bancada (Wi ou BWI, chamado Work Índice de Bond).

A MOPE conta com o programa **PROMIL.Wio** para executar esses cálculos. O enchimento de bolas de 25% provou ser mais adequado (menor Wio) para explorar mais intensamente o conceito seletivo da moagem (maior camada de polpa livre que favorece a sedimentação dentro do moinho).

#### 4.1.1 Seletividade e Consumo de Energia

O nível de 25% de enchimento de bolas permite a moagem mais eficiente (**Tabela 4.1**).

Experiências industriais indicam que o nível de enchimento ótimo de bolas fica entre 18 e 25%, como ilustrado na **Figura 4.1** abaixo, do livro: **“Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares”**, A. Yovanovic, 2006.



*Figura 4.1 – Nível de enchimento (Modelo Operacional)*

Na **Tabela 4.1** se observa que o Wio obtido para 30% de enchimento (26,5 kWh/t, testes 1 e 2) é superior ao obtido com 25% de bolas (24 kWh/t, testes 3 e 4). O moinho atual geraria um P80 de 245 µm (tese conservadora), operando com 25 a 26% de bolas, mantendo a taxa atual. Para obter P80 de 211 µm, existe a opção de aumentar a carga de bolas para 30%.

O escalonamento industrial desta condição geraria uma redução de custo operacional muito significativa na moagem da usina aqui avaliada, equivalente a US\$4.331/ano por cada tonelada alimentada ao moinho.

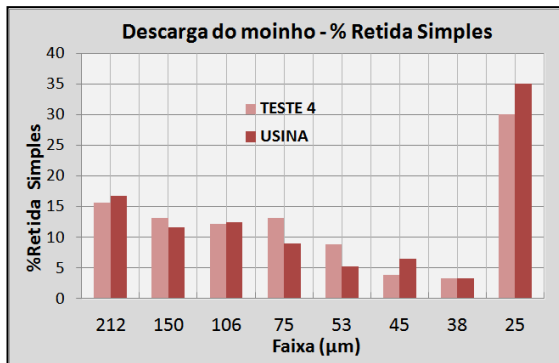
#### 4.1.2 P80 e Distribuição Granulométrica

Dois testes de moagem atingiram um P80 próximo dos valores atualmente observados na usina (embora com outra forma de moagem).

Ainda sem considerar as análises químicas, já é possível observar uma significativa diferença entre as duas formas de moagem: seletiva ou em circuito fechado com ciclones.

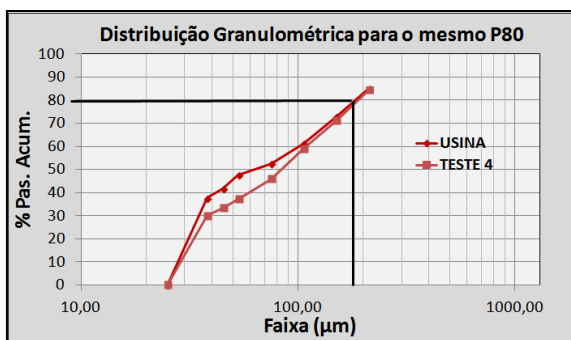
Embora **com o mesmo P80**, a moagem em circuito fechado com hidrociclones (usina) gera 35% de massa passante em 400#, enquanto a moagem seletiva (circuito aberto e baixo enchimento de bolas) gera apenas 30%.

Nas **Figuras 4.2 e 4.3** são mostrados gráficos comparativos, onde se observa que a moagem seletiva gera menos ultrafinos e distribui mais massa nos tamanhos intermediários, mais apropriados para a operação de flotação. A maior quantidade de ultrafinos da moagem convencional deve-se ao efeito da carga circulante, gerada principalmente pela deficiente separação dos hidrociclones (pela diferente gravidade específica dos minérios).



**Figura 4.2** – Distribuição Granulométrica comparativa

Além dos ganhos com a redução do consumo de energia e bolas, a moagem seletiva propicia uma maior liberação de sulfetos ao aplicar mais energia no sulfeto, que afunda no moinho pela sua maior gravidade específica, diferentemente do que ocorre na moagem dita convencional.

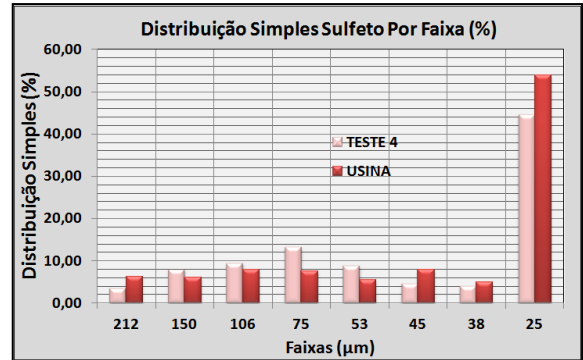


**Figura 4.3** – Distribuição Granulométrica comparativa

O P80, como elemento indicativo de uma operação de cominuição em minérios heterogêneos, é insuficiente se ele não considera a diferente liberação obtida por métodos diferentes de moagem. A moagem seletiva gasta menos energia e mói melhor.

### 4.1.3 Distribuição Granuloquímica

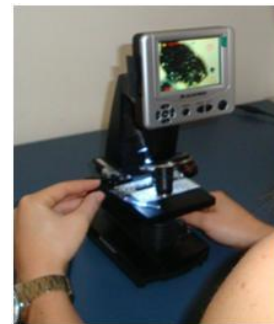
Na **Figura 4.4**, é mostrado um gráfico comparativo, onde se observa que a moagem seletiva gera menos ultrafinos de sulfetos e os distribui nos tamanhos intermediários, mais apropriados para a operação de flotação.



**Figura 4.4** – Distribuição Granuloquímica Comparativa

### 4.1.4 Moagem e Liberação

Dispondo de dois microscópios digitais (um deles mostrado na **Figura 4.5**), foi feita a análise de liberação dos produtos da descarga do moinho, para mostrar em qual faixa o mineral-minério se encontraria razoavelmente liberado da ganga, para cada teste de moagem (portanto, para cada P80).



**Figura 4.5** – Microscópio digital da MOPE

Observou-se que a liberação dos sulfetos ocorre em diferentes faixas, em função da variação do P80. Ainda, para o mesmo P80 (teste 4 comparado ao teste com o material da usina), a moagem seletiva conduziria a uma melhor liberação dos sulfetos que aquela observada na condição atual da usina.

Ao comparar a liberação em relação à alimentação atual da flotação na usina, foram obtidos os resultados ilustrados na **Tabela 4.2**, onde se demonstra que, na moagem seletiva, a liberação de sulfetos começa a acontecer em tamanho mais grosseiro do que o observado na usina, com moagem convencional.

**Tabela 4.2** – Liberação estimada do material

Análise de Liberação (Descarga do Moinho)			
microns	mesh	Usina	TESTE 4
µm	#	P80 195 µm	P80 191 µm
595	28	40,76	15,63
420	35		(7,26)
300	48		
210	65	(20,24)	84,37
150	100		
105	150		
74	200	59,24	(92,74)
53	270		
44	325		
37	400		
22	-400		

Sem Parênteses	% Massa
Entre Parênteses	%Cobre Acumulado

Para o mesmo P80, a moagem seletiva permite que 84,37% da massa esteja pronta para ser flotada em condições aceitáveis de liberação, enquanto apenas 59,24% de massa gerada pela atual forma de moagem se encontra nas mesmas condições.

Ainda, nos valores indicados entre parenteses na **Tabela 4.2**, observa-se que maior quantidade de sulfeto se encontra pronta para ser flotada no teste 4 (92,74%), em comparação com os valores observados na usina, de apenas 79,76%, para o mesmo P80.

## 4.2 Flotação

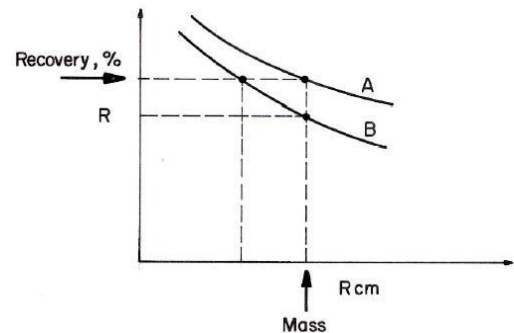
### 4.2.1 Método de Avaliação e Parâmetros

De acordo com o Modelo Operacional, depois de atingido o tempo mínimo de flotação na usina (tempo de residência efetivo na usina maior ou igual ao tempo necessário para atingir a plena recuperação da etapa), a recuperação metalúrgica é função da proporção de massa concentrada, ou seja: mais massa concentrada equivale a mais recuperação.

$$R = ALFA * Rcm^{BETA} \text{ (1ª Lei do modelo)}$$

Sendo R a recuperação metalúrgica da substância avaliada (sulfeto, neste caso) e Rcm a razão de concentração de massa (massa alimentada / massa concentrada).

ALFA é o ponto teórico onde esta curva corta no eixo vertical (eixo da Recuperação) e BETA representaria a inclinação desta curva. Quanto menor for BETA (em termos absolutos), mais a curva se eleva e, assim, com a mesma proporção de massa concentrada (Rcm), aumentaria a recuperação metalúrgica, caracterizando o aumento de seletividade dessa condição de flotação avaliada.



**Figura 4.6** – Primeira Lei do Modelo Operacional (Flotação)

Aplicando a 1ª Lei do Modelo é possível avaliar testes diferentes sob uma mesma perspectiva. Sendo assim, as comparações entre testes diferentes devem considerar a mesma proporção de massa flotada.



**Figura 4.6** – Programa COMPARAFLOT (MOPETOOLS)

#### 4.2.2 Avaliação Usina/Testes

Os testes de flotação executados depois da moagem seletiva, para P80 similar ao atual da usina, são aqui comparados com teste similar efetuado com a polpa que alimenta a usina atual, na etapa Rougher, em batelada.

Destaca-se o elevado enriquecimento da espuma nos testes de moagem seletiva, em comparação com os concentrados dos testes executados com a alimentação da usina. Este enriquecimento se deve à maior liberação dos sulfetos, propiciado pela moagem seletiva.

Na **Tabela 4.3**, apresentam-se os resultados obtidos, parametrizados pelo COMPARAFLOT com a mesma proporção de massa flotada (11,36%) e com o mesmo teor de alimentação.

*Tabela 4.3 – Comparação de resultados de flotação*

Teste	Beta	R% a 11,36% de massa
Teste 3: P80 211	-0,110	83,9
Teste 4: P80 191	-0,109	84,1
USINA: P80 195	-0,131	82,1

Os testes alimentados com o material moído seletivamente apresentam maior seletividade (valor do índice de seletividade BETA), motivo pelo qual obtém 2% de recuperação metalúrgica a mais que o teste feito com material gerado pela usina. Tendo este ganho como base, o lucro adicional levantado foi de US\$8.750/ano por tonelada/hora de minério processado na usina.

## 5. CONCLUSÕES

A moagem seletiva mói com maior qualidade (distribuição granuloquímica) e gera maior liberação, permitindo aumentar a seletividade nas operações de concentração para diversos tipos de minério, incrementando o desempenho metalúrgico, além de reduzir significativamente os custos de operação da moagem.

No caso aqui estudado, a redução do OPEX no moinho e o acréscimo de recuperação metalúrgica apresentaram um ganho líquido conjunto próximo a US\$13.100/ano por cada t/h de minério processado na usina.

O paradigma do circuito fechado de moagem está cada vez mais próximo do seu fim. Novos projetos já poderiam considerar esta nova forma de cominuição. Usinas em operação poderiam ter benefícios surpreendentes, ainda mais hoje, com o elevado valor da energia. A potência aplicada ao moinho cairia em 20%.

Outros projetos desenvolvidos pela MOPE seguem estes conceitos de cominuição seletiva e pré-concentração, gerando excelentes resultados. O projeto Pedra de Ferro (BAMIN) obteve resultados expressivos, sendo reconhecido pela revista Minérios & Minerale, recebendo o Prêmio Excelência, em 2010.

## EQUIPE TÉCNICA



*Equipe de processos da MOPE – Philippe, Laís, Aline, Alexis e Pedro (na F. Gorceix). Ainda, com a participação de Thaís, André e Noé, da equipe do escritório.*

Agradecemos o pessoal da Fundação Gorceix pelo apoio e orientação, principalmente do Eng. Fernando Gomes. Agradecemos, também, os colegas dessa Fundação: Renato, Ediron e Gustavo, pela execução dos trabalhos.

**Belo Horizonte, 18 de Março 2013**  
**Alexis P. Yovanovic**  
**MOPE – Modelo Operacional Ltda.**