

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CIRCUITO DE MOAGEM DA VALE FERTILIZANTES DE CATALÃO - GO

ROCHA, B.G.¹, DELBONI JR., H.²

¹Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri.
e-mail: barbara.rocha@ufvjm.edu.br

²Universidade de São Paulo, e-mail: hdelboni@usp.br

RESUMO

O presente estudo descrever os trabalhos realizados para análise de desempenho do circuito de moagem do Complexo de Mineração de Catalão - GO, da Vale Fertilizantes S/A. Inclui a apresentação dos dados obtidos e as respectivas análises, de forma a registrar o resultado das simulações realizadas no referido circuito de moagem. A base de dados para a etapa de diagnóstico de desempenho foi formada por dados obtidos a partir de duas campanhas de amostragens realizadas no circuito industrial de moagem da usina. Estas campanhas de amostragem cobriram o período de janeiro a junho de 2012. A primeira amostragem foi executada incluindo a etapa denominada de pré-classificação, qual seja, operação de uma bateria de ciclones entre as moagens em moinho de barras e de bolas. Já a segunda amostragem não incluiu tal etapa de pré-classificação. Cada campanha de amostragem incluiu a tomada de amostras em todos os pontos selecionados do circuito de moagem e deslamagem, incluindo o produto da separação magnética de baixo campo, pré-classificação, além das duas etapas de moagem em moinho de bolas e quatro estágios de deslamagem. Em ambas as campanhas não foram obtidas amostras de alimentação do moinho de barras, razão pela qual tal etapa não foi incluída nas presentes análises. Estão descritos os resultados obtidos a partir das calibrações de modelos matemáticos, cujos produtos foram fluxogramas e balanços de massas consolidados do circuito integrado e, também, os índices selecionados de desempenho do processo com as respectivas análises, consolidando dados e informações do estudo em questão.

PALAVRAS-CHAVE: moagem; balanços de massas; simulação; Vale Fertilizantes.

ABSTRACT

This report describes the work done to analyze the performance of the Catalão Mining Complex grinding circuit - GO, Vale Fertilizantes S/A. Includes the presentation of the data and their analysis, in order to record the results of simulations in that grinding circuit. The base data for performance diagnostic step was formed by data obtained from two samples taken in campaigns in the industrial circuit grinding plant. These sampling campaigns covered the period from January to June 2012. The first sampling was performed including the step called pre-classification, namely, operation of a cluster of cyclones between the rod mill and ball mill. The second sampling campaign did not include such pre-classification stage. Each sampling campaign included the collection of samples in all the selected points of the grinding circuit and desliming including the product of low-intensity magnetic separation, pre-classification, in addition to the two stages of grinding in ball mill and four stages of desliming. In both campaigns samples of the feed rod mill could not be

collected. As such, this step was not included in these analyzes. The results obtained from mathematical calibration models are described, whose products are flowsheets and consolidated mass balances of the integrated circuit, and also selected performance indexes with their analyzes, were used to consolidate data and study information in question.

KEYWORDS: milling; mass balance; simulation; Vale Fertilizantes.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna não pode prescindir da extensa gama de tecnologias de beneficiamento mineral forjadas pelo homem. Cada vez mais, faz-se necessária a obtenção de produtos de alta qualidade, que atendam rígidas especificações de teor e/ou de distribuição granulométrica (NASCHEVENG, 2003). Depósitos minerais antes vistos como marginais estão sendo explorados devido ao esgotamento dos jazimentos ricos e, para que isso ocorra de forma economicamente viável, novas rotas de beneficiamento estão sendo desenvolvidas e, conseqüentemente, novos equipamentos e novas maneiras de se prever a influência que estas modificações teriam na *performance* do circuito em questão.

Uma forma de avaliar modificações em processos é a representação matemática da operação de circuitos reais. Através de recursos de simulação de processo descreve-se modelos matemáticos que possibilitam, mediante utilização de sistemas integrados de simulação, o estudo eficiente e rápido de alternativas para a solução de questões mais complexas, que envolvem diversos setores de uma usina de beneficiamento, contribuindo para o desenvolvimento de técnicas inovadoras (ROCHA, 2013).

No entanto, a simulação não é uma atividade trivial tampouco simples. Os modelos de processo buscam separar as características do minério e do equipamento. No atual estágio de desenvolvimento, os modelos mais empregados e eficazes devem ser calibrados, sob condições reais de operação. A prática usual de otimização via simulação inclui os seguintes passos:

- Amostragem do circuito industrial;
- Análise da consistência dos dados e das informações obtidas;
- Caracterização em laboratório do material de alimentação da usina;
- Estimativa dos parâmetros do modelo de cada equipamento, a partir de dados da amostragem em campo;
- Execução de simulações para explorar formas de se alcançar os objetivos da otimização, por meio da mudança de fluxogramas, equipamentos ou condições operacionais;
- Testes e implementação das condições avaliadas (BERGERMAN, 2009).

Esta técnica já é plenamente dominada e executada com sucesso ao redor do mundo e em diversas minerações no Brasil (BERGERMAN, 2009; DELBIM, 2001; DELBONI, 1999; NASCHEVENG, 2003). Através dela, é possível analisar a viabilidade, por exemplo, de incrementar a vazão de alimentação de uma linha de moagem sem prejuízo ao alcance de uma certa distribuição granulométrica requerida. Deve-se ressaltar ainda que a análise é feita evitando-se a realização de difíceis, caros, e geralmente inconclusivos, testes em escala industrial (NASCHEVENG, 2003).

O presente trabalho descreve o processo de modelagem matemática para análise e otimização do circuito industrial de moagem e classificação do minério fosfático da Vale Fertilizantes S.A (VFSA), localizada em Catalão-GO e, obter a plataforma de modelos ajustados que proporcione a simulação computacional das operações ajustadas. Para tanto, o simulador JKSimMet[®] foi utilizado. O modelo matemático de

cominuição empregado leva em conta, tanto as características do equipamento, como as do minério.

Assim, pretende-se avaliar a qualidade do ajuste do modelo em dois cenários: 1) com a etapa de pré-classificação em operação; 2) sem a etapa de pré-classificação em operação. A influência dessa etapa e a comparação do circuito com e sem a mesma também é analisada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A base de dados e informações para a etapa de diagnóstico de desempenho foi formada a partir de duas campanhas de amostragens realizadas na etapa de moagem da usina industrial de beneficiamento de minério, da Vale Fertilizantes S.A, em Catalão - GO (CMC – Complexo Mineroquímico de Catalão).

2.1. Obtenção das amostragens individuais

As duas campanhas de amostragens realizadas especificamente no âmbito do presente trabalho cobriram o período de janeiro a junho de 2012. A primeira amostragem foi executada incluindo a etapa denominada de pré-classificação, qual seja, operação de uma bateria de ciclones entre as moagens em moinho de barras e de bolas. Já a segunda amostragem não incluiu tal etapa de pré-classificação.

Cada campanha de amostragem incluiu a tomada de amostras em todos os pontos selecionados do circuito de moagem e deslamagem, incluindo produto da separação magnética de baixo campo, pré-classificação, além das duas etapas de moagem em moinho de bolas e quatro estágios de deslamagem. Em ambas as campanhas não foram obtidas amostras de alimentação do moinho de barras, razão pela qual tal etapa não foi incluída nas presentes análises.

2.2. Balanços de massas

Após o devido tratamento das amostras pelo laboratório de processo, os dados medidos foram ajustados. Inicialmente foi feita uma verificação manual dos dados, quanto a sua consistência, fechando os balanços de massas e metalúrgico em cada equipamento. Este tratamento manual dos dados é de extrema importância, pois permite a identificação de erros grosseiros nos dados. Com essa verificação inicial, os dados foram inseridos no *software* JKSimMet®, para realização do balanço de massas e metalúrgico.

2.3. Calibração dos modelos

Após o balanço de massas, foi realizado a calibração dos modelos com o auxílio do *software* JKSimMet®.

2.4. Análises de processo

Depois de realizado as etapas de levantamento de dados das amostragens, o balanço de massas e a calibração dos modelos, foram realizadas as análises

visando avaliar o desempenho do processo de cominuição da usina de Catalão. Esta avaliação foi efetuada, sempre que possível, comparando-se os dados obtidos com e sem a operação da etapa de pré-classificação do circuito.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Amostragem I – Configuração do circuito com pré-classificação

A Figura 1 apresenta o fluxograma e o sumário do balanço de massas relativo à primeira campanha de amostragem considerada no âmbito do presente trabalho, qual seja, aquela realizada em 13 de janeiro de 2012. Na ocasião a usina foi alimentada com minério retomado da pilha identificada como 1638.

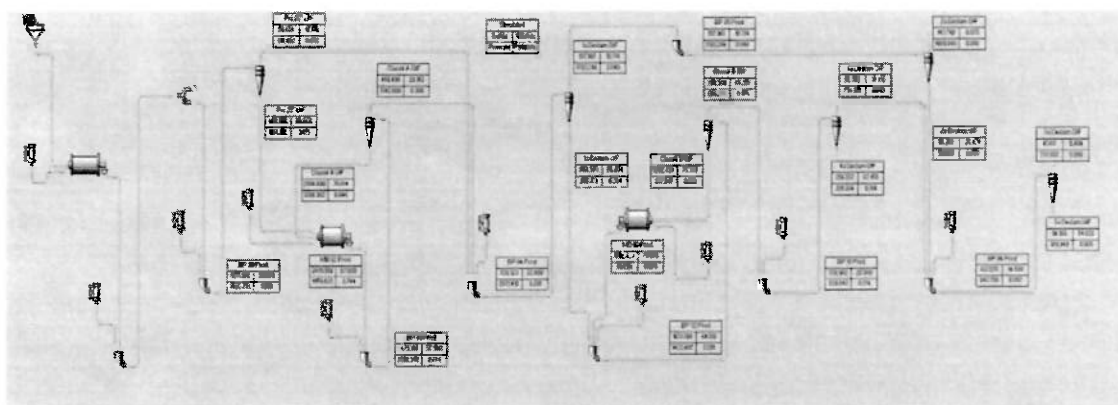


Figura 1. Fluxograma de circuito de moagem e sumário de balanço consolidado do CMC – Circuito com Pré-Classificação – Pilha 1638.

A alimentação da usina, composta pela vazão de alimentação do moinho de barras (320 MB 001) foi calculada em 655 t/h de sólidos, base seca. O produto moído foi encaminhado aos separadores magnéticos de baixo campo - SMBC, cuja partição em massa foi estipulada em 18%, o que resultou em 537 t/h de sólidos para a fração não-magnética, bem como 118 t/h de para a fração magnética.

A primeira etapa de classificação (pré-classificação) foi alimentada pelo fluxo não-magnético da SMBC. A partição de sólidos nesta etapa foi calculada em 87,3% para o *underflow*, ou seja, 469 t/h de sólidos encaminhadas ao *underflow*, ante a 537 t/h de sólidos de alimentação.

A alimentação da primeira etapa de moagem em moinho de bolas apresentou, portanto, vazão de 469 t/h, com 25,0% passantes em 0,15 mm (100# Tyler), enquanto que o produto desta etapa resultou em 55,8% passantes nesta mesma malha, ou seja, 44,2% retidos em 0,15 mm. A carga circulante da primeira etapa de moagem em moinho de bolas foi calculada em 429%.

Desta forma, as recuperações globais indicaram 18% para o fluxo de magnéticos, 12,7% de overflow da pré-classificação, assim como 69,3% de produto da primeira etapa de moagem em moinho de bolas.

A primeira etapa de deslamagem foi alimentada pela combinação do *overflow* da pré-classificação, bem como pelo produto da primeira etapa de moagem em moinho de bolas (*overflow* da Classificação A), perfazendo 537 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da primeira deslamagem indicou vazão de 339 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 63,1% nesta etapa de deslamagem. O *overflow* desta etapa apresentou P_{80} de 0,040 mm, com 78,4% passantes em 0,038 mm.

O *underflow* da primeira deslamagem foi encaminhado à segunda etapa de moagem em moinho de bolas. Analogamente, a alimentação da segunda etapa de moagem em moinho de bolas apresentou vazão de 339 t/h, com 38,9% passantes em 0,15 mm (100# Tyler), enquanto que o produto desta etapa (*overflow* da Classificação B) resultou em 74,0% passantes nesta mesma malha, ou seja, 26,0% retidos em 0,15 mm. A carga circulante da segunda etapa de moagem em moinho de bolas foi calculada em 381%.

O produto da segunda etapa de moagem em moinho de bolas foi encaminhado à assim denominada quarta etapa de deslamagem, perfazendo 339 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da quarta deslamagem indicou 257 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 75,7%, enquanto que o *overflow* desta etapa apresentou P_{80} de 0,042 mm, com 77,0% passantes em 0,038 mm.

O *overflow* da primeira deslamagem foi encaminhado à segunda etapa de deslamagem, com vazão de 198 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da segunda deslamagem indicou 55 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 27,9% nesta etapa de deslamagem. O *overflow* desta etapa apresentou 95,9% passantes em 0,038 mm, com P_{80} de 0,014 mm, este último baseado em extrapolação da respectiva distribuição granulométrica.

A terceira etapa de deslamagem foi alimentada pela combinação do *overflow* da quarta deslamagem, bem como pelo *underflow* da segunda etapa de deslamagem, perfazendo 138 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da terceira deslamagem indicou 96 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 69,9%, enquanto que o *overflow* desta etapa apresentou 98,1% passantes em 0,038 mm, com P_{80} de 0,011 mm, este último baseado em extrapolação da respectiva distribuição granulométrica.

3.2. Amostragem II – Configuração do circuito sem pré-classificação

A Figura 2 apresenta o fluxograma e o sumário do balanço de massas relativo à segunda campanha de amostragem considerada no âmbito do presente trabalho, qual seja, aquela realizada em 27 de junho de 2012. Na ocasião a usina foi alimentada com minério retomado da pilha identificada como 1664.

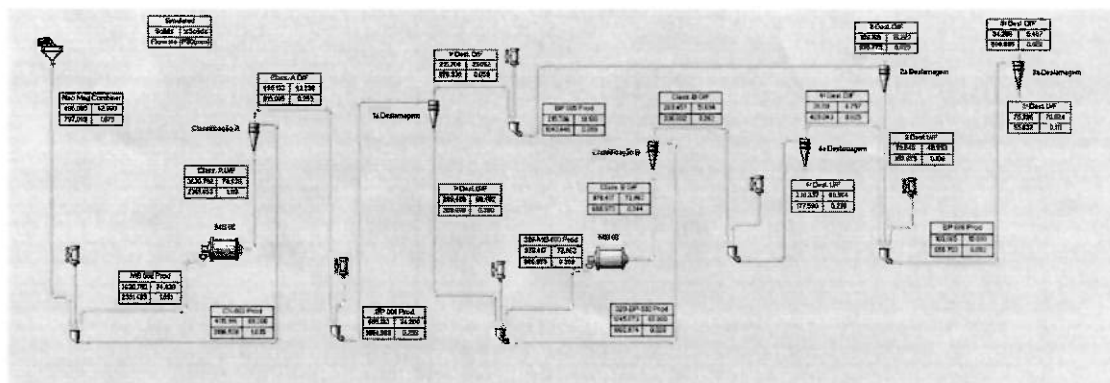


Figura 2. Fluxograma de circuito de moagem e sumário de balanço consolidado do CMC – Circuito sem Pré-Classificação – Pilha 1664.

A alimentação da usina, composta pela vazão de alimentação do moinho de barras (320 MB 001) foi calculada em 591 t/h de sólidos, base seca. O produto moído foi encaminhado aos separadores magnéticos de baixo campo - SMBC, cuja partição em massa foi estipulada em 18%, o que resultou em 485 t/h de sólidos para a fração não-magnética, bem como 106 t/h de para a fração magnética.

Como a etapa de pré-classificação não se encontrava em operação, a alimentação da primeira etapa de moagem em moinho de bolas apresentou vazão de 485 t/h. Este mesmo fluxo apresentou 39,2% passantes em 0,15 mm (100# Tyler), enquanto que o produto desta etapa resultou em 66,0% passantes nesta mesma malha, ou seja, 34,0% retidos em 0,150 mm. A carga circulante da primeira etapa de moagem em moinho de bolas foi calculada em 749%.

A primeira etapa de deslamagem foi alimentada pelo produto da primeira etapa de moagem em moinho de bolas (*overflow* da Classificação A), perfazendo 485 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da primeira deslamagem indicou 269 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 55,5% nesta etapa primeira de deslamagem. O *overflow* desta etapa apresentou P_{80} de 0,059 mm, com 72,5% passantes em 0,045 mm.

O *underflow* da primeira deslamagem foi encaminhado à segunda etapa de moagem em moinho de bolas. Analogamente, a alimentação da segunda etapa de moagem em moinho de bolas apresentou vazão de 269 t/h, com 40,6% passantes em 0,15 mm, enquanto que o produto desta etapa (*overflow* da Classificação B) resultou em 55,4% passantes nesta mesma malha, ou seja, 44,6% retidos em 0,15 mm. A carga circulante da segunda etapa de moagem em moinho de bolas foi calculada em 361%.

O produto da segunda etapa de moagem em moinho de bolas foi encaminhado à assim denominada quarta etapa de deslamagem, perfazendo 269 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da quarta deslamagem indicou 239 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 88,8% nesta quarta etapa de deslamagem. O *overflow* desta etapa apresentou P_{80} de 0,025 mm, com 93,9% passantes em 0,038 mm.

O *overflow* da primeira deslamagem foi encaminhado à segunda etapa de deslamagem, com vazão de 216 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da

segunda deslamagem indicou 80 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 36,9% nesta etapa de deslamagem. O *overflow* desta etapa apresentou 90,8% passantes em 0,045 mm, com P_{80} de 0,029 mm, este último baseado em extrapolação da respectiva distribuição granulométrica.

A terceira etapa de deslamagem foi alimentada pela combinação do *overflow* da quarta deslamagem, bem como pelo *underflow* da segunda etapa de deslamagem, perfazendo 110 t/h de sólidos. O *underflow* dos ciclones da terceira deslamagem indicou 75 t/h de sólidos, resultando assim em partição de 68,7% nesta etapa de deslamagem. O *overflow* desta etapa apresentou 95,4% passantes em 0,045 mm, com P_{80} de 0,022 mm, este último baseado em extrapolação da respectiva distribuição granulométrica.

3.3. Desempenhos comparativos – Configurações do circuito com e sem pré-classificação

Os resultados das amostragens realizadas no circuito de moagem do CMC sob configurações com e sem pré-classificação foram comparados, de forma estabelecer a de melhor desempenho.

Inicialmente foram listados os desempenhos das respectivas etapas de moagem, conforme listados na Tabela 1 que se segue.

Tabela 1. Comparações de Desempenho – Moagens Individuais.

Etapa	Parâmetro	Com Pré-Classificação (Pilha 1638)	Sem Pré-Classificação (Pilha 1664)
Não-Magnético	Vazão de Sólidos (t/h)	537	485
Moagem 02 (320 MB 002)	Vazão de Alimentação do Circuito (t/h)	468	485
	Carga Circulante (%)	429	749
	Vazão de Polpa BP 03 (m^3/h)	2604	3194
	Potência do Moinho (kW)	1850	1850
	Consumo de Energia (kWh/t)	3,95	3,81
	Relação de Redução do Circuito	4,8	4,2
	WI operacional (kWh/t)	12,8	12,1
	kWh por t de < 0,15 mm gerado (kWh/t-0,15mm) no Circuito	12,8	14,2
Moagem 03 (320 MB 003)	Vazão de Alimentação do Circuito (t/h)	339	270
	Carga Circulante (%)	381	362
	Vazão de Polpa BP 32 (m^3/h)	1423	1003
	Potência do Moinho (kW)	1370	1370
	Consumo de Energia (kWh/t)	4,04	5,07
	Relação de Redução do Circuito	2,2	1,5
	WI operacional (kWh/t)	16,3	45,5
	kWh por t de < 0,15 mm gerado (kWh/t-0,15mm) no Circuito	11,5	34,5

Conforme aponta a Tabela 1, a carga circulante da primeira etapa de moagem em moinho de bolas indicou valor muito maior (749%) para a configuração sem pré-classificação - SPC, ante à correspondente carga circulante do circuito com estágio de pré-classificação - CPC (429%). O consumo de energia da configuração CPC foi pouco mais elevado (3,95 kWh/t) do que a configuração SPC (3,81 kWh/t), porém como a primeira apresentou maior relação de redução do que a segunda, o índice de energia por produto gerado ($kWh/t_{<0,15\text{ mm}}$) foi favorável à configuração CPC.

Analogamente, a mesma Tabela 1 indica para a segunda etapa de moagem consumo de energia da configuração CPC menor (4,04 kWh/t) do que a configuração SPC (5,07kWh/t), além de a primeira ter apresentado maior relação de redução do que a segunda. O índice de energia por produto gerado foi amplamente favorável à configuração CPC (11,5 kWh/t_{-0,15 mm}), ante a configuração SPC (34,5 kWh/t_{-0,15 mm}), esta última 200% maior.

4. CONCLUSÕES

O objetivo principal do estudo, ou seja, a obtenção de uma plataforma de modelos ajustados que se prestasse a simulação das operações estudadas, foi alcançado. As simulações realizadas indicaram benefícios do emprego dos recursos de modelagem, tanto no diagnóstico de operação do circuito industrial como na comparação do mesmo com e sem a etapa de pré-deslamagem. Deve-se advertir, porém, que exercícios de simulações mais abrangentes e detalhados podem ser executados com a plataforma desenvolvida.

5. AGRADECIMENTOS

A Vale Fertilizantes S.A., pelo apoio técnico e financeiro, em especial a Luiz Antônio Fonseca de Barros, Sebastião Hipólito e toda equipe do Laboratório de Processo Mineral de Catalão. Aos funcionários do Laboratório de Simulação e Controle da Universidade de São Paulo, pelo apoio nos trabalhos experimentais.

6. REFERÊNCIAS

- BERGERMAN, MG. Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego. 2009. 208 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- DELBIM, F.K. Previsão do desempenho do circuito de moagem SAG da MSF a partir do índice de quebra. 2001. 106 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- DELBONI JR., H. A load-interactive model of autogenous and semi-autogenous mills. 1999. 313 p. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of Queensland, Brisbane, 1999.
- DELBONI JR., H. Nota técnica. 2012. 35 p. Nota técnica interna (NT HDA / VFSA 02 /12 VER. 01 10/12/2012) – Vale Fertilizantes S.A., Araxá, Minas Gerais, 2012.
- FOGGIATTO, B. Previsão de desempenho do circuito de moagem Carajás. 2009. 230 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NASCHEVENG, A.C. Modelagem e simulação do circuito de moagem da Ultrafétil. 2003. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROCHA, B.G. Análises preliminares de desempenho do circuito de moagem da Vale Fertilizantes de Araxá-MG. 2013. 181 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.