MÉTODOS DE DESENVOLVIMENTO DE FLUXOGRAMAS DE PROCESSOS MINERAIS

Afrânio Franco Machado

PAULO ABIB ENGENHARIA S.A.

Abstract

The author comments on methods of mineral processing flowsheet development. The main activities involved are sampling of the mineral deposit, aiming at settling existing mineral types, performing of mineral assessing and bench tests, pilot plant testwork and process simulation using computers.

Keywords: flowsheet development, mineral characterization, bench test, pilot testwork, simulation by computer.

Resumo

O autor trata sobre os métodos de desenvolvimento de fluxogramas de processos minerais. As principais atividades envolvidas são a amostragem do depósito mineral, com a finalidade de estabelecer as tipos existentes, a execução de ensaios de caracterização mineralógica e de bancada, os ensaios em escala piloto e a simulação de processo através de computadores.

Palavras-chaves: desenvolvimento de fluxogramas, caracterização mineralógica, ensaios de bancada, ensaios piloto, simulação por computador.

01 - INTRODUÇÃO

No desenvolvimento da Tecnologia Mineral, envolvendo principalmente os trabalhos de estabelecimento da rota de processamento de um determinado minério, freqüentemente se defronta com dificuldades concernentes às especificidades de um corpo mineral a ser explotado. Tais trabalhos estão normalmente inseridos no âmbito dos estudos de viabilidade técnico-econômica de empreendimentos mineiros.

Nos primórdios das investigações sobre o corpo mineral, os dados e informações sobre as tipos minerais são escassos ou até inexistentes. Nesta situação e em várias outras que se sucedem, a determinação do fluxograma de processo e do balanço de massas se reveste de suma relevância, haja vista que o desempenho das operações de tratamento do minério e a própria economicidade da operação mineira dependem intrinsecamente de uma formulação solidamente competente do fluxograma de processo. O assunto é tratado neste trabalho, procurando-se caracterizar as técnicas e métodos mais convenientes necessárias para o estabelecimento do fluxograma de processo.

Abordam-se inicialmente as técnicas de obtenção de amostras do corpo mineral. A amostragem do depósito que normalmente é executada, objetivando-se determinar teores e volumes de reservas dentro dos diversos tipos minerais, com a minimização de erros aleatórios e sistemáticos que são comuns em trabalhos desta natureza, adquire aqui uma significação mais complexa. O ponto fundamental em questão é o de se coletar o menor número de amostras com a mínima massa possível de minério que represente o corpo mineral, propiciando-se dessa maneira uma condição otimizada e factível para se executarem ensaios investigatórios metalúrgicos no laboratório. Trata-se conseqüentemente de uma tarefa que exige um planejamento criterioso com base em uma sólida experiência altamente especializada.

A caracterização mineralógica é a etapa seguinte e que é apresentada em continuação, mostrando-se os aspectos a serem enfocados em um plano de pesquisa tecnológica que visa o aproveitamento econômico do bem mineral. Serão descritos, no limite que a extensão deste

trabalho o permite, os ensaios de laboratório mais importantes a considerar na caracterização mineralógica.

Os testes de bancada, os quais propiciam a determinação das chamadas variáveis de processo, são mencionados em capítulo à parte. São importantíssimos sobretudo para o cálculo do balanço de massas e para o dimensionamento de equipamentos, a partir dos números alcançados no balanço de massas.

O capítulo seguinte trata dos ensaios em escala piloto. É ressaltada a sua importância para a obtenção de parâmetros, esgotadas as possibilidades dos dados da escala de bancada de atenderem aos requisitos de segurança imprescindíveis à qualidade do projeto de Engenharia. Seu custo costuma ser bem elevado, razão pela qual o planejamento destes ensaios exige um alto discernimento e julgamento, objetivando-se não comprometer o orçamento dos estudos. Comenta-se sobre a importância da simulação por computador, como coadjuvante dos estudos, com vistas a se abrir um conhecimento mais amplo sobre o comportamento das tipos frente ao processo, a um custo minimizado.

2 - AMOSTRAGEM

A avaliação do valor de um depósito mineral é uma tarefa bastante complexa e deve ser feita com base nos conhecimentos integrados de uma equipe de especialistas, a qual deve incluir o geólogo, o engenheiro de minas, o engenheiro de processo (metalurgista de extração), o economista mineral e o engenheiro metalurgista que utilizará o produto. Dentro da equipe, o engenheiro de processo desempenha um dos mais importantes papéis, sob a ótica de viabilidade técnico-econômica de aproveitamento do minério.

Por outro lado, o engenheiro de processo é quem deve conduzir e orientar os ensaios de laboratório a serem executados com as amostras coletadas. Como a economicidade do empreendimento apresenta uma elevada sensibilidade em relação ao processo de tratamento do minério, não só no que tange à capacidade da planta como também no que se refere à rota de processo proposta, os estudos de laboratório devem iniciar-se nos primeiros estágios de desenvolvimento dos trabalhos de reconhecimento geológico do corpo mineral.

Assim, o engenheiro de processo deve receber uma amostra logo nos primórdios dos estudos exploratórios do jazimento. A amostra pode ser coletada em furos de sonda, trincheiras, poços ou galerias, de acordo com o minério e com o propósito a que se destina. Mesmo amostras retiradas com trado podem ter valor. É importante salientar que qualquer amostra deve ser submetida ao mínimo de fragmentação, dado que partículas finas apresentam-se normalmente difíceis de serem submetidas à concentração mineralógica. Para o caso de sulfetos, partículas com granulometrias finas são suscetíveis de se oxidar na superfície, o que poderá mascarar os resultados dos ensaios a serem executados.

A massa da amostra deve ser de cerca de 20 a 300 kg para ensaios de bancada, enquanto ensaios em escala piloto podem requerer de 20 a 300 t de minério.

A qualidade da amostra deve representar um determinado tipo da jazida. Desta maneira, é possível investigar a melhor rota de processamento para aquele tipo em particular, permitindo-se então compará-la com as referentes aos demais tipos existentes na jazida. Esta abordagem se reveste de um caráter importantíssimo, uma vez que possibilita estabelecer se os tipos devem ser tratados separadamente ou de uma forma conjunta, objetivando-se maximizar o teor e a recuperação metalúrgica do concentrado final. É evidente que tal avaliação deve levar em consideração a participação em massa de cada tipo na reserva mineral.

É comum acontecer que o número de tipos que se imagina existir na jazida a partir das investigações geológicas possa ser reduzido com o acúmulo de conhecimentos adquiridos com a experimentação em laboratório. Verifica-se então a conveniência de se agruparem dois ou mais tipos minerais um um único, devido ao comportamento similar observado nos ensaios metalúrgicos. O trabalho do Engenheiro de Processo segue na maioria das ocasiões na direção da simplificação a partir da complexidade, evitando-se no entanto perder segurança no tratamento do minério. Este método pode ser bastante recompensador, sobretudo naqueles corpos minerais onde a diversidade ou variabilidade da qualidade é bastante elevada. Ele visa, acima de tudo, atingir ou se aproximar do objetivo prático de reduzir o número de rotas de processamento, agrupando-se qualidades e comportamentos metalúrgicos, o que caminha de encontro à meta de redução de custos operacionais e de capital.

O programa de trabalho acima delineado deve contar com a participação de todas as disciplinas técnicas envolvidas por meio dos profissionais especificos e naturalmente deve dispor de um prazo conveniente, que normalmente suplanta os 6 meses, dentro do cronograma de desenvolvimento do projeto. Somente uma reflexão criteriosa, embasada em um sólido programa de experimentação com as amostras coletadas, poderá resultar em uma concepção de excelência do processo de tratamento a ser adotado. Procura-se nesse trabalho lançar alguma luz sobre como este objetivo poderá ser atingido, descrevendo-se as atividades necessárias, dentro de uma ótica objetiva e prática e calcada em experiências vivenciadas com vários tipos de minérios. Do sucesso de um tal programa de desenvolvimento depende o êxito do empreendimento mineiro, ao longo de sua vida útil.

A concepção básica da planta, no entanto, deve ser modificada ao longo da vida operacional, para o que é necessário prosseguir com o plano de amostragem e sua caracterização frente ao processo de tratamento em laboratório e se necessário, em planta piloto, conforme descrito mais adiante no texto deste trabalho.

3 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Os ensaios de caracterização mineralógica são fundamentais para o conhecimento do minério, permitindo-se estabelecer as linhas de estudo para a determinação do processo de tratamento. Os principais ensaios de caracterização serão descritos de maneira sumária a seguir.

3.1 - Distribuição de tamanhos de partículas

É sabido que o comportamento das partículas de minério nos processos de britagem, moagem, classificação, concentração e separações sólido-líquido é fortemente dependente de sua distribuição de tamanhos.

Há vários métodos no laboratório para a determinação das distribuições de tamanhos. Tamanhos mais grosseiros, entre 400 mesh (37 micrômetros) e 1" (25,4 mm), podem ser analisados por peneiramento. Tamanhos mais finos até cerca de 5 micrômetros podem ser analisados através de microciclones (CYCLOSIZER) ou por técnicas de determinação por laser até tamanhos menores, de aproximadamente 0,2 micrômetros. Há várias outras técnicas de laboratório, de utilização sobretudo em faixas granulométricas mais finas, as quais não serão tratadas neste trabalho, encontrando-se descritas na literatura especializada (2)

É algumas vezes conveniente representar as distribuições de tamanhos através de uso de relações analíticas empíricas, permitindo-se análises matemáticas e estatísticas de dados experimentais. Dentre tais relações, salientam-se a distribuição de Rosin-Rammler-Bennet, a de Gaudin-Schuhmann e a distribuição log-normal.

A forma da expressão de Rosin-Rammler é dada por:

$$y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^{m}\right], \qquad (3.1)$$

onde:

y - fração acumulada;

d - diâmetro de partícula;

d_{50} - diâmetro de partícula para porcentagem acumulada de 50%

m - parâmetro

Para verificar se a expressão de Rosin-Rammler se aplica aos dados experimentais de uma amostra, basta verificar se há regressão linear entre as variáveis ln [- ln (1 - y)] e ln(d). A inclinação obtida da reta permite o cálculo do parâmetro **m**, enquanto a ordenada do ponto de encontro da reta com o eixo das ordenadas propicia o cálculo de $\mathbf{d_{50}}$.

É importante também caracterizar-se como se distribuem as espécies minerais ao longo das frações granulométricas. Dadas as dificuldades inerentes à determinação quantitativa das espécies minerais, é comum efetuar a análise química por faixa granulométrica, com o objetivo de avaliar indiretamente a distribuição das espécies minerais por faixa granulométrica. É o que se chama normalmente de distribuição granuloquímica.

3.2 - Ensaios com líquidos densos

A separação de misturas de espécies minerais ocorrendo em um dado minério em frações de densidades diferentes é feita em laboratório usando-se líquidos densos, para atender a um ou mais de um dos seguintes propósitos:

(a) investigar a possibilidade de concentração densitária;
(b) controle de processo de operações de separações densitárias;
(c) avaliação do desempenho de outros processos de separação, tais como: flotação, separações magnética, eletrostática, etc.;
(d) concentração de frações de baixo teor de espécies minerais para análise mineralógica detalhada;
(e) análise da liberação de minerais.

Há três métodos normalmente empregados para análise de líquidos densos a saber:

(a) análise simples de afunda-flutua - nesta técnica, a amostra é submetida a uma única separação de afunda-flutua e os dois produtos obtidos são pesados e analisados. Dois líquidos são utilizados com maior freqüência: o bromofórmio (d = 2,85) e o tetrabromoetano (TBE) (d = 2,96). Para densidades menores ou intermediárias, usa-se diluir tanto o bromofórmio como o TBE com acetona (d = 0,79);

(b) análise completa de afunda-flutua - é idêntico ao método descrito anteriormente, com a exceção de que executam-se múltiplas separações ao longo de um intervalo de densidades, tratando-se os produtos de uma determinada separação em líquidos de densidade menor (flutuado) e em líquidos de densidade maior (afundado);

(c) análise de gradiente de densidade - nesta técnica, uma amostra é separada em três ou mais frações densitárias em uma única operação. O método requer uma mão-de-obra mais especializada e é mais aplicável em pesquisas do que na rotina da produção.

É importante ressaltar o valor de estudos de separação em líquidos densos para determinação dos níveis de liberação de minerais. Essa técnica produz resultados metalúrgicos quantitativos de valor em um tempo bastante limitado.

Os ensaios de separação por líquidos densos, apesar de simples de serem executados, propiciam assim uma enorme quantidade de informações cujo conhecimento é importantíssimo para o estabelecimento da rota de processamento do minério em questão. De acordo com o nível de liberação dos minerais, é possível determinar a malha de fragmentação ótima que originará o melhor desempenho do processo de concentração do mineral de valor.

3.3 - Ensaios de separação magnética

Ensaios de separação magnética são usados para verificar a conveniência desse método para concentração de espécies minerais ou como um processo de avaliar o grau de liberação.

O separador isodinâmico Frantz é comumente empregado para separações magnéticas precisas a seco com base em susceptibilidade magnética de partículas paramagnéticas e diamagnéticas, no intervalo granulométrico de 10 a 500 micrômetros.

Os melhores resultados são obtidos no Frantz quando se usam frações granulométricas em intervalos pequenos. Antes de serem passadas no Frantz, as amostras devem ser submetidas à ação de imã de mão com a finalidade de remover as partículas ferromagnéticas.

4 - ENSAIOS DE BANCADA

Vários ensaios em escala de bancada são comumente executados com o objetivo de determinar condições e valores de variáveis que serão usadas no projeto de Engenharia. Alguns desses ensaios são descritos em seguida.

4.1 - Flotação

Com o objetivo de desenvolver um circuito de flotação para um minério específico, testes preliminares de laboratório devem ser executados com o objetivo de se escolherem os melhores reagentes, bem como de serem avaliados os limites de qualidade do concentrado a ser produzido. São um excelente intrumento de análise de Engenharia de Processo, durante os trabalhos de concepção da rota de processo e definição dos circuitos. Os ensaios de flotação também são executados em minérios sendo já tratados em plantas existentes, com o objetivo de aprimorar procedimentos, melhorar recuperações e teores, bem como desenvolver a aplicação de novos reagentes mais eficazes.

Uma vez escolhidas as amostras representativas dos tipos do corpo mineral, é necessário prepará-las para os ensaios de flotação, através de fragmentação até a malha adequada. A britagem e moagem devem ser feitas, evitando-se a contaminação com óleos e graxas ou outros materiais. É sabido que mesmo na planta comercial, pequenas quantidades de óleo e graxas podem perturbar temporariamente o circuito de flotação. As amostras são britadas em britadores pequenos de mandíbulas até cerca de 0,5 mm e em seguida até 1 mm em britadores de rolos em circuito fechado com uma peneira.

A moagem a úmido das amostras deve ser executada imediatamente antes de se realizar o teste de flotação, a fim de evitar a oxidação de superfícies minerais, especialmente de sulfetos e carvão. A moagem em batelada em moinhos de bolas produz um produto com uma distribuição granulométrica muito mais ampla do que aquela obtida em circuitos contínuos fechados com classificadores. Para minimizar isto, usam-se moinhos de batelada com barras, cuja distribuição granulométrica do produto se aproxima mais de moinhos com circuito fechado. É fato, no entanto, que uma simulação perfeita nunca é obtida, dado que os moinhos

em circuito fechado geram uma sobremoagem dos minerais de alto peso específico, o que não ocorre na moagem em moinhos de barras.

Em razão do que foi mencionado acima, é importante ressaltar que as previsões para o projeto a partir dos ensaios de bancada em laboratório podem ser aprimoradas, desde que a recuperação do mineral em questão seja expressa em função do tamanho de partículas em cada faixa granulométrica e não em função do tamanho de partículas do produto total. O tamanho ótimo pode ser determinado e o tamanho global pode ser então estimado para calcular a malha ótima de moagem. Tal método pressupõe que a mesma finura do mineral valioso dará os mesmos resultados de flotação, tanto para amostras provenientes de circuitos abertos como de circuitos fechados de moagem.

4.2 - Determinação do índice de moabilidade

A determinação do índice de moabilidade de um minério ("Work index"), através de ensaio de bancada, propicia elementos quantitativos necessários para o dimensionamento dos moinhos existentes no circuito de fragmentação.

O ensaio é executado preparando-se a alimentação através de britagem estagiada a uma granulometria abaixo de 6 mesh. O moinho utilizado tem dimensões de 12" x 12" (30,48 cm x 30,48 cm), é dotado de um contador de revoluções e trabalha a 70 rpm.

O procedimento do ensaio utiliza ciclos de moagem, seguidos de peneiramentos e retorno do oversize ao moinho, até que uma determinada condição de equilíbrio do produto moído seja obtida.

O Wi, "Work index"ou índice de moabilidade, é dado pela seguinte expressão analítica:

$$W_i = \frac{44,5}{\left(P_i\right)^{0,23}} \cdot (Gpb)^{0,82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right) \qquad (4.1)$$

onde:

Wi - "Work index" em kWh/st;

P_i - abertura em micrômetros da malha da peneira de teste;

Gbp - média de massa moída em gramas por revolução nos três últimos ciclos;

P - tamanho em micrômetros, no qual 80% em massa do produto são passantes;

F - tamanho em micrômetros, no qual 80% em massa da alimentação são passantes.

4.3 - Ensaios de sedimentação em proveta

Os ensaios de sedimentação em bancada, utilizando-se de proveta de 2 litros, propiciam o levantamento de informações quantitativas necessárias para o dimensionamento de espessadores usados nas operações de separação sólido-líquido. Há modelos de cálculo para o escalonamento que permitem uma elevada precisão. Entre eles sobressaem-se os métodos de Coe e Clevenger e o de Talmage e Fitch (Kinch).

4.4 - Ensaios de filtração

Os ensaios de filtração a vácuo em bancada são feitos utilizando-se o dispositivo de folha ('leaf') que leva a resultados bastante confiáveis, permitindo-se escalonar os dados obtidos com elevada segurança para as condições industriais.

São também muito usados para otimizar condições na prática industrial, tais como investigar o desempenho de novos reagentes auxiliares de filtração e as características de diferentes tipos de tecidos filtrantes.

Com os ensaios é possível simular tanto filtros verticais de discos, de tambores, como filtros de esteira.

5 - ENSAIOS EM PLANTA PILOTO

Os ensaios de caracterização, conjugados aos ensaios de bancada, permitem em muitas situações dispensar a execução de ensaios em escala piloto, desde que os resultados obtidos sejam analisados e utilizados por um especialista senior com experiência em projetos de plantas industriais.

Conforme ficou evidente da leitura anterior, os ensaios de caracterização e bancada servem para:

(a) caracterizar as amostras quanto a teores químicos e mineralógicos, distribuidos através das frações granulométricas;

(b) avaliar a malha de liberação das espécies minerais;

(c) estimar teores e recuperações dos concentrados.

A execução de um programa de investigação tecnológica deve iniciar-se sempre, portanto, pelos ensaios de bancada. Uma característica importante desses ensaios está no fato de que, especialmente nas separações minerais visando a concentração de espécies valiosas, há a possibilidade de se executar uma grande quantidade de experimentos, variando-se as condições operacionais, o que permite avaliar estatisticamente com maior precisão o nível ótimo de operação. Assim é que, em escala descontínua ou semi-contínua de bancada, é mais conveniente investigar com maior profundidade a influência de parâmetros tais como: tempos de residência, taxas de dosagem de reagentes, intensidades de campos magnéticos, etc.

Quase sempre o Engenheiro de Processo usa os dados de laboratório em escala de bancada, juntamente com simulações em computador, para estabelecer a rota de processamento do minério com suas condições operacionais. Desta maneira, ganha-se tempo e economiza-se dinheiro na eventual realização de ensaios maiores e difíceis de executar. O discernimento que permite a utilização desta método de trabalho, no entanto, requer uma ampla experiência no tratamento de problemas similares anteriores , sem a qual corre-se o risco de serem cometidos graves enganos no projeto da Engenharia de Processo.

Os ensaios piloto, quase sempre operados em escala contínua, são indicados por seu turno, para o levantamento daqueles parâmetros de Engenharia que não sejam possíveis de obter por intermédio dos ensaios de bancada. Dentre outros, os seguintes parâmetros só se obtêm em ensaios em escala piloto:

- taxas de cargas circulantes (embora possam ser estimadas através de "locked cycle tests" de bancada);
- concentrações ótimas de sólidos em polpas;
- fatores de correção de variáveis operacionais de hidrociclones, etc.

Para algumas situações especiais, como é comum ocorrer em flotação de minérios complexos, recomenda-se executar testes em planta piloto, objetivando-se uma maior segurança no projeto de Engenharia da planta industrial.

Os testes piloto são normalmente caros e requerem uma mão-de-obra especializada para sua operação.

Na operação da planta piloto, é necessário estabelecer-se um programa rigoroso de amostragem, definindo-se intervalos de coleta de incrementos, tamanhos de incrementos, e quais os tipos de determinações analíticas sobre as amostras coletadas são necessárias.

Listam-se abaixo algumas finalidades de executar testes em plantas piloto:

- verificar fluxogramas concebidos a partir de informações obtidas em investigações de bancada;
- desenvolver dados confiáveis com o propósito de utilização em projeto de plantas industriais;
- desenvolver dados de escalonamento ou de processo, não possíveis de obter diretamente através de ensaios de bancada em laboratório;
- avaliar os ganhos econômicos, metalúrgicos e operacionais factíveis com alterações no fluxograma de planta existentes ou na aplicação de novos reagentes;
- desenvolver ou avaliar a aplicação de novos processos ou novas tecnologias;

- produzir tamanhos maiores de amostras, dentro de condições operacionais especificadas, visando a abertura de novos mercados através de demonstração do desempenho do produto nas instalações de clientes potenciais;
- avaliar a eficiência de processos existentes, tal como operados ou com alterações nas condições de processo;
- providenciar ambiente de treinamento para candidatos a novos operadores.

Os estudos de simulação em computador, realizados simultaneamente à etapa de ensaios em planta piloto, visam, por sua vez, o seguinte:

- investigar novas condições não estudadas na experimentação da planta piloto; isto representa uma substancial economia;
- programar novas condições que deverão ser investigadas experimentalmente na planta piloto.

BIBLIOGRAFIA

1. **Mular, A. L. & Bhappu, R. B.** - Mineral Processing Plant Design; Society of Mining Engineers, New York, 1980.

2. **Weiss, N. L.** - SME Mineral Processing Handbook; Society of Mining Engineers, New York, 1985.

3. **Wills, B. A.** - Mineral Processing Technology; 2nd Edition, Pergamon Press, England, 1981