

# OTIMIZAÇÃO DA CICLONAGEM DE 33” DO CIRCUITO DE MOAGEM DO SOSSEGO

Mauricio G. Bergerman<sup>1</sup>, Ronaldo Fonseca<sup>1</sup>, Homero Delboni<sup>2</sup>, Marcia Dayrell<sup>3</sup>, Anderson Miranda<sup>1</sup> & Marco A. N. Rosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mina do Sossego – Gerência de processo do cobre - Vale  
Vila do Sossego, s/n – Mina do Sossego – CEP 68537-000 – Canaã dos Carajás, PA  
E-mail: mauricio.bergerman@vale.com

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 – CEP 05.508-900 - São Paulo, SP  
E-mail: hdelboni@usp.br

<sup>3</sup> Instituto de Desenvolvimento Gerencial  
Alameda da Serra, 500 – 2º andar – CEP 34.000-000 – Nova Lima, MG  
E-mail: marciadayrell@uol.com.br

## RESUMO

O circuito de moagem da usina do Sossego é composto por um moinho SAG, dois rebitadores e dois moinhos de bolas. A classificação do circuito fechado de moagem de bolas é realizada com ciclones de 33”, que nesta aplicação, para moagem grosseira e com alta densidade de alimentação, possuem menor eficiência de classificação. O produto da ciclonagem segue direto a etapa de flotação *rougher*. Tendo em vista a alta capacidade nominal deste circuito, de 1.841 tbs/h de alimentação nova, com uma carga circulante de projeto de 300%, pequenas ineficiências na etapa de ciclonagem podem impactar o desempenho da usina como um todo, limitando a alimentação nova. Além disso, a geração de material muito fino na etapa de moagem pode diminuir a recuperação metalúrgica da flotação, tendo em vista que a eficiência para a recuperação de partículas muito finas é tradicionalmente baixa neste tipo de processo. O presente trabalho apresenta os resultados de otimização desta ciclonagem, utilizando as ferramentas de modelagem matemática e simulação, para minimização do *by-pass* de finos dos ciclones, assim como a metodologia seis sigma, para avaliar e quantificar o impacto das variações do processo na granulometria que alimenta a flotação.

PALAVRAS-CHAVE: otimização, ciclonagem, seis sigma, modelamento, classificação, amostragem.

## 1. INTRODUÇÃO

O circuito de cominuição da usina do Sossego, composto de um moinho semi-autógeno, dois rebitadores e dois moinhos de bolas, além de peneiras e ciclones para classificação, é pioneiro no Brasil na utilização de ciclones de 33". O produto deste circuito alimenta a etapa de flotação *rougher*. O circuito completo é descrito em detalhes em Nankran e outros (2007). A Figura 1 ilustra o mesmo.

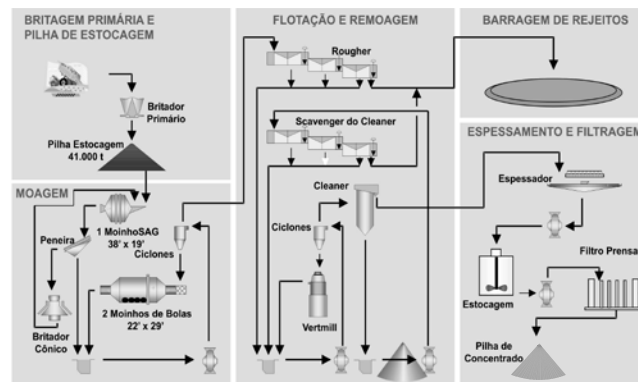


Figura 1 – Fluxograma do processo da usina do Sossego

Ciclones de grande diâmetro, como os utilizados no Sossego, apresentam maior dificuldade de controle operacional, assim como menor eficiência de separação, ou seja, encaminhando uma maior quantidade de finos para o *undeflow* (chamado *by-pass* de finos), em função do tipo de aplicação – moagem grosseira, e da alta porcentagem de sólidos com que são alimentados. Na literatura, valores de *by-pass* de finos acima de 25% são considerados ruins, ou seja, é preciso melhorar a etapa de classificação (Delboni, 2008). Em circuitos com grandes vazões, como o do Sossego, valores acima dos esperados de ineficiências se tornam ainda mais graves, tendo em vista que podem acarretar aumentos significativos de carga circulante da moagem de bolas.

Como efeito secundário do aumento da carga circulante da moagem de bolas, observa-se uma maior geração de finos e ultrafinos na alimentação da flotação. Isso pode levar a uma perda de recuperação nesta etapa, tendo em vista que partículas muito finas, abaixo de 37  $\mu\text{m}$ , tendem a apresentar menor recuperação (Rubio e outros, 2008).

Desta forma, torna-se importante a avaliação e otimização deste tipo de circuito de classificação, visando à minimização da carga circulante da moagem de bolas e aumento da recuperação metalúrgica destes circuitos.

Neste trabalho, a fim de otimizar a etapa de classificação da moagem de bolas da usina do Sossego, realizamos inicialmente uma amostragem na flotação, a fim de identificar como estavam ocorrendo as perdas de cobre para o rejeito, quantificando assim a geração de material ultra fino, que não é recuperado na flotação. Em seguida, foram analisadas as variáveis operacionais da ciclonagem, coletadas no sistema de controle da usina (este sistema é descrito em detalhes em Silva, 2005) a fim de identificar os principais focos de atuação para uma operação mais eficiente. Por fim, foram realizadas amostragens no circuito, a fim de se avaliar, por simulação matemática, a melhor configuração da ciclonagem para uma maior eficiência de classificação.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Avaliação das perdas de cobre no rejeito da flotação

Foi realizada uma amostragem na alimentação e no rejeito da flotação da usina do Sossego, utilizando os amostradores metalúrgico instalado na usina. Este amostrador é composto de uma amostrador primário, do tipo *cross cut*, que realiza um corte ao longo do fluxo de material, retirando uma alíquota representativa do mesmo. Esta alíquota é quarteada, ainda na usina, em dois quarteadores secundários rotativos do tipo *vezin*, que geram como produto uma amostra de tamanho adequado para transporte ao laboratório químico, aonde as amostras são analisadas. A figura abaixo ilustra este sistema de amostragem.



Figura 2 – Sistema de amostragem da flotação do Sossego (a esquerda) e detalhe dos quarteadores rotativos (direita)

A amostra foi coletada ao longo de um dia, com incrementos a cada 15 minutos, de forma a se obter uma amostra representativa do processo. A amostra composta foi encaminhada ao laboratório do Sossego, onde foi realizada análise granulométrica nas seguintes malhas: 210, 150, 106, 75, 54 e 37  $\mu\text{m}$ . O produto abaixo de 37  $\mu\text{m}$  foi classificado novamente em um *cyclosizer*, nas seguintes malhas: 36, 30, 21, 14 e 10  $\mu\text{m}$ . Cabe destacar que as malhas do *cyclosizer* são determinadas pela aplicação de fatores de correção para as condições operacionais do ensaio e para características do minério.

O produto de todas as frações granulométricas, da alimentação e do rejeito da flotação, foram encaminhadas para análise química de cobre, pelo método de absorção atômica.

Foi realizada também uma análise estatística, correlacionando a recuperação metalúrgica com a granulometria de alimentação da flotação, com amostras coletadas no amostrador metalúrgico de alimentação da flotação. Foram utilizadas médias mensais destes valores, que são coletados turno a turno. Esta análise visou à identificação de possíveis correlações entre estas duas variáveis.

## 2.2. Avaliação dos dados operacionais

Inicialmente, foi elaborado um mapa de processo, a fim de identificar quais as principais variáveis que poderiam impactar a granulometria de alimentação da flotação. Em seguida, foram coletados os dados médios, a cada 30 minutos, de um período de 45 dias de operação, de todas as variáveis consideradas críticas (relevantes). Para os dados de granulometria de alimentação da flotação, foram coletados dados a cada turno, durante um ano de operação. Foram elaboradas cartas de controle e gráficos de pareto, no software Minitab 14<sup>®</sup>, a fim de avaliar como se dava a variação dos dados de processo, comparando-os com os valores esperados de projeto. Para a moagem de bolas, o trabalho foi complementado com a realização de diversas amostragens da alimentação e do produto, análise granulométrica das amostras e determinação da relação de redução<sup>2</sup> das mesmas, para diversos dias de operação do moinho, variando apenas a sua porcentagem de sólidos de alimentação.

## 2.3. Identificação de alternativas de mudança na geometria da ciclonação

Para a identificação da melhor geometria de operação dos ciclones, realizamos uma amostragem global no circuito de moagem de bolas e ciclonação. Foram registrados todos os dados operacionais da usina durante a amostragem e as amostras foram encaminhadas ao laboratório do Sossego para análise granulométrica. Com esses dados, realizamos o balanço de massas e a calibração de um modelo de ciclonação, no software JKSimMet<sup>®</sup> versão 5.2. Uma vez calibrado o modelo, pudemos realizar simulações, a fim de identificar a melhor geometria de operação dos ciclones, que gerasse um menor *by-pass* de finos para o underflow dos ciclones, evitando assim a geração de ultrafinos.

<sup>2</sup> Calcula pela diferença entre o passante acumulado do produto e o passante acumulado da alimentação do moinho, dividido pelo retido simples da alimentação, para uma determinada malha.

Foram realizadas também uma série de amostragens, apenas nos ciclones, variando a pressão de operação (55 e 85 kPa), geometria do apex (175 e 195), geometria do vortex (400 e 350) e densidade (1,75 e 1,85). Para a variação do apex e vortex, realizamos a amostragem em dois ciclones diferentes, um com revestimento antigo e outro com revestimento novo. Este experimento foi realizado utilizando o planejamento fatorial de 3 variáveis em dois níveis. Foi feito também um experimento variando a inclinação e comprimento da parte cilíndrica do ciclone e dois níveis de pressão, totalizando quatro amostragens. Os resultados foram avaliados utilizando o método de otimização de respostas, disponível no software Minitab 14<sup>®</sup>.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Avaliação das perdas de cobre no rejeito da flotação

As figuras abaixo ilustram o perfil de distribuição do cobre na alimentação e no rejeito.

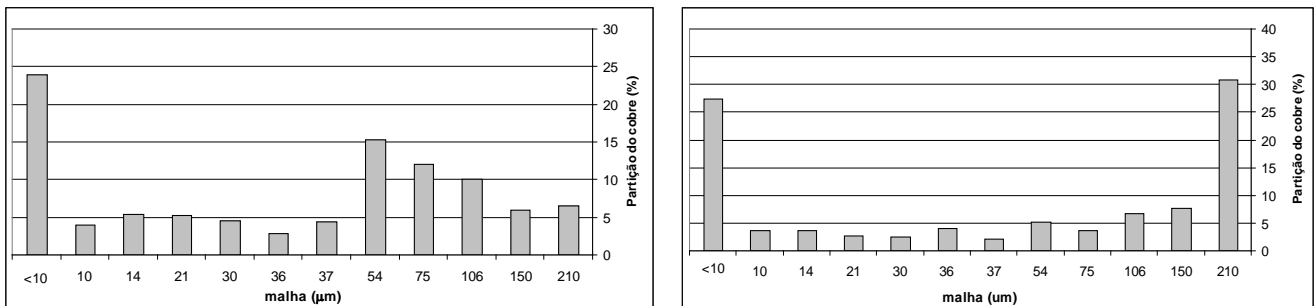


Figura 3 – Partição do cobre na alimentação (à esquerda) e no rejeito (à direita) da flotação

Podemos observar, pela análise das figuras acima, que aproximadamente 25% do cobre que é perdido para a barragem de rejeitos encontra-se abaixo de 10 µm. Ao se observar estas frações em microscópio óptico, pudemos observar que se trata de cobre liberado. Desta forma, podemos concluir que a perda se deveu a sua granulometria.

Nas demais frações granulométricas, com exceção do material retido na malha 210 µm, as recuperações foram muito altas. Na fração retida em 210 µm, a recuperação foi baixa, em função da baixa liberação. Isso mostra que devemos atuar para reduzir a quantidade de material abaixo de 10 µm, porém sem aumentar significativamente a quantidade de material retido em 210 µm, se possível até diminuindo este valor. Cabe ressaltar que esta mesma amostragem foi realizada em diversos outros dias, apresentando resultados semelhantes ao aqui apresentado.

A avaliação da relação entre a granulometria de alimentação da flotação e a recuperação metalúrgica também indicou resultados interessantes, conforme podemos observar na figura abaixo. Existe uma clara tendência de aumento da recuperação metalúrgica com o engrossamento da alimentação da flotação. Deve-se ressaltar que o engrossamento apresentado abaixo respeita os limites aceitáveis para evitar os problemas de liberação das frações mais grosseiras. Se continuássemos aumentando a granulometria de alimentação da flotação acima de 18 ou 20% retido em 210 µm, certamente a recuperação cairia.

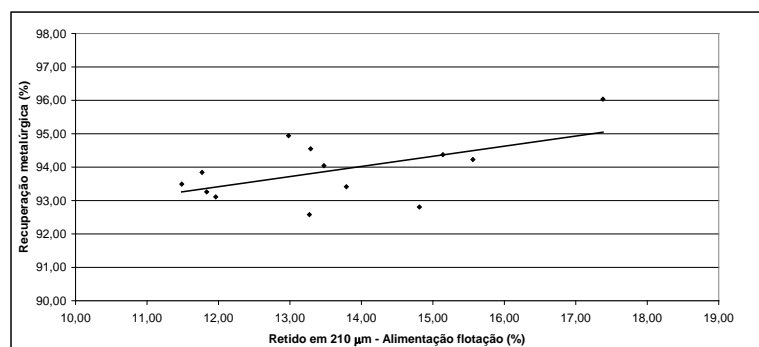


Figura 4 – Correlação entre a recuperação metalúrgica e a granulometria de alimentação da flotação

Desta forma, para a mineralogia atualmente alimentada na usina do Sossego, uma granulometria de alimentação da flotação na faixa de 14 – 17% retido em 210 µm, irá contribuir para uma maior recuperação metalúrgica da usina. Eventualmente, devem-se realizar outras amostragens mais detalhadas do rejeito, para determinação da perda de cobre por faixa granulométrica, para verificar se a mineralogia alimentada a usina não mudou.

### 3.2. Avaliação dos dados operacionais

O mapa de processo com as principais variáveis que impactam a ciclonagem é apresentado na figura abaixo.

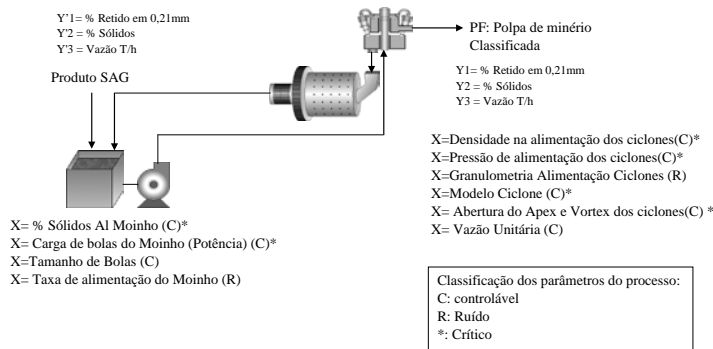


Figura 5 – Mapa de processo do circuito de moagem de bolas do Sossego

Os histogramas e as cartas de controles, elaborados para as variáveis críticas do processo, nos mostraram que algumas médias estavam deslocadas em relação aos valores de projeto. Além disso, a variabilidade também estava acima do esperado. As Figuras 6 e 7 ilustram duas dessas variáveis.

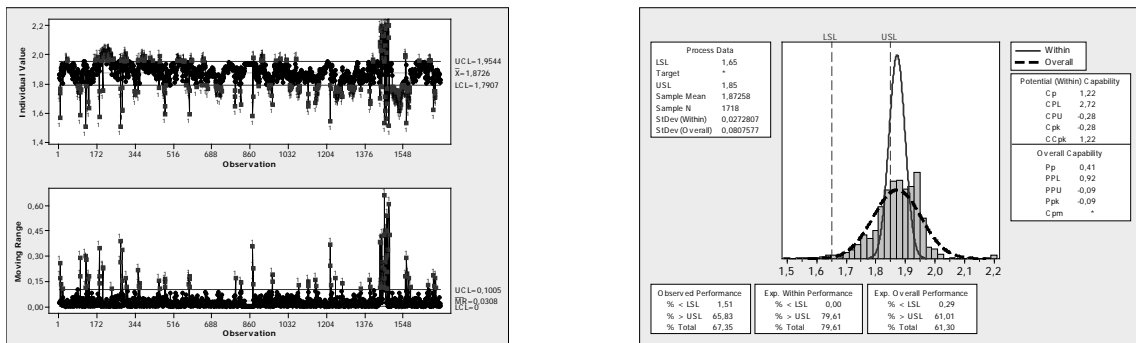


Figura 6 – Carta de controle e histograma da distribuição de dados da densidade de alimentação da flotação

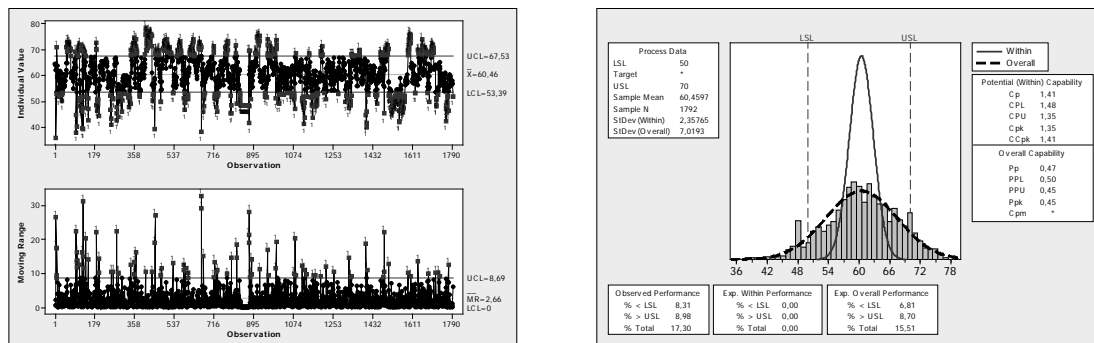


Figura 7 – Carta de controle e histograma da pressão de alimentação da ciclonagem

Podemos observar pela Figura 6 que 61,30% dos valores de densidade de alimentação da flotação estão fora da faixa de interesse. Fica claro também a grande dispersão dos dados. Quanto a variação da pressão da ciclonagem, apresentada na figura 7, podemos observar pelo histograma que estamos trabalhando dentro da faixa desejada, com apenas 15% dos

valores fora dos limites superiores e inferiores de especificação. No entanto, ainda existe espaço para melhoria na diminuição da variabilidade dos dados, pois ainda temos muitas causas especiais (valores acima dos limites superiores e inferiores de especificação), conforme pode ser observado na carta de controle.

Quanto à avaliação da eficiência de moagem para diferentes condições de operação (porcentagem de sólidos), pudemos observar que existe uma significativa perda de eficiência de moagem à medida que aumenta a porcentagem de sólidos do mesmo. O mesmo efeito deveria ser observado para valores baixos de porcentagem de sólidos. No entanto, não foram obtidos dados industriais para valores mais baixos de porcentagens de sólidos. As figuras abaixo ilustram os valores obtidos.

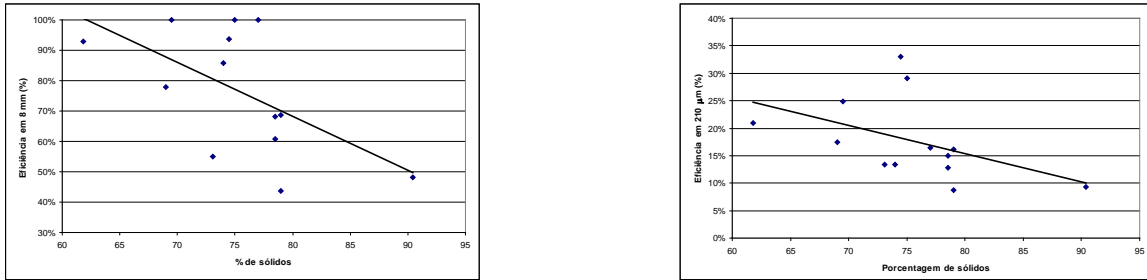


Figura 8 – Eficiência de moagem nas malhas 8 mm e 210 µm em função da porcentagem de sólidos do moinho

Com esta avaliação, ficou claro quais variáveis de processo deveriam ser focadas, no caso a densidade de alimentação dos ciclones e a porcentagem de sólidos dos moinhos de bolas, por apresentarem maior impacto no processo e por atualmente estarem mais deslocadas em relação aos valores considerados ótimos.

### 3.3. Identificação de alternativas de mudança na geometria da ciclonagem

O fluxograma modelado e simulado é apresentado na figura abaixo, assim como a granulometria experimental e simulada para o *overflow*.

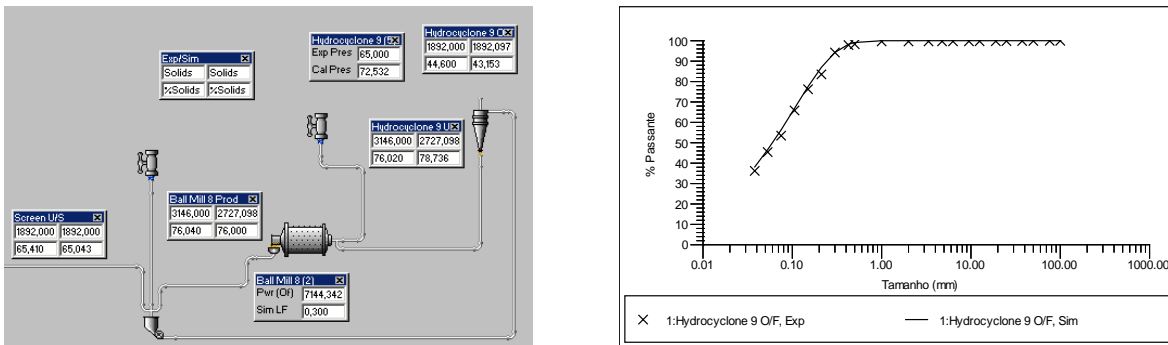


Figura 9 – Fluxograma do circuito modelado e simulado no JKSimMet® e distribuição granulométrica do *overflow*.

A tabela a seguir ilustra as variáveis medidas na usina e os resultados da melhor simulação. Podemos observar que, com mudanças no *apex* e *vortex* da ciclonagem, conseguimos reduzir significativamente a carga circulante, reduzindo também a quantidade de material acima de 210 µm, sem impactar a quantidade de material abaixo de 38 µm.

Tabela 1 – Comparação dos valores medidos e simulados

Valor	Ciclone (m)	Vortex (m)	Apex (m)	Retido 210 µm (%)	Retido 38 µm (%)	Carga circulante (%)
Medido	0,838	0,375	0,175	16,50	63,80	166
Simulado	0,838	0,400	0,165	12,18	61,52	144

O experimento fatorial nos mostrou que o item que mais impacta na granulometria do *overflow* da ciclonagem, independentemente da densidade testada, é a abertura do *apex*, seguido pela abertura do *vortex*. A pressão é a variável que menos influi, isoladamente, neste indicador. O aumento da densidade, de 1,75 para 1,85 t/m<sup>3</sup>, impactou significativamente na granulometria do *overflow*, engrossando a mesma aproximadamente 5% frente aos valores obtidos com as densidades mais baixas. A figura abaixo ilustra os resultados obtidos. É ilustrado também um gráfico para avaliação de influência das variáveis testadas sobre o corte e partição dos ciclones, realizada com a ferramenta de otimizador de resposta de um experimento.

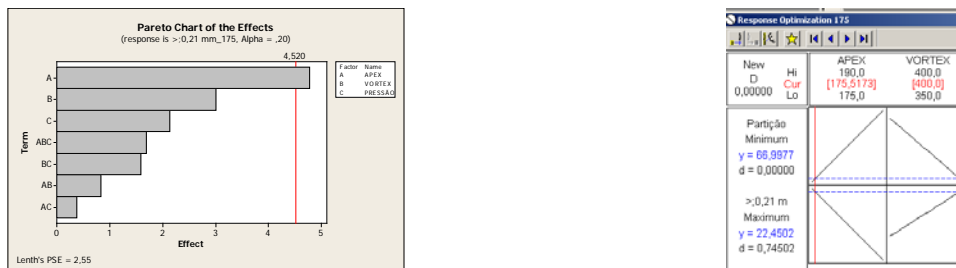


Figura 10 – Resultados do experimento fatorial e otimizador para as variáveis testadas

Podemos observar que o resultado obtido é similar ao da simulação no JKSimMet<sup>®</sup>, indicando para um *vortex* mais aberto, de 400 mm e um *apex* mais fechado, no caso de 175 mm. Estas modificações foram implantadas no circuito industrial e os bons resultados se confirmaram. Dois ganhos secundários, não previstos inicialmente, foram obtidos. O primeiro, se deve ao fato de que com menor carga circulante, a moagem de bolas, que normalmente opera com duas bombas e duas baterias de ciclones, para atingir 100% da carga nominal, consegue atualmente operar com 95% da taxa nominal com apenas uma bomba. Antes desta adequação, esse valor não passava de 85%. O segundo se deve ao aumento da vida útil dos revestimentos usados nos ciclones. Aproveitando a necessidade de mudança nos tamanhos dos revestimentos, foi realizado junto ao fornecedor um teste com novos materiais. Um novo material cerâmico, substituindo o então usado, de borracha, apresentou uma vida mais de 25 vezes maior que o anterior. Mesmo com um custo 15 vezes maior que o revestimento de borracha, o ganho com este novo material é significativo, pois além do custo do revestimento, existe uma economia com mão de obra e perdas de produção quando a bateria é parada para manutenção.

#### 4. CONCLUSÕES

As amostragens realizadas na flotação mostraram que as maiores perdas de cobre no rejeito estão nas frações abaixo de 10 µm e acima de 210 µm. A análise estatística realizada nas variáveis críticas de processo mostrou quais as variáveis que estavam operando fora de sua especificação ou com variabilidades acima das aceitáveis. Com esses dados, a ação para resolver o problema pode ser focada.

A modelamento e simulação do circuito, assim como a avaliação dos dados de um experimento fatorial, mostraram qual a geometria ótima de operação dos ciclones. Trabalhando-se com esta geometria ótima e com um controle rígido nas variáveis críticas de processo, pode-se obter uma granulometria ótima de alimentação da flotação, com uma menor carga circulante na moagem de bolas, levando assim a ganhos de recuperação metalúrgica e de vazão de alimentação da usina.

Vale destacar também que este resultado de tamanho ótimo de alimentação da flotação não pode ser considerado como uma verdade para todo o depósito. Com a evolução da cava e mudança do minério de alimentação a usina, deve-se sempre atentar para possíveis modificações na mineralogia, que levem a outras granulometrias de liberação. Assim, amostragens e avaliações mineralógicas devem ser realizadas continuamente, de forma a se trabalhar sempre com um valor ótimo de granulometria de alimentação da flotação.

## 5. REFERÊNCIAS

- Bergerman, M.B.; Delboni, H.; Nankran, M. Estudo de variabilidade e otimização do circuito de moagem sag da usina do sossego. In: Revista da Escola de Minas, Coelho, J. (editor), Ouro Preto. 62(1): 93-97. jan – mar 2009.
- Delboni Jr. H.; Modelagem e Simulação de Circuitos de Cominuição e Classificação – Dimensionamento de ciclones. Apostila. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- Nankran, M.; Bergerman, M.; Miranda, A.; Oliveira, J.; Souza, M.; Batista Filho, J.; Cardoso, W. Controle operacional da usina do sossego, Anais do XXI Encontro Nacional de Tratamento de minérios, p. 502 – 512, Ouro Preto, Brasil, 2007.
- Rubio, J.; Capponi, F.; Rodrigues, R.; Matiolo, E. Optimizing the flotation of sulfide fines using emulsified oil extender technique, Anais do XII Balkan Mineral Processing Congress, p. 245 – 250, Delphi, Brasil, 2007.
- Silva, F. M.; Modelagem do circuito de moagem da usina do Sossego (CVRD) através de redes neurais artificiais. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 156 p., 2005.