

ESTUDO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE TESTES DE BANCADA COM A OPERAÇÃO INDUSTRIAL NA MINERAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA

Laura Rodrigues Alves Soares ¹

Marco Aurélio Soares Martins ²

Armando Fernandes da Veiga Rodrigues ³

Maurício Segato ⁴

Klaydison Silva ⁵

Resumo

Nos projetos de beneficiamento mineral, é crucial garantir a eficiência dos equipamentos, sujeita à variabilidade intrínseca do comportamento dos minérios frente à mesma operação. Para caracterizar o minério são utilizados testes de bancada e piloto. Testes piloto geralmente são onerosos. Logo, feitos com poucas amostras. Testes de bancada são mais baratos e é viável realizá-los para mais amostras, representando melhor a diversidade do depósito mineral. Entretanto, a replicabilidade desses resultados na escala industrial não é definida. Visando verificar a aderência destes testes à prática industrial, os resultados de operação de uma planta foram confrontados com os de uma simulação dinâmica, calibrada com dados de testes de bancada. O ROM (*run of mine*, ou minério bruto) da planta foi rastreado e, então, obtidas misturas das amostras da reserva que o representassem segundo critérios de granulometria e teores. A usina possui peneiramento, separação magnética, deslamagem e flotação, sendo que há testes de bancada para os três últimos. Assim, através de uma simulação dinâmica, utilizando as paradas reais e uma estratégia de controle similar à praticada na planta, foi possível determinar uma produção teórica, que seria obtida caso os testes de bancada representassem fielmente a operação. Verificou-se aderência razoável para a flotação e a deslamagem e pouca aderência para a separação magnética.

Palavras-chave: Mineração; Minério de ferro; Modelagem e simulação; *Scale-up*.

COMPARATIVE BETWEEN LABORATORY TESTS RESULTS AND THE INDUSTRIAL OPERATION IN MINING USING DYNAMIC SIMULATION

Abstract

In mineral processing projects, it is crucial ensure the equipment efficiency, highly influenced by the intrinsic variability of ore characteristics. To characterize the ore, laboratory and pilot tests are conducted. Pilot tests are generally expensive, so they are performed only for a few samples. Laboratory tests are cheaper, and, therefore, can be carried out using more samples for better representation of the ore reserve diversity. However, the repeatability of results in industrial scale is not defined. In an effort to verify the accordance between these tests and the industrial practices, the results of a plant operation were compared to the results of a dynamic simulation, calibrated with data from laboratory tests, for the period of one year. Initially, the plant ROM (*run of mine*) was tracked. Then, sample mixtures that represented its characteristics, such as content and size distribution, were obtained. The plant has screening, magnetic separation, desliming, and flotation operations and laboratory tests are available for the last three mentioned processes. Thus, the process was simulated, using the real plant downtime, and a control strategy similar to that practiced in the plant, so that it was possible to determine a theoretical output that would be obtained if laboratory testing accurately represented the operation. It was observed that there was acceptable conformity in the flotation and desliming process and little conformity in magnetic separation.

Keywords: Mining; Iron ore; Modelling and simulation; *Scale-up*.

¹Engenheira Química, CEMI, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: laura.rasoares@gmail.com

²Engenheiro de Minas, CEMI, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: marco@cemi.eng.br

³Engenheiro de Minas, Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: armando.rodrigues@vale.com

⁴Engenheiro de Minas, Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: mauricio.segato@vale.com

⁵Engenheiro de Minas, Vale S.A., Nova Lima, Brasil. E-mail: klaydison.silva@vale.com

I INTRODUÇÃO

Em um projeto de uma nova indústria de processamento mineral são, normalmente, utilizados resultados da caracterização mineralógica para definição das operações unitárias, desenho da rota de processo e dimensionamento dos equipamentos. A priori, são definidos objetivos como a produção anual, a recuperação metalúrgica e a qualidade do produto final. O processo de caracterização mineralógica é, geralmente, composto por testes em escala de bancada e em escala piloto.

Os testes em escala piloto são mais representativos da escala industrial, logo seus resultados são de grande importância para execução de um projeto confiável. Porém, os testes piloto são, em geral, onerosos e demorados e, portanto, feitos com apenas algumas amostras cujas características se assemelham às características médias do ROM (*run of mine*, ou minério bruto). Já os testes em escala bancada são mais baratos e rápidos, sendo viável realizá-los para um número maior de amostras, representando melhor a diversidade do depósito mineral. Entretanto, a replicabilidade dos resultados na escala industrial não é definida.

Com o objetivo de verificar a aderência destes testes à prática industrial, foi feito um confronto dos resultados da operação de uma planta com os resultados de uma simulação dinâmica, calibrada com dados de testes de bancada. Uma planta de beneficiamento é um sistema dinâmico que muda continuamente em função do tempo, mas com restrições probabilísticas que podem ser estimadas pela aplicação de ferramentas e técnicas estatísticas às variáveis e variâncias que interagem no sistema [1].

Foi escolhida para o estudo uma planta de beneficiamento de minério de ferro que produz: granulado (GR, >8mm), *sinter feed* natural (SFN, >1mm <8mm), *sinter feed* da separação magnética (SFSM, >0,15mm <1mm), que juntos formam o *sinter feed* total (SF), e *pellet feed* (PF, <0,15mm).

A planta possui as operações de peneiramento, separação magnética de média intensidade, deslamagem e flotação, sendo que há testes de bancada para as três últimas operações. Há, ainda, grande disponibilidade de informações sobre:

- mineralogia das diversas litologias presentes na mina, através de testes em bancada com amostras de furo de sonda;
- planejamento de lavra - participação de cada litologia na alimentação anual e caracterização grânulo-química das litologias;
- pilhas de homogeneização - volume e período de processamento;
- alimentação - taxa horária e análises grânulo-químicas;
- produção - taxa horária e análises grânulo-químicas;
- qualidade dos produtos - grânulo-química;

- estratégias de controle manual e automático implantadas na usina;
- horário e duração das paradas dos equipamentos; e
- parâmetros operacionais e informações dos equipamentos.

Uma simulação procura modelar um sistema ou processo, dando apoio à tomada de decisão, possibilitando sua redução de riscos e custos. Cada vez mais, essa tecnologia faz parte do dia a dia dos analistas, sendo vista como uma técnica/ferramenta para verificar e encaminhar soluções aos problemas encontrados nos mais diversos segmentos industriais [2].

A simulação de processo mineral baseada em modelos matemáticos é uma ferramenta ágil e poderosa para consistente e sistemática análise de processo, sendo largamente empregada nas rotinas operacionais de usinas existentes e no desenvolvimento de novas rotas de processo. Um software de simulação é um pacote que associa modelos matemáticos, que representam adequadamente uma operação unitária, fenômenos de transporte e circuito. Em geral, um modelo é concebido para investigar os efeitos das mudanças e interações entre uma série de variáveis [1].

Os modelos matemáticos podem ser obtidos pela modelagem fenomenológica ou empírica, ou ainda por uma combinação de ambas. Na primeira, desenvolve-se um modelo teórico aplicando-se os princípios básicos da física e/ou química. Já a modelagem empírica baseia-se na observação direta dos dados operacionais do processo obtidos através de experimentação. Neste caso, sinais de entrada e saída do sistema são registrados e submetidos a uma análise para se obter um modelo [3].

A simulação dinâmica é a representação dos processos no decorrer de um determinado tempo. O que a torna especial é, justamente, a característica de incluir nas análises de processo a sucessão de eventos prováveis, que são dificilmente percebidos na realização de um projeto convencional. A utilização da simulação dinâmica contribui no entendimento do comportamento das interações do circuito, às vezes complexas e não-lineares [4] e representa um novo marco no campo da otimização de processos minerais. A possibilidade de simular, utilizando inferências estatísticas, a variabilidade natural dos parâmetros de uma planta, bem como a variabilidade da alimentação, conduz a resultados que podem mostrar o horizonte de toda a operação ao longo de um determinado período.

2 METODOLOGIA

Como recurso para simulação estática de processos, utilizou-se o software UsimPac [5], desenvolvido pela BRGM, que permite a descrição e análise do minério por componentes distintos. Como recurso para simulação dinâmica de processos, utilizou-se o sistema OptSim® [6], desenvolvido pela CEMI, que é constituído pelos seguintes elementos:

- um simulador estático externo (UsimPac), que representa a cada momento a realidade da planta;
- um banco de dados, onde se podem buscar informações da variabilidade da planta, para alterar os parâmetros de entrada do simulador estático a cada ciclo, além de servir para armazenar os resultados obtidos;
- uma estrutura com sistema especialista, utilizando lógica nebulosa, composta de diversos módulos, sendo os principais: gerenciamento de ações, estatística condicional e sintonia avançada.

A Figura 1 ilustra a estrutura do Sistema OptSim®.

O módulo de gerenciamento de ações, sistema especialista, foi configurado para tomar as decisões usuais dos operadores.

Inicialmente, foi feita uma calibração no simulador estático para cada uma das amostras caracterizadas nos testes em bancada. Como cada pilha de homogeneização é composta por até seis litologias diferentes, essas amostras foram agrupadas em combinações aleatórias de até seis litologias formando um extenso banco de dados.

Para cada pilha de homogeneização processada no intervalo de um ano, foi selecionada no banco de

dados uma combinação de amostras cujas características granulo-químicas médias mais se assemelham às da pilha.

Posteriormente, para cada uma dessas pilhas de homogeneização, foi executada uma simulação dinâmica utilizando os dados da combinação de amostras correspondentes e com duração equivalente à duração da pilha. Nessas simulações, cujos modelos foram calibrados com os resultados de testes de bancada, foram incorporados os eventos de paradas dos equipamentos de acordo com o registro real e estratégias de controle manual e automático semelhantes às praticadas na usina.

Foi possível, então, determinar uma produção teórica, que seria obtida caso os testes de bancada representassem fielmente a operação. Foi utilizada na simulação a maior quantidade possível de dados reais - dados de equipamentos, o regime de quebras, características e duração das pilhas de homogeneização - de modo a avaliar apenas a eficiência e a representatividade da técnica de simulação com resultados de testes em bancadas.

2.1 Fluxograma

Na Figura 2, encontra-se o fluxograma do processo estudado.



Figura 1. Estrutura do OptSim.

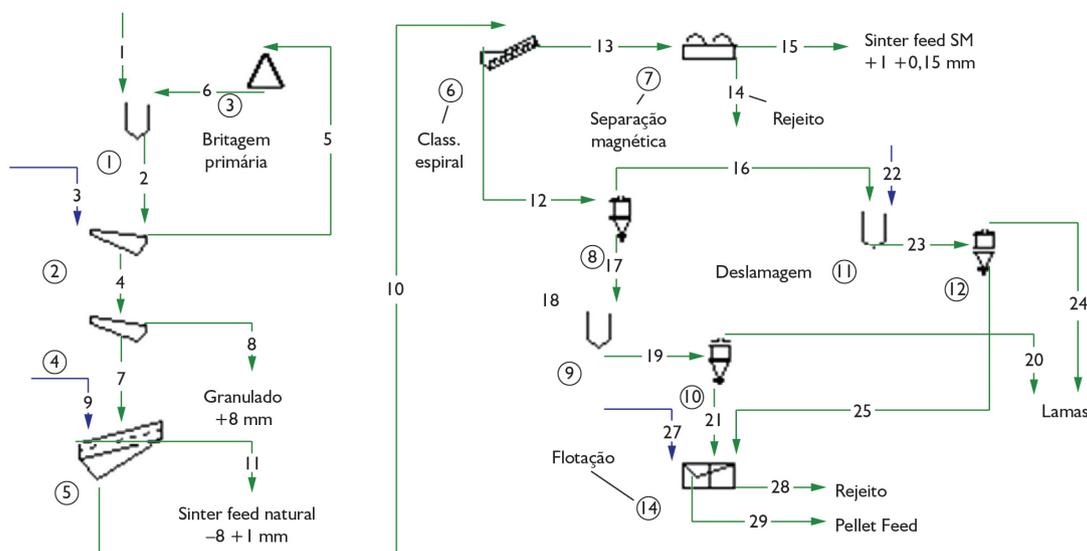


Figura 2. Fluxograma do processo estudado.

2.2 Modelos

Para representar os separadores magnéticos de média intensidade e a flotação no simulador estático, foi utilizado um modelo do UsimPac cujos parâmetros são as recuperações mássicas por componente da alimentação para o concentrado ou para o rejeito. A recuperação mássica para um componente i é dada pela Equação 1.

$$\text{Recuperação}_i = \frac{Q_{\text{Fasel},i}}{Q_{\text{Alimentação},i}} * 100 \quad (1)$$

Em que Q é a vazão mássica do componente.

Na separação magnética, os parâmetros do modelo foram calibrados de forma que os teores de ferro e sílica no concentrado e a recuperação mássica fossem os mesmos dos obtidos em teste de laboratório para a amostra. O rejeito foi calculado de acordo com o fechamento do balanço de massa.

Nas colunas e células de flotação, os parâmetros do modelo foram calibrados de forma que os teores de ferro e sílica no concentrado fossem os mesmos dos obtidos em teste de laboratório para a amostra e o teor de ferro no rejeito foi fixado de acordo com o praticado na usina. A recuperação mássica foi calculada pelo fechamento do balanço de massa.

Para representar os hidrociclones da deslamagem foi utilizado o modelo de Plitt [7].

2.3 Formação de Pilhas

Com o intuito de gerar o banco de dados com as pilhas para a simulação, foram misturadas 6 amostras sorteadas aleatoriamente sendo que, cada uma, tinha um percentual também aleatório, mas mínimo de 10% na pilha. Dentre as cerca de 15.000 pilhas geradas no banco de dados, foram selecionadas as 46 mais parecidas com aquelas que efetivamente foram consumidas no ano estudo, chamadas pilhas de referência, segundo os seguintes critérios:

- porcentagem maior que 1 mm;
- teor global de sílica;
- teor global de ferro;
- teor de ferro na fração menor que 0,15 mm; e
- teor de ferro na fração maior que 1 mm.

Para a seleção da pilha mais parecida com a primeira das 46 pilhas de referência, ou seja, aquelas que foram efetivamente consumidas na planta, foram analisadas cinco características: porcentagem maior que 1 mm, teor global de sílica, teor global de ferro, teor de ferro na fração menor que 0,15 mm e teor de ferro na fração maior que 1 mm. Para essa primeira pilha de referência, observou-se qual dentre as cinco características consideradas era mais próxima numericamente dela (menores diferenças). Encontrada esta característica (característica 1), foram selecionadas 40 pilhas dentre as cerca de 15.000

geradas no banco de dados para a simulação que tinham as menores diferenças para o valor de referência dentro da Característica 1 somente. Usando agora essas 40 pilhas selecionadas como amostra, repete-se o processo de análise das diferenças para escolha da segunda característica (Característica 2) mais próxima numericamente da referência, retirando-se a Característica 1 da análise. Foram escolhidas as 30 pilhas mais próximas para compor a nova amostra. Repete-se o processo para as três demais características, escolhendo 20, 10 e, finalmente, 1 pilha. Essa pilha final foi selecionada como a mais parecida com a primeira das 46 de referência. Essa mesma metodologia foi aplicada para as 45 pilhas de referência restantes.

2.4 Geração dos Parâmetros de Recuperação por Componente da Separação Magnética e da Flotação

Cada uma das amostras foi alimentada no simulador com uma taxa fixa até a estabilização da operação para se obter a massa e o teor global de ferro e sílica do fluxo que alimenta a separação magnética e do que alimenta a flotação.

Isso é necessário, pois parte da alimentação nova da planta se torna granulada e *sinter feed* natural antes de alimentar a separação magnética de média intensidade. E, antes de alimentar a flotação, além da saída desses produtos já mencionados, há, ainda, o concentrado e o rejeito da separação magnética e a lama retirada na deslamagem. Como há grandes variações de teores de sílica e ferro nas faixas granulométricas, as alimentações da separação magnética e da flotação possuem teores diferentes do ROM da planta. Além disso, entre as amostras, devido às diferentes granulometrias, a massa que chega a cada um desses processos, mesmo que a taxa de alimentação do ROM seja a mesma, é diferente.

No caso da separação magnética, os teores de ferro e sílica no concentrado e a recuperação mássica na simulação deveriam ser os mesmos obtidos em teste de laboratório para as amostras. Para obter as recuperações por componente da mistura, seguiram-se as seguintes etapas de cálculo:

- Cálculo dos teores de ferro e sílica da alimentação da separação magnética: calculados fazendo a média da alimentação obtida pelo simulador ponderada pela porcentagem da amostra no ROM e pela massa que alimenta a separação magnética obtida no teste no simulador;
- Cálculo da recuperação mássica da mistura: calculada fazendo a média das recuperações mássicas dos testes de laboratório ponderadas pela porcentagem daquela amostra no ROM e pela massa que alimenta a separação magnética;
- Cálculo dos teores de ferro e sílica no concentrado da mistura: calculados fazendo a média dos teores obtidos no teste de laboratório ponde-

rada pela porcentagem da amostra no ROM, pela massa que alimenta a separação magnética e pela recuperação mássica daquela amostra;

- Cálculo dos teores do rejeito: calculados de acordo com o fechamento do balanço de massa;
- Cálculo da recuperação por componente da mistura: calculados usando os teores de ferro, sílica e ganga na alimentação e no concentrado e a recuperação mássica.

No caso da flotação, os teores de ferro e sílica no concentrado deveriam ser os mesmos obtidos em teste de laboratório para as amostras e o teor de ferro do rejeito é o praticado na usina no ano estudado. Para obter as recuperações por componente da mistura, seguiram-se as seguintes etapas de cálculo:

- Cálculo da recuperação mássica de cada uma das amostras componentes da mistura: calculada usando o ferro na alimentação obtido no simulador e o ferro no rejeito fixado;
- Cálculo dos teores de ferro e sílica da alimentação da flotação: calculados fazendo a média da alimentação obtida no simulador ponderada pela porcentagem da amostra no ROM e pela massa que chegava à flotação obtida no teste no simulador;
- Cálculo dos teores de ferro e sílica no concentrado: calculados fazendo a média dos teores obtidos no teste de laboratório ponderada pela porcentagem da amostra no ROM, pela massa que alimenta a separação magnética e pela recuperação mássica daquela amostra;
- Cálculo da recuperação mássica da mistura: calculada fazendo o balanço de massa;
- Cálculo do teor de sílica do rejeito: calculado de acordo com o fechamento do balanço de massa;
- Cálculo da recuperação por componente da mistura: calculados usando os teores de ferro, sílica e ganga na alimentação e no concentrado e a recuperação mássica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Alimentação, Produção, Recuperação Mássica e Geração de Rejeitos

No período estudado, foram alimentadas 14,6 milhões de toneladas na usina. No simulador, usando o sistema de controle otimizante para definir a taxa de alimentação, foram alimentadas 14,7 milhões de toneladas considerando o mesmo período. A diferença percentual é de 0,7%.

É importante ressaltar que a estratégia de controle utilizada na simulação dinâmica não é uma mímica perfeita do controle via operador. Ambos manipulam a taxa de

alimentação da usina explorando os limites dos equipamentos e das operações unitárias de modo a maximizar a taxa de alimentação e evitar sobrecarga de equipamentos. Contudo, as dinâmicas dos dois controles são ligeiramente diferentes no que se refere à frequência de atuação e tamanho dos incrementos nas taxas e vazões.

Do ROM que alimentou a usina, 56% se transformaram em produtos com a distribuição mostrada na Figura 3 e recuperação com relação ao ROM mostrada na Figura 4. Os produtos da usina são: granulado (GR, >8mm), *sinter feed* natural (SFN, >1mm <8mm), *sinter feed* da separação magnética (SFSM, >0,15mm <1mm), que juntos formam o *sinter feed* total (SF, >0,15mm <8mm), e *pellet feed* (PF, <0,15mm).

Do ROM que alimentou o simulador, 69% se transformaram em produtos, a diferença para o realizado na usina é de 13 pontos percentuais. A distribuição de produtos está representada na Figura 5 e recuperação com relação ao ROM mostrada na Figura 6.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre a distribuição de produtos executada e a simulada.

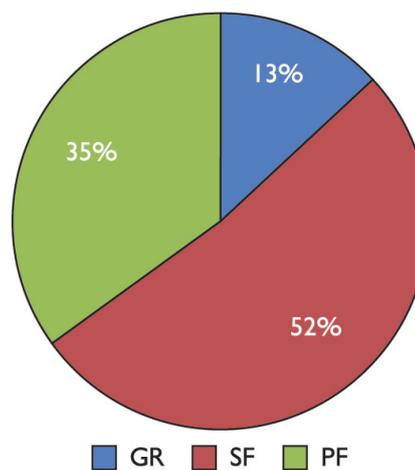


Figura 3. Distribuição dos produtos da usina.

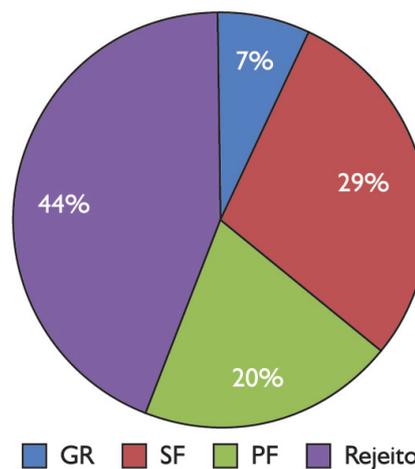


Figura 4. Recuperação dos produtos da usina com relação ao ROM.

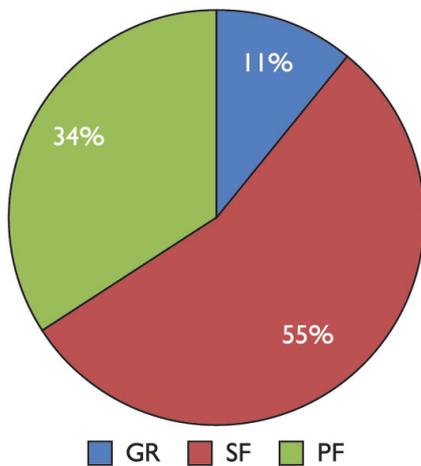


Figura 5. Distribuição dos produtos do simulador.

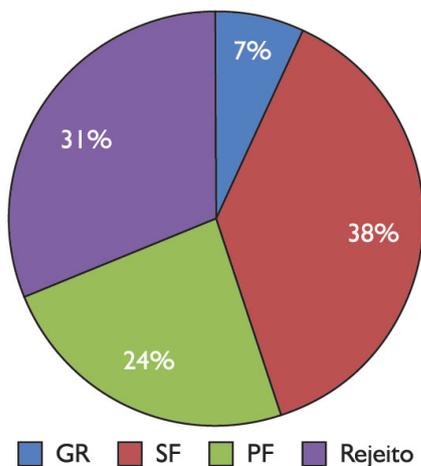


Figura 6. Recuperação dos produtos com relação ao ROM no simulador.

3.2 Sinter Feed

O *sinter feed* total (SF) produzido na usina é composto pelo *sinter feed* natural (SFN) e pelo concentrado da separação magnética (SFSM). Na usina, foram produzidas 3,2 milhões de toneladas de *sinter feed* natural, ou seja, 21,8% do ROM. Na simulação, foram produzidas 3,7 milhões de toneladas, ou seja, 25,6% do ROM. Esses dados encontram-se na Tabela 2.

Como explicado no item 2.2, a fração > 1 mm foi um dos critérios de seleção das pilhas para compor o ROM do simulador e, portanto, é bem próxima do valor executado. A faixa do *sinter feed* natural é, entretanto, composta por +1 -8 mm. A faixa granulométrica disponível no ROM executado na usina é +10 mm e não +8 mm, logo a fração +1 -8 mm do *sinter feed* natural não pode ser diretamente comparada entre o ROM simulado e executado e pode haver diferenças não contempladas. O comparativo da granulometria do ROM executado e simulado está na Tabela 3, e há pequenas diferenças nas faixas +10 mm e +1 -10 mm.

A fração passante em 1 mm no *sinter feed* natural simulado é, em média, 13,1% já a média da usina é de cerca de 10%. Sendo assim, uma parte da maior produção de *sinter feed* natural na simulação pode ser atribuída à maior fração de finos.

Na usina, foram produzidas 1,0 milhão de toneladas de concentrado da separação magnética com recuperação mássica de 29,8%. Já no simulador, foram produzidas 1,9 milhões de toneladas, com recuperação de 57,8%.

Os testes de separação magnética de laboratório são feitos quase que exclusivamente com a fração -1 +0,15 mm, já que eficiência do peneiramento de laboratório é muito alta. Logo, os resultados de recuperação

Tabela 1. Comparativo entre os produtos executados e simulados (valores em Mt)

| Fluxo | Executado | Simulado | Diferença (%) |
|----------------------------------------|-----------|----------|---------------|
| ROM | 14,6 | 14,7 | 1 |
| Granulado | 1,0 | 1,0 | 1 |
| <i>Sinter Feed</i> Natural | 3,2 | 3,8 | 16 |
| <i>Sinter Feed</i> Separação Magnética | 1,0 | 1,9 | 47 |
| <i>Pellet Feed</i> | 2,9 | 3,5 | 17 |

Tabela 2. Comparativo do SFN, SFSM e SF executado e simulado (valores em Mt)

| Executado | | | | |
|---------------|-------------|-------|-------|--------|
| | Alimentação | SFN | SFSM | SF |
| Total | 14,6 | 3,2 | 1,0 | 4,2 |
| % Alimentação | 100% | 21,8% | 7,1% | 28,8% |
| % SF Total | - | 75,4% | 24,6% | 100,0% |
| Simulado | | | | |
| | Alimentação | SFN | SFSM | SF |
| Total | 14,7 | 3,8 | 1,9 | 5,6 |
| % Alimentação | 100% | 25,6% | 12,7% | 38,3% |
| % SF Total | - | 66,8% | 33,2% | 100,0% |

mássica obtidos são exclusivos para essa fração. Tanto na usina quanto no simulador, há cerca de 30% passante em 0,15 mm na alimentação do separador. Para essa fração fina, a recuperação mássica é consideravelmente inferior, como pode ser visto nos resultados de um teste industrial mostrado nas Tabelas 4 e 5.

Pelos resultados na Tabela 5, é possível observar que a recuperação mássica na fração menor que 0,15 mm é apenas 57% da recuperação na fração maior que 0,15 mm.

Com os resultados obtidos no simulador, pode-se considerar que há, em média, 30% passante em 0,15 mm na alimentação do separador magnético. Pode-se assumir, ainda, baseando-se na Tabela 5, que a recuperação dessa faixa é 57% da recuperação do laboratório média, 57,8%. A recuperação calculada seria, então, 50%, um valor ainda consideravelmente acima dos 29,8% obtidos industrialmente. É possível perceber, também, que a recuperação mássica obtida nesse teste na faixa maior que 0,15 mm foi de 41%, também muito inferior à média de 57,8% da recuperação de laboratório. Esses dados apontam para a

necessidade de um fator de *scale-up* dos testes de laboratório para aplicações industriais.

3.3 Pellet Feed

Na usina, foram produzidas 2,9 milhões de toneladas de concentrado na flotação com recuperação mássica de 61%. Já no simulador, foram produzidas 3,5 milhões de toneladas, com recuperação de 65%. O teor de ferro dos concentrados ficou bastante próximo: 68,1% no simulado e 68,0% no executado. Entretanto, a alimentação da flotação simulada média, 49,8% de Fe, era mais rica que a executada, 47,5% de Fe. Como pode ser visto na Tabela 6, a fração menor que 0,15 mm no ROM simulado, 52,6% de Fe, era mais rica que no ROM executado, 50,9%.

É importante observar que, ao constituir o ROM simulado, foram adotados os critérios mencionados no item 2.2. Há, ainda, claramente, outros critérios que influenciam nas partições de massa e teores dos produtos como, por exemplo, o teor de Fe na fração menor que 0,15 mm. Entretanto, fica muito complicado, na prática,

Tabela 3. Comparativo da granulometria do ROM executado e do simulado (valores em porcentagem)

| | +10 | -10 +1 | +1 | -1 +0,15 | -0,15 |
|-----------|-------|--------|-------|----------|-------|
| Executado | 11,38 | 22,92 | 34,30 | 14,71 | 50,98 |
| Simulado | 12,64 | 21,41 | 34,13 | 17,52 | 48,43 |

Tabela 4. Resultados da análise química por faixa do teste no separador magnético industrial (valores em porcentagem)

| Malhas (mm) | Alimentação | | Concentrado | | Rejeito | |
|---------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| | Fe | % Ret. Simples | Fe | % Ret. Simples | Fe | % Ret. Simples |
| 1,00 | 60,21 | 17,10 | 65,02 | 21,50 | 54,28 | 9,00 |
| 0,60 | 57,10 | 12,00 | 65,48 | 15,80 | 51,60 | 7,30 |
| 0,50 | 53,88 | 6,30 | 65,51 | 9,30 | 47,49 | 5,10 |
| 0,25 | 47,56 | 21,70 | 65,99 | 23,30 | 38,88 | 21,30 |
| 0,15 | 46,47 | 14,00 | 66,71 | 14,20 | 37,87 | 16,50 |
| 0,11 | 45,60 | 6,30 | 66,84 | 5,50 | 37,44 | 8,40 |
| 0,08 | 49,25 | 6,10 | 66,60 | 4,00 | 43,92 | 7,90 |
| 0,05 | 57,58 | 6,50 | 67,07 | 3,40 | 54,58 | 10,40 |
| -0,045 | 57,58 | 10,00 | 67,07 | 3,00 | 54,58 | 14,10 |
| Global | 52,75 | 100,00 | 65,90 | 100,00 | 45,59 | 100,00 |

Tabela 5. Cálculo das recuperações mássicas na fração maior e menor que 0,15 obtidas no teste do separador magnético industrial (valores em porcentagem)

| | Fe Alimentação | Fe Concentrado | Fe Rejeito | Rec. Mássica |
|---------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| +0,15 | 52,56 | 65,71 | 43,25 | 41% |
| -0,15 | 53,21 | 66,87 | 48,99 | 24% |
| Global | 52,75 | 65,90 | 45,59 | 35% |

Tabela 6. Comparativo do teor de Fe por faixa do ROM executado e simulado (valores em porcentagem)

| | +10 | -10 +1 | -1 +0,15 | -0,15 |
|-----------|-------|--------|----------|-------|
| Executado | 63,37 | 65,09 | 47,96 | 50,90 |
| Simulado | 63,24 | 64,42 | 44,97 | 52,61 |

Tabela 7. Comparativo do teor de ferro e sílica dos produtos executado e simulado (valores em porcentagem)

| Produto | Teor de Ferro | | | Teor de Sílica | | |
|-------------|---------------|----------|----------------------|----------------|----------|----------------------|
| | Executado | Simulado | Diferença Percentual | Executado | Simulado | Diferença Percentual |
| Granulado | 64,63 | 64,13 | 0,8% | 4,14 | 4,21 | 1,6% |
| Sinter Feed | 64,52 | 63,54 | 1,5% | 4,29 | 5,95 | 38,7% |
| Pellet Feed | 67,98 | 68,11 | 0,2% | 0,87 | 0,64 | 26,2% |

Tabela 8. Comparativo da teor de sílica por faixa do ROM executado e simulado (valores em porcentagem)

| | +10 | -10 +1 | -1 +0,15 | -0,15 |
|----------------------|-------|--------|----------|-------|
| Executado | 5,83 | 3,68 | 27,55 | 23,62 |
| Simulado | 5,21 | 4,40 | 33,14 | 21,19 |
| Diferença percentual | 10,6% | -19,6% | -20,3% | 10,3% |

Tabela 9. Descrição e comparação do teor de sílica por faixa do ROM executado e simulado (valores em porcentagem).

| Faixas | Executado | | | Simulado | | | Dif. | Valor-p* |
|----------|-----------|------|------|----------|------|------|-------|----------|
| | Média | D.P. | Med. | Média | D.P. | Med. | | |
| +10 | 5,87 | 1,19 | 5,72 | 5,60 | 6,65 | 3,32 | 2,40 | <0,001 |
| -10 +1 | 3,84 | 0,78 | 3,76 | 4,62 | 3,78 | 3,48 | 0,28 | 0,293 |
| -1 +0,15 | 27,2 | 5,18 | 26,1 | 32,7 | 11,5 | 32,1 | -6,00 | <0,001 |
| -0,15 | 23,7 | 3,29 | 23,3 | 21,2 | 9,53 | 20,5 | 2,80 | 0,014 |

* Teste de Mann-Whitney

gerar pilhas que atendam a um número maior de critérios do que os que foram estabelecidos.

3.4 Qualidade dos Produtos

A Tabela 7 apresenta um comparativo entre os teores de ferro e sílica dos produtos executados e simulados.

É possível observar na Tabela 7 que o teor de ferro simulado foi muito próximo ao executado. Já no teor de sílica, houve uma divergência bem maior. Uma explicação para esse fato é que o teor de Fe por faixas foi usado como critério para a composição do ROM, já, no caso da sílica, foi adotado apenas o teor global. A diferença da média ponderada por massa do teor de sílica por faixas entre o ROM executado e simulado pode ser vista na Tabela 8. Há mais sílica na faixa do sinter feed, -10 +0,15 mm, e menos sílica na faixa do pellet feed, -0,15 mm.

A Tabela 9 apresenta média simples, a mediana (Med), o desvio padrão (D.P.), a diferença percentual entre as medianas (Dif.) e comparações entre o teor de sílica por faixa do ROM executado e simulado. Para as faixas +10, -1 +0,15 e -0,15, há evidências de diferença com significância estatística entre os valores simulados e executados (valor-p \leq 0,10).

4 CONCLUSÃO

No caso da flotação e da deslamagem, a simulação dinâmica calibrada com testes de bancada fornece bons indicativos da ordem de grandeza da produção e da qualidade dos produtos. Já no caso da separação magnética, é necessário um fator de *scale-up*, pois os resultados não se mostraram satisfatórios.

Através desse estudo, foi possível determinar a representatividade dos resultados de testes de bancada em relação aos resultados industriais. Em projetos futuros, os critérios poderão ser mais bem definidos e os resultados dos testes de bancada, que podem ser feitos com um grande número de amostras, melhor utilizados para obtenção de uma rota mais adequada à diversidade do depósito mineral.

Uma das maiores dificuldades encontradas nesse estudo foi a necessidade de um número de critérios excessivamente grande para prever a produção e a qualidade dos três produtos, *granulado*, *sinter feed*, *pellet feed*, e do rejeito. Pequenos desvios podem representar diferenças grandes, em termos de massa, ao longo de um ano. Mesmo que seja possível atender todos os critérios estabelecidos para a simulação, garantir o cumprimento simultâneo deles na prática industrial é complicado. É preciso, portanto, priorizar alguns parâmetros/metadados, cujos resultados são mais importantes na prática industrial.

REFERÊNCIAS

- 1 Merks JW. Simulation models for mineral processing plants. CIM Bulletin. 1991;84(953):72.
- 2 Vieira GE. Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais. In: Universidade Estadual Paulista. Anais do 13º Simpósio de Engenharia de Produção; 2006; Bauru, Brasil. Bauru: Unesp; 2006.
- 3 Garcia C. Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo; 2005.
- 4 Liu Y, Spencer S. Dynamic simulation of grinding circuits. Minerals Engineering. 2004;17:1189-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.018>
- 5 Scientific Software BRGM [internet]. Orleans: BRGM; [acesso em 7 jan. 2014]. Disponível em: <http://www.brgm.eu/content/scientific-software>.
- 6 Simulação dinâmica de processos OptSim® [internet]. Belo Horizonte: CEMI; [acesso em 7 jan. 2014]. Disponível em: <http://www.cemi.kinghost.net/novosite/simulacao02.php>.
- 7 King RP. Modeling & simulation of mineral processing systems. Oxford: Editora Butterworth-Heinemann; 2001.

Recebido em: 19/11/2013

Aceito em: 06/03/2014