



FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DO MODELO OPERACIONAL

Há quase 100 anos (1905/1906), a primeira usina industrial de flotação, da BHP, Austrália, produziu 80.000 toneladas/ano de concentrado de Zinco. Já em 1916, 46 usinas de flotação operavam normalmente nos EEUU (Cobre, Chumbo e Zinco). Após o século XX marcado pela evolução tecnológica exponencial em todas as áreas do conhecimento humano, as mais importantes operações unitárias de beneficiamento mineral, entre elas a Flotação, chegam ao século XXI com pouca sustentação científica. Num ambiente tecnológico contrastante são confrontadas teorias de alta complexidade e pouca aplicabilidade, com práticas simples, mas geralmente sem sustentação teórica.

Engenheiros eletricitistas ou eletrônicos, sem precisar de conhecimentos sobre o processo, criam, comercializam, instalam e operam complexos sistemas de controle, chamados de "especialistas". Diversas regras fornecidas pelos próprios operadores, ou mediante operadores eletrônicos que utilizam a boa memória dos seus sistemas neurais para aprender as rotinas de operação, dão base ao controle automático das usinas, configurando, na prática, uma regra principal: aquela de que "o cliente sempre tem a razão", mas sem proporcionar a orientação básica que a usina precisa em termos de otimização. Reconhecendo a condição de "arte" do processo de flotação foi introduzida a lógica nebulosa ou difusa para considerar as apreciações qualitativas do operador, do tipo: "a espuma está esverdeada", o moinho está com "um barulho esquisito" ou "as bolhas arrebentam com facilidade".

Por isso e por outras razões é urgente a tarefa de estabelecer uma nova e particular base científica para as operações unitárias da área de beneficiamento mineral. Fábricas locais simples, de equipamentos simples e padronizados, de simples operação e manutenção, e usinas simples, de baixo investimento e custo operacional, requerem também uma interpretação macroscópica simples, porém clara, dos processos minerai. Por tratar-se de partículas e não de moléculas é o engenheiro de minas o profissional mais indicado para lidar com esse processo. Estudantes de engenharia, utilizando os conceitos aqui expostos, poderão interpretar de uma outra forma as operações mecânicas de separação (separação magnética, flotação, hidrociclonagem, etc.). A disciplina "Transferência de Massa", adaptada à escala macromolecular, será um novo apoio para os profissionais da área mineral nessa constante procura do seu particular espaço científico/teórico nas ciências da engenharia.





Diferentemente do que acontece nas operações unitárias estudadas no campo da Engenharia Química, as quais estão baseadas nos Fenômenos de Transporte de: **quantidade de movimento, energia e massa**, a área de Processamento de Minérios apresenta diversas dificuldades que não têm permitido a descrição fenomenológica dos mecanismos básicos de ocorrência desses processos e, como consequência, têm limitado o estudo de modelos de simulação e, inclusive, têm dificultado a obtenção de correlações simples entre estudos feitos em laboratório e a operação contínua industrial.

O grande vazio existente entre os fundamentos teóricos e a prática dessas operações unitárias tem sido preenchido, durante quase um século, pela utilização dogmática de inúmeros "mitos tecnológicos". Esses mitos correspondem a determinadas fórmulas empíricas, tabelas indicadas nos manuais dos fabricantes de equipamentos e "critérios de projeto" tradicionalmente utilizados na indústria mineral, que se têm constituído em paradigmas sem contestação e que têm inibido o desenvolvimento de novas abordagens científicas.

Os processos de transferência de massa observados na indústria química são moleculares e tendem naturalmente ao equilíbrio, permitindo assumir condições de continuidade baseadas no conhecimento do gradiente de transporte em qualquer corte transversal ao fluxo, ou fluxos, geralmente em fases homogêneas. Desse modo, a sua modelagem, baseada no gradiente de transporte e comportamento cinético se aproxima perfeitamente da realidade industrial, quase independente de relações de escala. Na área mineral os mecanismos de ocorrência são bastante complexos; o próprio minério é muito variável, justamente naquelas propriedades que afetam diretamente ao fenômeno na forma de distúrbios de entrada (dureza, grau de liberação, etc.), o qual acontece normalmente em fases pouco homogêneas (polpa, espuma) e de difícil representação em simulações matemáticas.

O gradiente de concentração, no caso do processo de **flotação**, corresponde ao potencial de hidrofobia das partículas, o qual está condicionado a diversas variáveis muito difíceis de medir ou controlar. No caso da operação de **moagem**, o fenômeno de cominuição resulta da mistura de três componentes principais: o Impacto, a Atrição e a Abrasão. Cada componente apresenta diferente eficiência no seu aproveitamento energético sobre o minério, cuja ação é executada por diversos tipos de corpos moedores (bolas de ferro, de aço ou de porcelana, barras de ferro, "pebbles" do próprio minério, etc.) que depende também da viscosidade do meio em que atuam e de outras inúmeras variáveis. Desse modo, as operações de cominuição e de separação com concentração de massa precisam de uma nova abordagem.

Em resumo, o **Modelo Operacional** consiste num novo fundamento científico para interpretar as operações de beneficiamento de minérios. O Modelo é macrofenomenológico, porque define novos mecanismos mensuráveis para descrever os fenômenos envolvidos; operacional, porque incorpora a atuação do operador dentro das equações que descrevem os processos; e orientativo, porque indica o caminho ótimo que deve seguir o fluxo de massa e as condições ótimas de operação. O **Modelo Operacional** propõe uma nova concepção macrofenomenológica para o estudo de algumas operações unitárias mecânicas de tratamento de minérios, isto é, estabelece novas bases teóricas para os fenômenos de ocorrência dessas operações: **Cominuição** (moagem, britagem) e **Separação com Concentração de Massa** (separação magnética, separação gravítica, hidrociclonação, flotação, etc.), como ilustrado na **Figura**.



Nessa original abordagem, o Modelo introduz diversos conceitos na área mineral:

1. **Fenômeno Real:** A partir das equações de “scale-up” o modelo leva em conta o mecanismo real dos processos. O processo de **Flotação**, por exemplo, é agora o processo de **Concentração de Massa por Flotação**, incorporando as atuações do operador nas rotinas de simulação do fenômeno.
2. **Transferência Macromolecular de Massa:** A transferência de massa, como fenômeno de transporte, é interpretada de maneira macromolecular, onde a “migração” forçada de partículas (por força hidrofóbica, peso específico, tamanho, magnetismo, etc.) substitui o conceito de “difusão” molecular através do gradiente de concentração - ou por potencial químico entre duas fases - utilizado nos processos químicos. Por exemplo, as operações estagiadas de concentração, no processo de flotação, são observadas determinando a Curva de Equilíbrio entre as fases polpa e espuma e a Linha de Operação do sistema. Essa última deve tender ao equilíbrio sendo induzida pelo operador da usina.
3. **Equações de Continuidade:** A descrição do processo no estado estacionário é feita a partir de equações de continuidade, criadas especialmente pelo modelo operacional, acompanhando o fluxo principal do processo e abrindo as tradicionais “caixas pretas” que escondem circuitos fechados ou operações em etapas.
4. **Conceito “Operacional” do Modelo:** As rotinas de cálculo orientam as **atuações operacionais** dentro da usina para levar o processo até condições próximas do evento natural que ocorreria na hipótese de tratar-se de um processo químico.

ALEXIS P. YOVANOVIC