

MODELAGEM MATEMÁTICA DO CIRCUITO DE MOAGEM DA ULTRAFERTIL – PARTE 2

A.C. Naschenveng¹, A.J. Rodrigues², H. Delboni Jr.¹

1 - EPUSP, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo - Av. Prof. Mello Moraes, 2373, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo - SP, Brasil
andre.naschenveng@poli.usp.br e hdelboni@usp.br

2 - Ultrafertil S.A., Complexo Mineral-Químico de Catalão, Fazenda Chapadão, s/nº, Zona Rural, Catalão - GO, Brasil.
antoniorodrigues@fosfertil-ultrafertil.com.br

RESUMO

Na Parte 2 deste trabalho que descreve em detalhe a aplicação de conceitos de modelagem matemática aos equipamentos do circuito industrial de moagem e classificação de minério fosfático da Ultrafertil S.A. (Catalão, GO), estendem-se as considerações sobre balanço de massas e são apresentados os resultados do mesmo. O procedimento, baseado em dados experimentais da operação de classificação, foi realizado em programa de simulação de processos minerais segundo os critérios expostos no final da Parte 1.

Na sequência, também são discutidas as diretrizes que orientaram o ajuste individualizado dos modelos de moinho de bolas e de ciclone, a posterior integração dos mesmos e o ajuste do assim formado sub-circuito de moagem secundária.

PALAVRAS-CHAVE: cominuição, moagem, modelagem.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho pretende registrar todo o processo de aplicação de conceitos de modelagem matemática aos equipamentos do circuito industrial de moagem e classificação de minério fosfático da Ultrafertil S.A. O objetivo final é a obtenção de uma plataforma de modelos ajustados que se preste à simulação computacional das operações estudadas. A modelagem matemática empregada na busca do objetivo mencionado foi a disponível no programa de simulação de processos minerais JKSimMet versão 4.0. Trata-se de uma teoria já sedimentada, de reconhecido valor na consideração de questões relacionadas ao Tratamento de Minérios.

2. BALANÇO DE MASSAS

Dando continuidade às considerações iniciadas na Parte 1 deste trabalho, são apresentados critérios para a avaliação da qualidade dos dados de amostragem via parâmetro obtido no fechamento do balanço de massas.

A qualidade da estimativa é avaliada através do desvio associado à mesma. O desvio (ou erro) pode ser absoluto (diferença simples), relativo (percentual) ou ponderado, que permite comparar os diversos valores do circuito de forma normalizada. Como regra empírica de avaliação da qualidade das estimativas de balanços de massa, na Tabela I são apresentados valores da soma global dos erros ponderados (SSQ) em circuitos de cominuição e classificação, segundo o tipo de equipamento.

Tabela I – Critério para avaliação da qualidade de dados de amostragem.

Tipo de Equipamento	Qualidade dos Dados de Amostragem em Função dos Erros Ponderados			
	Excelente	Boa	Accitável	Inaccitável
Classificação	10	15	20	SSQ >20
Cominuição	20	30	40	SSQ >40

O SSQ resultante do procedimento de balanço de massas efetuado sobre a operação de classificação estudada foi igual a 19. A Figura 1 apresenta os valores calculados das vazões de sólido e das porcentagens de sólido em massa associadas aos fluxos da classificação (sete ciclones de 26").

Informações sobre distribuições granulométricas são fornecidas apenas para os fluxos finais ajustados (item 3.3.), por meio de gráficos com valores finais de porcentagem passante acumulada nas malhas ensaiadas.

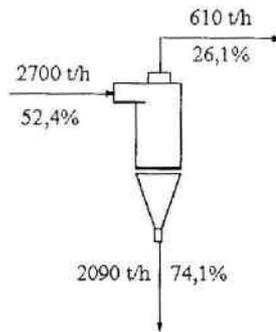


Figura 1 – Resultados do balanço de massas da classificação.

3. AJUSTE DE MODELOS

Ajustar – ou calibrar – modelos matemáticos significa estimar seus parâmetros a partir de dados de desempenho de um sistema ou equipamento. No caso do presente trabalho, os dados foram obtidos via amostragem do circuito industrial. Informações do fabricante, experiência operacional e literatura são fontes alternativas de obtenção de dados primários para execução de modelagem que podem ser citadas.

A calibração de modelos, assim como o fechamento de balanço de massas, é um exercício de refinamento constante, que nunca deve perder de vista a qualidade dos dados experimentais e sua influência nos resultados. A estratégia de baixar a qualquer custo o desvio atribuído ao ajuste do modelo pode conduzir a erros grosseiros, que serão seguramente trasladados para simulações posteriores (Delboni Jr., 1997).

A seguir, são apresentados os procedimentos e resultados dos ajustes realizados para os modelos de ciclone, de moinho de bolas e para o sub-circuito constituído pela integração desses dois modelos individuais. Nos itens 3.1. e 3.2. – relativos a ciclone e a moinho de bolas, respectivamente – complementa-se a descrição de cada modelo iniciada na primeira parte.

3.1. Ciclone

A Parte 1 deste trabalho, no item 2.2., apresentou somente as equações relacionadas as variáveis operacionais importantes para o modelo de ciclone de Nageswararao (1978), deixando de abordar componente essencial do mesmo: a modelagem da curva de partição.

Para se caracterizar a curva de partição, são necessários três parâmetros (todos estimados no processo de ajuste do modelo, por meio de pelo menos um teste com o minério):

- 1) inclinação (α) da curva no segmento próximo ao d_{50c} , um parâmetro de dispersão;
- 2) diâmetro mediano de partição corrigido (d_{50c}), um parâmetro de posição; e
- 3) recuperação de água para o *overflow* (C , igual a $1-R_f$).

O programa de simulação utilizado pelos autores determina as partições balanceadas e ajusta, por meio de regressões não-lineares, dados experimentais à função de classificação de Whiten (Napier-Munn, 1996):

$$E_o(d/d_{50c}) = C \cdot [(e^\alpha - 1) / (e^{\alpha d/d_{50c}} + e^\alpha - 2)] \quad (1)$$

onde,

$E_o(d/d_{50c})$ = fração da alimentação de tamanho d/d_{50c} que segue para o *overflow*

d_{50c} = diâmetro mediano de partição corrigido (mm)

α = coeficiente de inclinação da curva padrão de partição

d = tamanho de partícula (mm)

C = recuperação de água para o *overflow* ($1-R_f$)

R_f = recuperação de água para o *underflow*

Omissão sanada, passa-se à descrição do ajuste propriamente dito.

De posse dos valores calculados na etapa de balanço de massas, é possível iniciar o *fitting* com um conjunto de dados

que respeita o princípio de conservação da massa. Os valores do balanço devem, então, ser copiados para a coluna correspondente aos dados experimentais no módulo de calibração do simulador. O procedimento foi realizado para a tríade de fluxos da classificação, concomitantemente à atribuição de desvios para as variáveis envolvidas. O critério para atribuição de desvios está explicitado na Tabela II.

Tabela II – Desvios atribuídos no ajuste do ciclone.

Variável	Desvio		
	Alimentação	verflow	Underflow
Vazão de sólidos (t/h)	1,0 *	5 %	5 %
Concentração de sólidos em massa (%)	1,0	1,0	1,0
Distribuição granulométrica (% retida simples)	Whiten **	Whiten	Whiten

* valor absoluto

**Ao se atribuir desvio Whiten para os valores experimentais, o programa considera 1,0% - se $(\%ret.simples) > 10$ - e $[0,001.(\%ret.simples)+0,001]\%$ - se $(\%ret.simples) < 10$.

O erro global (SD), resultante do ajuste efetuado, assumiu o valor 1,13. A Tabela III apresenta parâmetros para julgamento do erro global obtido em ajustes de classificação. A Figura 2 mostra valores ajustados das vazões de sólido e das porcentagens de sólido em massa associadas aos fluxos da classificação estudada.

Tabela III – Critério para avaliação da qualidade de separação em ciclones.

Valor do erro global	Qualidade da estimacão
> 2,0	baixa
2,0 > SD > 1,0	razoável
SD < 1,0	boa
SD < 0,5	excelente

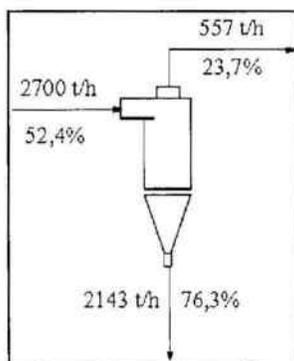


Figura 2 – Resultados do ajuste do modelo de ciclone.

A partição de água para o *underflow* representa um bom índice para estimacão da qualidade da separaco em ciclones (Tabela IV). O valor experimental da partição de água para o *under* foi igual a 29,6%, e o ajustado, 26,6%.

Tabela IV – Critério para avaliação da qualidade de separação em ciclones.

Partição de água para o <i>underflow</i> (%)	Qualidade da separaco
> 50,0	muito pobre
50,0 – 40,0	pobre
40,0 – 30,0	razoável
30,0 – 20,0	típica de uma boa operacão
20,0 – 10,0	sujeita à operacão em corda
< 10,0	raramente alcançada

3.2. Moinho de Bolas

A Equação (3) apresentada na Parte 1 definiu o parâmetro principal do modelo de operação de moinho de bolas, que é o quociente r/d . A divisão deste parâmetro pelo tempo de residência médio das partículas no interior do moinho leva a sua normalização, tornando-o independente das dimensões ou mesmo das condições operacionais do moinho estudado (Delboni Jr., 1997). A Equação (2) mostra a normalização de d_i :

$$d_i^* = [(D^2 \cdot L)/(4 \cdot Q)] \cdot d_i \quad (2)$$

onde,

D = diâmetro do moinho (m)

L = comprimento do moinho (m)

Q = vazão volumétrica (m³/h)

Dessa forma, o modelo matemático da operação de moinhos de bolas é definido a partir das características do minério (função distribuição de quebra) e do equipamento (r/d^*). r/d^* é representado por uma curva quadrática, definida por três ou quatro pontos, utilizando-se funções *spline* (Napier-Munn, 1996) para cobrir toda a faixa granulométrica estudada. Uma vez calculados - ou selecionados - os valores do parâmetro r/d^* , em conjunto com as características do minério (a_{ij}), o modelo encontra-se calibrado para exercícios de simulação.

O trabalho realizado não contemplou testes de fragmentação do minério da jazida da Ultrafertil, isto é, não foram executados ensaios para a determinação de índices paramétricos da relação entre energia aplicada e fragmentação resultante. A função distribuição de quebra utilizada foi a padrão disponível no simulador.

Os valores ajustados de vazão e distribuição granulométrica do *underflow* – obtidos no procedimento descrito no item anterior – alimentaram a coluna correspondente aos dados experimentais da alimentação do moinho de bolas, quando da calibração de seu modelo. Os dados experimentais da descarga, por sua vez, foram determinados a partir dos valores ajustados da alimentação da classificação e dos dados experimentais da alimentação nova do circuito de moagem secundária (produto não-magnético).

O erro global (SD), resultante do ajuste efetuado, assumiu o valor 1,55. A Figura 3 mostra valores ajustados das vazões de sólido e das porcentagens de sólido em massa associadas aos fluxos da classificação.

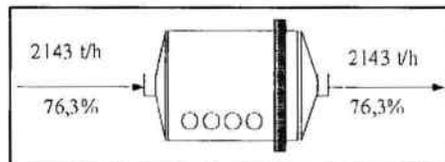


Figura 3 – Resultados do ajuste do modelo de moinho de bolas.

3.3. Integração

A integração dos modelos foi efetuada após a calibração dos modelos individuais. A seguir, no ajuste do sub-circuito de moagem secundária, para a maioria dos fluxos atribuíram-se os seguintes desvios absolutos:

- 100,0 para valores de vazão de sólidos
- 2,0 para valores de porcentagem de sólidos em massa

Para o Fluxo V, referência na calibração, foi atribuído desvio menor para a vazão de sólidos (1,0) e manteve-se o desvio associado à porcentagem de sólidos em massa. O erro global determinado no procedimento de ajuste foi igual a 2,43. A Figura 4 mostra valores ajustados das vazões de sólido e das porcentagens de sólido em massa associadas aos fluxos do sub-circuito modelado.

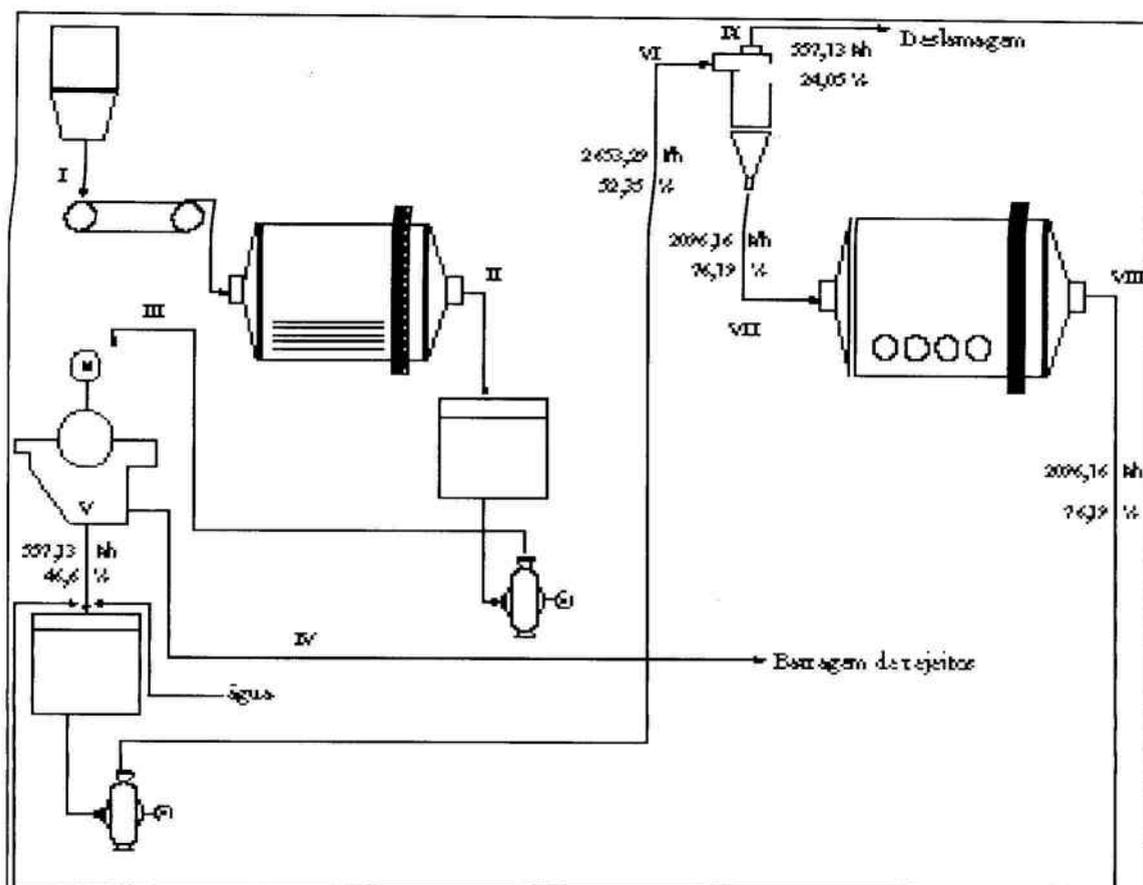


Figura 4 – Resultados do ajuste integrado dos modelos de moinho de bolas e ciclone.

As Figuras 5 e 6 da página seguinte apresentam, por meio de gráficos, as distribuições granulométricas ajustadas finais dos fluxos envolvidos na modelagem da moagem secundária.

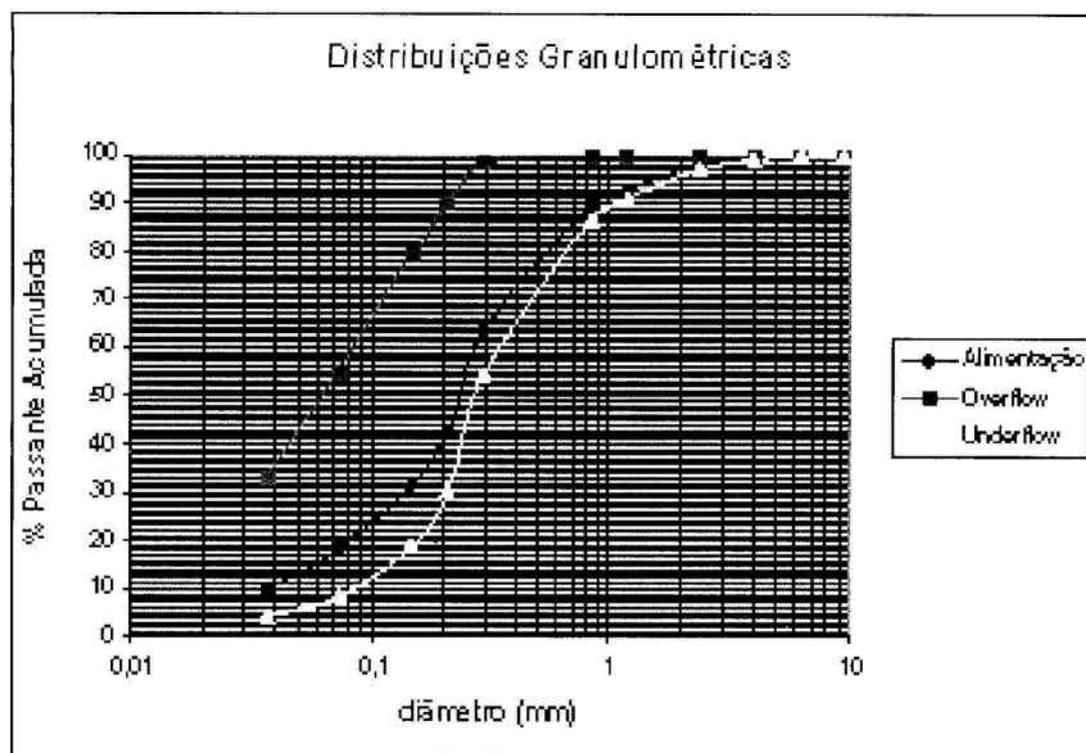


Figura 5 – Distribuições granulométricas nos fluxos VI, VII e IX, respectivamente alimentação, *underflow* e *overflow* da classificação

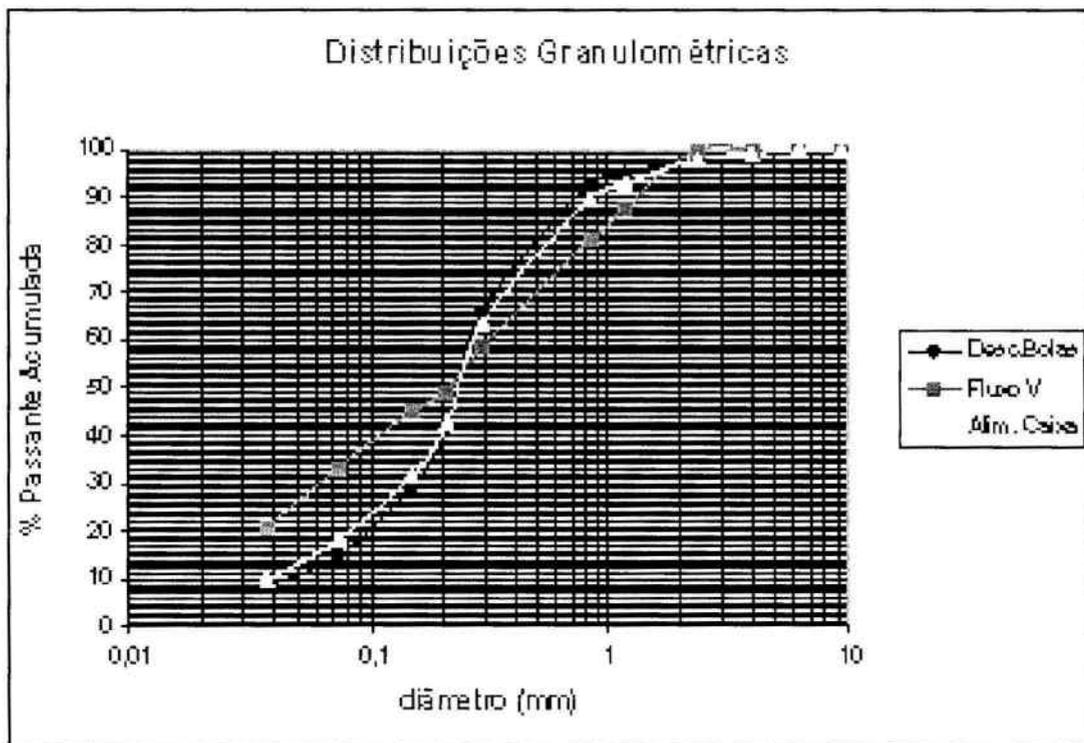


Figura 6 – Distribuições granulométricas nos fluxos V, VIII e (V+VII), respectivamente alimentação nova, descarga do moinho de bolas e alimentação da caixa de bomba

4. CONCLUSÃO

A modelagem do sub-circuito de moagem secundária apresentada constitui mais um passo na direção de se obter uma plataforma de modelos ajustados que se preste à simulação computacional do circuito de moagem da Ultrafertil S.A.

O trabalho prosseguirá com a realização das mesmas tarefas de balanço de massas e de modelagem até aqui descritas, mas para o conjunto de dados experimentais da Amostragem 2. Em uma fase posterior, será efetuada a modelagem da moagem primária, mediante calibração de modelo de moinho de barras a partir do conjunto completo de dados experimentais (Amostragens 1 e 2). Serão, então, integradas e ajustadas as duas etapas de moagem.

A conclusão do trabalho se dará com a realização de simulações que permitam avaliar índices de desempenho do circuito de moagem. Em especial, será investigada a possibilidade de incremento da vazão de alimentação do circuito. Para garantir que respostas realistas sejam obtidas, serão respeitados limites característicos da instalação (pressões nos ciclones e cargas de corpos moedores, por exemplo) e de especificação do produto para as operações unitárias subsequentes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio manifestado através de concessão de bolsa de estudos, e a Ultrafertil S.A., pelo apoio logístico durante toda a fase de obtenção de dados experimentais em Catalão.

6. REFERÊNCIAS

- Asomah, I. K.; Napier-Munn, T. J. The performance of inclined hydrocyclones in mineral processing. In: CONFERENCE ON HYDROCYCLONES, Cambridge, 1996. Hydrocyclones '96: papers. [S.l.]: Mechanical Engineering Publications, 1996. p. 273-288.
- Delboni Jr., H. Circuitos de cominuição e classificação de minérios. Apostila, São Paulo, 1997.
- Nageswararao, K. Further developments in the modelling and scale up of industrial hydrocyces. PhD Thesis, Julius

Kruttschnitt Mineral Research Centre / University of Queensland, 1978.

Napier-Munn, T. J. et al. Mineral comminution circuits: their operation and optimisation. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre / University of Queensland, 1996a. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)

Whiten, W. J. A matrix theory of comminution machines. In: Chemical Engineering Science, 29, p. 31-34, 1974.