



INTRODUÇÃO ÀS OPERAÇÕES COM TRANSFERÊNCIA MACROMOLECULAR DE MASSA



Por
ALEXIS P. YOVANOVIC

Engenheiro Civil Químico, U. Católica del Norte, Chile, 1973
Autor do **Modelo Operacional** e Consultor Especialista em
Otimização e Controle de Processos Mineraias, B. Horizonte/MG, Brasil

* Citações extraídas deste texto podem utilizar a seguinte Referência:
YOVANOVIC, A.P.: “Introdução às Operações com Transferência Macromolecular de Massa”. Relatório interno - MODELO OPERACIONAL, Belo Horizonte, Brasil, Agosto 2005.



PRÓLOGO

*De modo diferente de lo que ocurre en las operaciones unitarias estudiadas en el campo de la Ingeniería Química, las cuales se basan en los fenómenos de transporte de: **cantidad de movimiento, energía y masa**, el área de procesamiento mecánico de minerales presenta diversas dificultades que no han permitido la descripción fenomenológica de los mecanismos básicos de ocurrencia de esos procesos y, como consecuencia, han limitado el estudio de modelos de simulación y han dificultado, incluso, la obtención de correlaciones simples entre estudios de laboratorio y la operación continua industrial.*

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 mecânico 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 têm dificultado, inclusive, a obtenção de correlações simples entre estudos de laboratório e a operação contínua industrial.

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 o fenômeno, na forma de distúrbios de entrada (dureza, grau de liberação, etc.), o qual acontece normalmente em fases muito pouco homogêneas (rocha, polpa) e por tanto de difícil representação em simulações matemáticas. No caso da operação de moagem, por exemplo, o fenômeno fundamental 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 redução de tamanho e de separação com concentração precisam de uma nova concepção teórica, como ilustrado na **Figura P.1**.

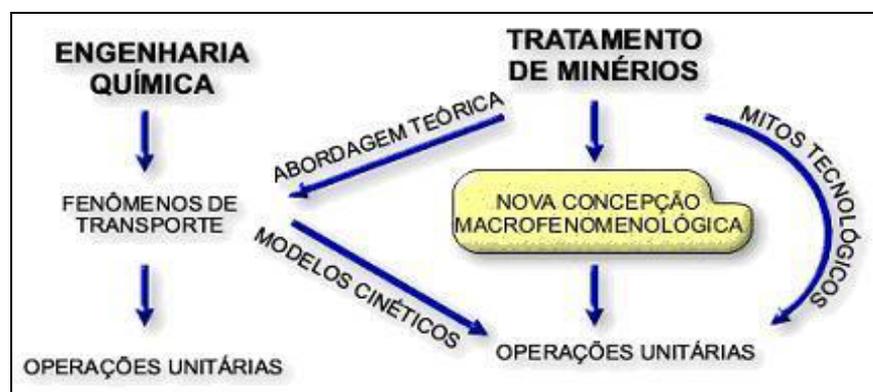


Figura P.1 – A Nova Abordagem da Ciência Mineral



Fenômenos de Tratamento de Minérios

O **Modelo Operacional** propõe uma nova concepção macrofenomenológica para o estudo de determinadas operações mecânicas de tratamento de minérios, com novas bases teóricas. Estas operações são: **Cominuição** (moagem, britagem) e **Separação com Concentração de Massa** (flotação, separação centrífuga, separação magnética, separação gravítica e outras). A nova abordagem considera ainda alguns fenômenos auxiliares inerentes ao **transporte de partículas em meio viscoso**, como ilustrado na **Figura P.2**.

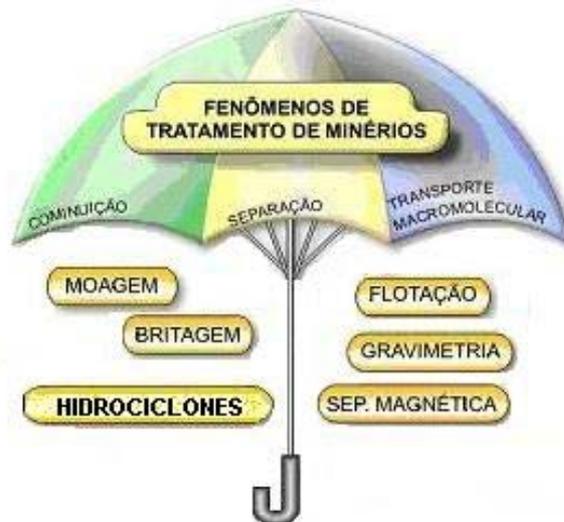


Figura P.2 – Fenômenos de Tratamento de Minérios

As operações de **Cominuição**, por exemplo, são interpretadas como processos de transferência macromolecular de massa (grãos), entre as fases rocha e polpa. O modelo propõe uma analogia com a operação química de transferência de massa por destilação fracionada, onde os grãos das substâncias de interesse são extraídos da solução sólida (a rocha) para um maior estado de liberação em meio fluidizado (polpa), mediante a aplicação de energia. Esta cominuição, ao ser aplicada a rochas com componentes heterogêneos, como acontece na maioria das vezes, produz um certo grau de separação e de concentração dos grãos (teor individual dos grãos, pela sua maior liberação) que permite uma certa seletividade dentro do processo de moagem e que facilita a posterior separação (concentração) mássica dos grãos liberados através de outras operações (como a separação magnética e a flotação).

Estabelecendo a Curva de Liberação (em função da aplicação de energia) é possível obter balanços macroscópicos associados aos resultados metalúrgicos, de acordo com o Ponto de Operação requerido pelo processo ou definido durante o projeto de uma usina. O sistema de Aplicação de Energia pode ser otimizado, aproveitando a seletividade do fenômeno e utilizando práticas convenientes de operação que permitam que o material receba o máximo possível da energia total aplicada ao equipamento.

A **Concentração de Massa por Flotação**, por exemplo, é interpretada como um processo de transferência macromolecular de massa (partículas), entre as fases polpa e espuma. O modelo propõe mecanismos de transporte em cada fase e para o fluxo entre elas, de acordo com o potencial de hidrofobia que promove o transporte.



Estabelecendo a Curva de Distribuição do Equilíbrio entre as fases é possível obter balanços macroscópicos associados aos resultados metalúrgicos, de acordo com a Linha de Operação requerida pelo processo, ou definida durante o projeto de uma usina. O número de etapas de limpeza e sua eficiência também podem ser determinados a partir de experiências muito simples em laboratório.

Estudantes de engenharia, utilizando os conceitos aqui expostos, poderão interpretar de uma outra forma as operações. A disciplina "**Operações com Transferência Macromolecular de Massa**", poderá vir a ser um novo apoio para os profissionais da área química e mineral, particularmente para estes últimos, nessa constante procura do seu particular espaço científico/teórico dentro das ciências da engenharia.

Os objetivos principais deste livro são:

- Organizar o sistema fenomenológico das operações na ótica da engenharia de processos, numa seqüência que permita sua apresentação e ensino acadêmico.
- Introduzir uma nova interpretação teórica dos fenômenos, em apoio à ciência mineral, dentro de um original contexto macrofenomenológico criado para as operações de beneficiamento, em geral, baseado na transferência macromolecular de massa.
- Separar, na teoria e na prática das operações industriais, os diversos sub-mecanismos envolvidos.
- Colaborar na criação de uma nova matéria curricular para estudantes de engenharia química e de minas.
- Aprofundar o estudo de mecanismos macroscópicos em escala de laboratório, visando a sua simplificação e o seu scale-up para as operações industriais.
- Criar um elo científico que aprimore a compreensão dos processos e a relação entre os diversos mecanismos envolvidos.
- Ajudar a "desmistificar" a tecnologia mineral.
- Estabelecer metodologias claras de avaliação de equipamentos e de circuitos, para subsidiar a tomada de decisões dentro das usinas.
- Colaborar no desenvolvimento de uma cultura tecnológica nacional e regional (no âmbito da América do Sul), facilitando o dimensionamento e a fabricação local padronizada de equipamentos.
- Estabelecer uma nova metodologia para otimização e controle dos processos, como ferramenta de ajuda aos operadores de usinas de beneficiamento.

Alexis P. Yovanovic
Belo Horizonte/MG, Brasil
Agosto 2005



TRANSFERÊNCIA MACROMOLECULAR DE MASSA

1.1 Introdução

No campo da Engenharia Química, a transferência (molecular) de massa se entende como a modificação das composições químicas das soluções e misturas por meio de métodos que não necessariamente implicam em reações químicas. Essas operações são dirigidas, habitualmente, à separação de uma substância em suas partes componentes. A transferência molecular de massa é o resultado de uma diferença de concentração ou gradiente, de modo que a substância que se difunde se desloca de um lugar de alta concentração para outro de baixa concentração (**Treybal R.E.**, 1970). Algumas operações comuns de beneficiamento de minérios podem ser catalogadas como sendo operações com transferência molecular de massa, por exemplo: A Extração com Solventes, a Troca Iônica utilizando resinas ou carvão ativado (para a concentração de Ouro) e a Lixiviação. A grande maioria dos processos com transferência de massa considera um sistema de duas fases imiscíveis, com mais de um componente, onde as composições das fases são diferentes, ou seja, os componentes estão distribuídos diferentemente entre as fases.

No caso de misturas de partículas minerais tais separações podem ser inteiramente mecânicas, sem concentração, como ocorre em algumas operações de beneficiamento, por exemplo: a filtragem e a classificação por peneiramento. Agora, a separação entre partículas sobre a base da sua dureza, densidade ou a sua susceptibilidade magnética e também a separação de massa por flotação, entre outras, envolvem mudanças da composição química (teor) entre os produtos ou fases separadas e, como foi dito, ao incluir mudanças na composição dos fluxos definiremos estas últimas como **Operações com Transferência Macromolecular de Massa**, ou Transferência de Partículas Minerai.

Quase todas as operações da engenharia química são descritas sob: a) a ótica cinética (**Smith, J.M.**, 1971; **Levenspiel, O.**, 1972), quando se trata de operações que envolvem reações químicas; b) por modelos físicos introduzidos pelos Fenômenos de Transporte (**Bird, R.B. e outros**, 1964), quando se conhecem os princípios físicos fundamentais que regulam as leis básicas do transporte molecular de quantidade de movimento, energia ou massa; c) ou por fundamentos com base nos gradientes de transporte e as condições de equilíbrio, como acontece com as operações com transferência de massa (**Treybal R.E.**, 1970). Muitas operações de beneficiamento mineral, devido à falta de uma particular concepção das suas operações, utilizam conceitos derivados da engenharia química para tentar simular os processos e interpretar os seus mecanismos macroscópicos de ocorrência.

A utilização destas abordagens, pelas operações mecânicas de beneficiamento mineral, tem seguido, quase sem exceção, apenas as duas primeiras linhas de trabalho antes descritas:

- a) **Modelos Cinéticos**: Requerem de um estudo da velocidade de ocorrência do fenômeno e dos procedimentos de scale-up que relacionam o tempo medido no laboratório, em batelada, até operações contínuas na escala industrial;
- b) **Modelos Físicos ou Mecanicistas**: Requerem do conhecimento dos princípios físicos fundamentais de todos os subprocessos envolvidos, em continuidade; ou seja, do fluxo alimentado, do equipamento, da aplicação de energia, do transporte macromolecular em meio viscoso, dos distúrbios de entrada, etc.



Fatalmente, nenhuma destas abordagens tem conseguido resolver com segurança os aspectos básicos de engenharia de processos minerai, como o scale-up, o dimensionamento, a simulação e a otimização, como é amplamente reconhecido no meio científico mineral. O **Modelo Operacional** vem a apresentar uma nova interpretação macrofenomenológica para as operações de beneficiamento mecânico, em geral, baseada na **Transferência Macromolecular de Massa**, matéria esta que estamos sugerindo para incorporar no currículo de estudos para os estudantes de engenharia química e de minas. Não é o objetivo deste livro aprofundar na teoria da disciplina de Transferência (Molecular) de Massa, da forma ensinada na carreira de engenharia química, mas utilizar, de maneira simplificada, os conceitos mais relevantes dela para a compreensão dos processos minerai sob esta nova ótica.

1.1.1 Esquema Básico das Operações com TMMM

Para o estudo dos processos com Transferência Macromolecular de Massa utilizaremos o esquema apresentado na **Figura 1.1.1**.



Figura 1.1.1 – Esquema Básico das Operações com TMMM

Na **Parte 1** do texto, que trata do **Sistema Fenomenológico** envolvido nessas operações, estudaremos por separado o **Fenômeno Fundamental** (por exemplo: a Quebra, no caso da Cominuição); o sistema de **Transferência de Massa**, onde definiremos as equações básicas de movimento de massa e as condições de equilíbrio entre as fases; e o sistema de **Recuperação do Produto**, que envolve subprocessos auxiliares para a “administração” do fenômeno fundamental, definindo a quantidade e a qualidade do produto obtido, dentro das possibilidades oferecidas pelo fenômeno fundamental. Neste último aspecto entra o conceito operacional do modelo apresentado, onde a decisão do operador é fundamental na obtenção de resultados metalúrgicos pretendidos pelas operações (recuperação, liberação, teor, etc.).

A seguir, faremos uma breve explicação dos termos apresentados na **Figura 1.1.1**, e que resumem o Escopo geral deste texto.

1.1.1.1 Operações com TMMM

Serão divididas em dois grupos principais: **Cominuição** (moagem, britagem) e de **Separação com Concentração** (flotação, concentração centrífuga, concentração magnética, concentração gravítica e hidroclassificadores). Em paralelo, iremos analisando os fenômenos auxiliares inerentes ao **transporte macromolecular em meio viscoso** (leis da hidráulica, viscosidade, etc.), que afetam a performance de algumas destas operações.



As operações de **Cominuição** transferem a totalidade da massa da Alimentação ao Produto (não existe separação com concentração), com menor tamanho médio (operações homogêneas) e também com maior liberação da substância de interesse (operações seletivas), dependendo da Seletividade do processo. As operações de **Separação com Concentração** geram um Produto Principal o Concentrado, com maior concentração da substância de interesse, e um Rejeito.

Na **Tabela 1.1.1** é apresentado um resumo das operações mecânicas mais importantes da área mineral, com Transferência Macromolecular de Massa. Junto com isso, são indicadas a Parte do Livro e o Capítulo correspondente, onde maiores informações podem ser encontradas.

Tabela 1.1.1 – Organização das Operações com TMMM

| | COMINUIÇÃO | SEPARAÇÃO COM CONCENTRAÇÃO |
|---|---|---|
| SISTEMA FENOMENOLÓGICO Compreensão do processo | 1. Transferência Macromolecular | |
| | Operação Direta Transferência Total de Massa | Transferência Parcial de Massa Separação de Produtos |
| | 2. Fenômeno Fundamental | |
| | Quebra e Desagregação | Migração Forçada de Partículas |
| | 3. Transferência de Massa | |
| | Gradiente e Forças Impulsoras Classificação Interna | Gradiente e Forças Impulsoras Condições de Equilíbrio |
| | 4. Recuperação do Produto | |
| Função Transporte | Concentração de Massa (Rcm) | |
| MECANISMOS MACROSCÓPICOS Parâmetros quantificáveis no Laboratório | 5. Aplicação de Energia | |
| | Energia Mecânica Massiva: Transferência de energia à placa de atrição ou a corpos moedores | Energia de Ativação Seletiva: Força Hidrofóbica (Reagentes); Força Centrífuga; Campo Magnético; Força de Gravidade. |
| | 6. Cinética dos Processos Minerai | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Velocidade do Fenômeno Fundamental • Batelada / Contato Contínuo • Tempo de Residência e Scale-Up | |
| | 7. Seletividade | |
| ENGENHARIA DOS PROCESSOS MINERAIS Procedimentos de cálculo para projetos industriais | 8. Propriedade Macrofenomenológica e Scale-Up | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Propriedades Macrofenomenológicas • 1ª Lei: Scale-Up | |
| | 9. Reatores - Equipamentos de Contato | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Batelada / Contato Contínuo • Dimensionamento | |
| | 10. Racionalização de Circuitos | |
| | <ul style="list-style-type: none"> • 2ª Lei: Equações de Continuidade • Circuitos Fechados e Classificação Externa • Circuitos em Etapas | |
| | 11. Otimização dos Processos Minerai | |
| <ul style="list-style-type: none"> • 3ª Lei: Equações de Otimização • Estudo Reológico de Polpas • Otimização Operacional • Sistema de Controle | | |



1.1.1.2 Energia

Energia externa aplicada à fase original (Fase 1), promovendo a ocorrência do fenômeno fundamental, com determinada seletividade e velocidade. Chamamos de energia externa pois as partículas não se movimentam naturalmente, apenas pela diferença de gradiente, como acontece com as operações moleculares, mas de forma forçada.

A energia utilizada na **Cominuição** é do tipo mecânica, transferida ao minério mediante placas de atrição ou impacto (britagem), ou mediante corpos moedores que transferem esta energia de forma massiva, numa mistura de impacto, atrição e abrasão. Nas operações de **Separação** a energia é utilizada seletivamente, para ativar as partículas de interesse e forçar a sua migração, e pode ser aplicada de diversas formas, dependendo do tipo de separação a ser utilizada, como ilustrado na **Figura 1.1.2**. Mais de um tipo de energia pode, ocasionalmente, ser utilizado para a mesma operação, como acontece com a mistura entre a força centrífuga e a hidrofóbica em alguns tipos de células de flotação.



Figura 1.1.2 – Migração Forçada de Partículas

No **Capítulo 5** será estudado este aspecto do processo, levando em consideração a ativação do fenômeno fundamental e a forma mais eficiente de aplicação da energia. A energia em excesso produz perda de Seletividade do processo; a energia insuficiente não permite atingir a performance metalúrgica desejada. O fenômeno fundamental, ativado pela energia aplicada, produz a transferência de massa a partir da fase inicial do material. Nas operações de Flotação, por exemplo, a energia hidrofóbica, propiciada pela adição de determinados reagentes, é dosada de forma quantizada e não de forma permanente e intensiva como acontece com a energia proveniente da força centrífuga, magnética e de gravidade.

1.1.1.3 Fases

Definiremos as fases de forma aproximada, pois elas não são claramente definidas como acontece com as operações químicas (sólido, líquido, gás). As fases básicas são: Rocha, Polpa e Espuma (Ar), e a combinação entre elas permite resumir as operações mais importantes, como ilustrado na **Tabela 1.1.2**.

Tabela 1.1.2 – Fases e Operações de TMMM

| ALIMENTAÇÃO | RECUPERAÇÃO DO PRODUTO | | |
|-------------|---|---|--------------------|
| | SÓLIDO | POLPA | AR |
| ROCHA | Britagem | Moagem a Úmido | Moagem a Seco |
| POLPA | <ul style="list-style-type: none">• Conc. Magnética• Conc. Gravítica | <ul style="list-style-type: none">• Conc. Centrífuga• Hidroclassificador | Flotação (Rougher) |
| ESPUMA | - | Flotação (Cleaner) | - |



A diferencia entre as operações de separação polpa – sólido ou polpa – polpa, se deve apenas à maior ou menor fluidez do produto, por exemplo, nas operações de hidrociclonagem, os fluxos de entrada e de saída seguem as Leis da Hidráulica. Assim mesmo, existem operações de separação magnética a seco, onde a fase inicial não é exatamente a “polpa”. O nome das fases é apenas aproximado e cada operação deve definir o seu próprio contexto.

A Interfase, em certas operações, corresponde à área de contato entre as fases envolvidas, onde existe, geralmente, uma movimentação entre ambos sentidos do fluxo, criando um certo equilíbrio entre as partículas empurradas pela energia de ativação e a volta de outras de menor susceptibilidade à energia utilizada. Esta drenagem de partículas, de volta para a fase original, é muito comum nas operações de flotação e em algumas outras operações de alta intensidade energética, como na hidrociclonagem. Algumas operações gravíticas e a separação magnética capturam partículas seletivamente a partir da fase inicial, sem criar interface entre a alimentação e o produto, pelo menos não em nível de interesse para a abordagem apresentada neste texto.

1.1.1.4 Fenômeno Fundamental

O fenômeno fundamental corresponde ao mecanismo de ocorrência derivado diretamente da aplicação da energia externa. Existem outros fenômenos auxiliares, que participam do processo, inerentes ao transporte de massa em meio viscoso e ao mecanismo de retirada do produto, e que influem significativamente, tanto em qualidade (Seletividade e Recuperação Metalúrgica) como em quantidade (SPLIT de massa concentrada). Na **Tabela 1.1.3** são resumidos os fenômenos mais importantes envolvidos nas operações de TMMM.

Tabela 1.1.3 – Fenômenos Envolvidos nas Operações de TMMM

| Operações mais Comuns | Fenômenos e Mecanismos Auxiliares | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|--------------------|
| | FUNDAMENTAL | SELETIVIDADE | RECUPERAÇÃO DO PRODUTO | CLASSIF. EXTERNA |
| COMINUIÇÃO | Quebra e Desagregação | <ul style="list-style-type: none"> Tipo de Quebra Classificação Interna | Função Transporte: Fluxo de Água ou Ar | Circuitos Fechados |
| SEPARAÇÃO COM CONCENTRAÇÃO - Migração Forçada de Partículas | | | | |
| FLOTAÇÃO | Flotação Natural | Na Captura Na Limpeza da Espuma | Razão de Concentração de Massa (Rcm) | - |
| SEPARAÇÃO POR CENTRÍFUGAÇÃO | Centrifugação | Fatores diversos como: Tamanho das partículas; % de sólidos; Transporte em meio viscoso, Gravidade Especifica da substância de interesse, etc. | 1) Leis da Hidráulica 2) Sedimentação 3) SPLIT (Rcm) 4) “Corte” | |
| SEPARAÇÃO MAGNÉTICA | Campo Magnético | | Razão de Concentração de Massa (Rcm) | |
| SEPARAÇÃO GRAVÍTICA | Força de Gravidade e Sedimentação | | Razão de Concentração de Massa (Rcm) | |

Nas operações de Separação com Concentração, em geral, a **Rcm** (Massa Alimentada / Massa Concentrada) é introduzida pelo **Modelo Operacional** como elemento de recuperação mássica do produto concentrado, e corresponde a uma decisão operacional, ou de “administração” do fenômeno fundamental. Para o caso da hidrociclonagem, podemos observar que, antes da obtenção do corte granulométrico, que é o objetivo metalúrgico principal, outros mecanismos derivados das leis da hidráulica acontecem prioritariamente.



O Fenômeno Fundamental de cada operação será visto com mais detalhe no **Capítulo 2**. A Seletividade se refere à forma como esta operação é executada, tanto no fenômeno fundamental como na parte de recuperação do produto. Na Cominuição, a Seletividade mostra a forma preferencial com a substância de interesse é liberada. Nas operações de Separação com Concentração, uma operação seletiva permite separar as partículas de interesse com maior nitidez, permitindo altas recuperações metalúrgicas com pouca quantidade de massa concentrada (Detalhes no **Capítulo 7**). A classificação externa corresponde ao fechamento dos circuitos de cominuição, cuja performance conjunta com o fenômeno fundamental é estudada no **Capítulo 10**, que trata da racionalização dos circuitos.

1.1.1.5 Transferência de Massa

Neste item nos estamos referindo às equações de descrição do transporte de massa, propostas pelo **Modelo Operacional**, baseadas na equação fundamental ilustrada na Figura 1.1.1.

Exemplo:

*Do ponto de vista metalúrgico, por exemplo, para a cominuição de materiais homogêneos ou quando o interesse da operação de cominuição é apenas a redução de tamanho, o mecanismo se resume à mudança de tamanho médio entre a alimentação **F** até um produto **P**, mediante a aplicação de energia.*



*Todas as operações com TMMM podem expressar-se desta forma, inclusive adicionando detalhes quantitativos que refletem os resultados metalúrgicos pretendidos, como por exemplo, para o caso da britagem de materiais heterogêneos (como são a maioria dos minérios), podemos expressar a reação de desagregação levando em conta a seletividade derivada da concentração da substância **A** de interesse (teor **x**) em determinadas faixas granulométricas, na operação de **britagem seletiva**, onde o produto pode ser posteriormente separado para produzir a pré-concentração do minério de interesse.*



Onde,

R = Rocha; $[\mathbf{R}] = \mathbf{R}_x \mathbf{x}$ = concentração da substância de interesse na Rocha

G = Grossos, com teor \mathbf{x}_g ;

M = Minério pré-concentrado, com teor \mathbf{x}_m ;

F = Finos, com teor \mathbf{x}_f .

Também, do ponto de vista físico, a velocidade em que as partículas abandonam a fase rocha, ou seja, quando atingem uma determinada combinação entre tamanho/liberação/peso, para serem transportadas como produto, pode ser representada da seguinte forma:

$$N_x = \text{Coeficiente de Transferência} \times \text{Área de Contato} \times \text{Gradiente}$$

Onde N_x é o fluxo mássico (massa/tempo)

*No caso da cominuição, a magnitude da energia aplicada, com relação à tensão de quebra ou dureza do material, seja por impacto, atrição ou abrasão, é o **Gradiente** que proporciona a força impulsora (diâmetro do moinho, tamanho da bola, por exemplo).*



O coeficiente de transferência refere-se à velocidade de ocorrência dos eventos de quebra (velocidade de rotação do moinho, por exemplo) e ao tempo disponível para esta aplicação (comprimento do moinho, por exemplo). A área de contato tem relação com a superfície de encontro entre as partículas e os corpos moedores (tamanho da bola, relação minério/bola, nível de carga do moinho, etc.).

Deste modo, a capacidade de cominuição poderia expressar-se da seguinte forma:

$$N_x, t/h = K_x A_x \Delta E$$

No **Capítulo 3** iremos explicar com maior detalhe a utilização destas expressões para a descrição fenomenológica dos processos mineriais com TMMM.

1.1.1.6 Recuperação do Produto

A recuperação do produto é a forma principal de “administrar” o fenômeno fundamental de ocorrência, e é um espaço que pertence, em grande medida, ao operador da usina. Este é um importante conceito introduzido pelo **Modelo Operacional**, que motivou o próprio nome do modelo. Voltando ao esquema básico apresentado na Figura 1.1.1, podemos observar que o fenômeno fundamental transfere naturalmente a massa ativada pela energia aplicada até a interface, que em muitos casos é apenas uma figura teórica, mas, o mecanismo de Recuperação do Produto, comandado pelo operador, administra esta transferência, transportando o produto de diversas formas em termos de qualidade (seletividade) e quantidade (Razão de Concentração de Massa - **Rcm**).

A recuperação do produto possui um componente hidráulico e um componente apenas mássico; em muitos casos ocorre uma mistura de ambos mecanismos. Por exemplo, na operação com hidrociclones, a função transporte é hidráulica, e separa vazões de acordo com as leis da hidráulica, de modo que a separação mássica é uma consequência do anterior, motivada pela sedimentação forçada no fluxo do concentrado. Dada uma determinada força centrífuga, em função da vazão e pressão do fluxo alimentado, uma mudança no tamanho do APEX, por exemplo, permite mudar a proporção de massa recuperada (SPLIT). Também podemos aumentar a proporção de massa pelo underflow adicionando mais água nova no fluxo alimentado.

Na operação de Flotação, a recuperação de massa possui os dois componentes:

- 1) A simples manipulação da espessura da camada de espuma existente permite mudar a quantidade de massa concentrada;
- 2) A adição de água na polpa alimentada, visando aumentar o SPLIT volumétrico de vazão de concentrado pelo lábio da célula. Esta situação acontece quando os recursos de manipulação da comporta de descarga são insuficientes, muitas vezes por causa de insuficiente número de células de flotação no banco.

Por exemplo, acomodando as comportas ou válvulas de descarga de uma célula ou banco de células de flotação e a alimentação de ar (forçada ou auto-induzida), é possível “operar” o circuito e, dentro de certas limitações, concentrar a massa que julgar conveniente. Pode-se obter altos teores de concentrado (com baixa recuperação metalúrgica) retirando da célula a camada superior de espuma – operação “suave”. Por outro lado, pode-se apressar o circuito e retirar uma maior quantidade de massa (menor **Rcm**), com maior recuperação, ainda que com menor teor no concentrado final – operação “rápida”.



Nas operações de Moagem, como não existe separação com concentração da massa produzida, a Função Transporte se refere à retirada volumétrica de toda a massa como produto, de dentro do equipamento, mediante fluxo de água ou de ar, dependendo do tipo de moagem utilizada. Nestes casos, a função transporte é fundamental para obter determinadas características no produto da moagem; um alto fluxo de transporte “arrasta” partículas maiores, dentro de certos limites; ou seja, a retirada oportuna do produto é tão importante quanto a própria cominuição que acontece na zona de moagem dentro do moinho.

Em muitas operações, os circuitos de limpeza são também uma forma de administrar o resultado oferecido pelo fenômeno fundamental, aperfeiçoando a quantidade e a qualidade do produto final, como por exemplo, a limpeza da espuma, gerada pelo fenômeno fundamental de Flotação. Neste último caso, as aplicações conjuntas do fenômeno fundamental e a recuperação do produto, fazem esta operação ser mais bem definida como Concentração de Massa por Flotação, ou seja, genericamente: recuperação de produto mediante aplicação de um determinado fenômeno fundamental.

Todos estes aspectos serão discutidos no **Capítulo 4**, com maior detalhe, de acordo com o esquema fundamental ilustrado na Figura 1.1.1, cuja abordagem oferece uma nova perspectiva para os processos mecânicos de beneficiamento de minérios:

- facilitando a sua compreensão fenomenológica;
- criando novos e confiáveis procedimentos para a pesquisa de mecanismos;
- melhorando a interpretação dos resultados metalúrgicos; e
- permitindo um sólido avanço de engenharia nas etapas de projeto, da forma como são normalmente estudadas as operações da engenharia química.



1.2 Fundamentos Básicos das Operações com TMMM

1.2.1 Repensar as Operações

Neste Item convidamos ao Leitor para repensar algumas operações mecânicas de beneficiamento de minérios. Para este efeito, estamos apresentando por separado o desenvolvimento do estudo fenomenológico dos processos (**Parte 1**), da pesquisa e determinação, no laboratório, das propriedades macrofenomenológicas que “medem” o fenômeno (**Parte 2**), e da engenharia dos projetos industriais (**Parte 3**), da forma como são abordadas as operações químicas de transferência de massa. Diversos conceitos utilizados neste texto já são em parte utilizados pelos engenheiros de processo mineral, nas operações moleculares de transferência de massa, como por exemplo: extração com solventes (ou também chamada de extração líquido-líquido), muito utilizada na recuperação hidrometalúrgica de Cobre e a Lixiviação e a adsorção com Carvão ativado, em processos hidrometalúrgicos de beneficiamento de Ouro. Durante o desenvolvimento do texto apresentaremos alguns exemplos de aplicação e de comparação. Também, aspectos cinéticos como a determinação de constantes cinéticas, distribuição do tempo de residência em estado estacionário (mediante técnicas de RTD – Residence Time Distribution), e muitos outros conceitos, serão novamente resumidos e aplicados neste texto.

O **Modelo Operacional** propõe uma analogia entre os processos químicos de transferência de massa e alguns dos processos mecânicos de beneficiamento de minérios, configurando uma nova interpretação macrofenomenológica para esses processos. Na indústria química, as operações diretas produzem duas fases a partir de uma solução de uma fase só, mediante a aplicação ou extração de calor (a destilação fracionada e a cristalização fracionada pertencem a este tipo). As operações indiretas envolvem a adição de outra substância e compreendem, entre outras, as operações de absorção gasosa e a dessorção, como foi utilizado para modelar o processo de Flotação (**Yovanovic, 2004**).

*En escala molecular, la transferencia de masa en una determinada fase es el resultado de una diferencia de concentración o **gradiente**, de modo que las moléculas individuales se difunden, moviéndose desde un lugar de alta concentración hasta otro de baja concentración. De manera diferente, en el área mineral, la **transferencia macromolecular** de masa ocurre como resultado de la aplicación de alguna fuente de **energía externa** que permite la “**migración**” de partículas, como por ejemplo, un campo magnético para separar partículas de mayor susceptibilidad magnética o la fuerza de hidrofobia para el fenómeno de flotación y para el caso de la conminución, el gradiente proviene de la diferencia entre la tensión de quiebra de la partícula y la fuerza externa aplicada en su fragmentación, en la fase roca.*

Na escala molecular, a transferência de massa numa determinada fase é o resultado de uma diferença na concentração ou **gradiente**, de modo que as moléculas individuais se difundem, deslocando-se desde um lugar de alta concentração até outro de baixa concentração. Diferentemente, na área mineral, a **transferência macromolecular** de massa acontece como resultado da aplicação de alguma fonte de **energia externa** que permita a “**migração**” seletiva de partículas como, por exemplo, um campo magnético para separar partículas de maior susceptibilidade magnética ou a força hidrofóbica para o fenômeno de flotação e, para o caso da Cominuição, o gradiente provém da diferença entre a tensão de quebra da partícula e a energia externa aplicada na sua fragmentação, na fase **rocha**.



A tradicional abordagem empregando analogias com conceitos de cinética das reações químicas, não consegue representar adequadamente os processos minerai. Entretanto, as diferenças dos fenômenos que ocorrem nesses dois ramos da engenharia não permitem realizar diretamente tal abordagem, como se indica na **Tabela 1.2.1**.

Tabela 1.2.1 – Transferência de Massa

| ITEM | MOLECULAR | MACROMOLECULAR |
|--------------------------------|---|--|
| Fundamento | Fenômeno de Transporte (quant. de movimento, calor e massa) | Cominuição, Separação e Concentração de Partículas |
| Transporte | Transferência Molecular de Massa | Transferência de Partículas |
| Mecanismo | Difusão (Lei de Ficks) | Migração Forçada |
| Gradiente de Transporte | Diferença de Concentração ou de Potencial Químico da substância de interesse entre as fases | Estímulo externo força a migração preferencial (seletiva) de determinadas partículas |
| Operação | Gradiente Contínuo, sem intervenção do operador | Gradiente Natural deve ser “administrado” pelo operador |
| Fenômeno | Natural (forças microscópicas) | Natural + Operacional |
| Fases | Normalmente homogêneas (sólido, líquido, gás) | Heterogêneas (polpa, espuma) |

No campo da engenharia química, nos anos 60, surgiu uma nova forma de interpretação dos princípios físicos fundamentais que descrevem o transporte de quantidade de movimento (fluxo viscoso), transporte de energia (condução do calor, convecção e radiação), e transporte de massa (difusão), este conjunto de temas foi documentado num livro que deu nome a esta nova matéria curricular dos estudantes de engenharia: os Fenômenos de Transporte (**Bird, R.B e outros, 1960**).

O transporte destes três elementos básicos é observado de forma molecular e contínua, onde a expressão básica que regula o transporte apresenta como força impulsora apenas o gradiente (diferencia de concentração ou de temperatura, por exemplo) e a espontânea ativação de mecanismos moleculares de transferência, que independem da aplicação externa, como ilustrado na **Figura 1.2.1**. Para as operações macromoleculares, introduzidas neste texto, o transporte é produzido pela migração forçada de partículas, mediante a aplicação de energia externa e específica para cada operação.

- **Transporte de Quant. de Movimento**
Lei de Newton, da viscosidade $\tau = -\mu \, dA/dx$
- **Transporte de Energia (Calor)**
Lei de Fourier $Q = m \, c_p \, \Delta t$ $\Delta t = (T_2 - T_1)$
- **Transporte Molecular de Massa**
Lei de Ficks, da difusão $D = f(\Delta C)$; $\Delta C = (C_2 - C_1)$

Figura 1.2.1 – Fenômenos de Transporte Molecular de Massa



1.2.1 Operações de Cominuição

Na área mineral, a **cominuição**⁽¹⁾ de partículas pode ser interpretada como uma operação direta (apenas que irreversível neste caso) em analogia com a operação de **destilação fracionada**. A destilação é um método de separação utilizado na engenharia química para separar os componentes de uma solução, o qual depende da distribuição das substâncias entre as fases gasosa e líquida, e é aplicável aos casos onde todos os componentes estejam presentes em ambas fases. Em lugar de introduzir uma nova substância na mistura para obter uma segunda fase, na destilação a fase gasosa é criada a partir da solução original por evaporação, com a aplicação de calor, de modo que o custo de adicionar energia deve ser sempre levado em conta nestas operações.

A cominuição acontece mediante a aplicação de energia mecânica ao equipamento, criando impacto, atrição e abrasão, de modo que podemos separar (desagregar) uma substância da sua rocha liberando ela em fragmentos de diversos tamanhos e com diferentes graus de liberação, como ilustrado na **Figura 1.2.2**. A liberação dos grãos individuais das substâncias inseridas na rocha (que seria, analogicamente, a mistura a ser submetida à destilação, onde os grãos representariam às moléculas) permite, nos materiais heterogêneos, o incremento do teor individual das partículas (liberação dos grãos) criando algum grau de classificação que incrementa o gradiente entre as fases rocha e polpa, utilizando e maximizando as diferenças específicas entre as substâncias liberadas, como por exemplo: a hidrofobia, a susceptibilidade magnética, a gravidade específica das substâncias e o próprio tamanho das partículas (fragmentos) ou grãos de substâncias diferentes.



Figura 1.2.2 – Esquema Básico das Operações de Cominuição

La roca será definida como una disolución en fase sólida de sustancias de interés, dentro de una solución de ganga. El grano será considerado como la unidad básica macromolecular del transporte. Este grano está inicialmente inserto en la roca, “disuelto” en ganga y, junto con la aplicación de energía de conminución, este grano acompaña los fragmentos de la roca que está siendo conminuída, partículas que son cada vez de menor tamaño y con mayor grado de liberación. El grado de liberación corresponde a la proporción de granos de sustancia y de ganga dentro de las partículas mixtas. Las partículas de menor tamaño normalmente presentarán mayor liberación. El objetivo de la conminución es la liberación de los granos de interés, en un nivel aceptable para la operación de separación que viene a seguir, y que normalmente corresponde a 80% de proporción de granos liberados dentro de una partícula mixta.

(1) Definiremos a **cominuição** como sendo o processo de redução de tamanho das partículas, em geral (inclui a britagem e a moagem). Por outro lado, a **moagem**, é uma forma prática de utilizar o fenômeno de cominuição que inclui submecanismos de impacto, atrição e abrasão, e, comumente, a utilização de corpos moedores, principalmente bolas de aço.



Carpenter R.D. (1957) afirma que, en la medida en que el mineral es molido, las fracturas ocurren más rápido a lo largo de los bordes de los granos, de modo que los minerales son primero reducidos hasta tamaños próximos al tamaño natural del grano. En la óptica del Modelo Operacional, la cominución es como si quisiéramos separar los granos de maní de dentro de una solución sólida de chancaca, de una roca (dulce) llamada “pé de moleque” (Brasil). El proceso posterior, de molienda todavía más fina, considera la reducción de tamaño abajo del tamaño natural del grano, siendo más difícil, pues involucra la fractura del propio grano.

A rocha será definida como uma dissolução em fase sólida de substâncias de interesse, dentro de uma solução de ganga. O grão será considerado como a unidade básica macromolecular do transporte. Este grão está inicialmente inserido na rocha, “dissolvido” em ganga e, junto com a aplicação de energia de cominuição, este grão acompanha os fragmentos da rocha que está sendo cominuída, partículas estas cada vez de menor tamanho e com maior grau de liberação.

O grau de liberação corresponde à proporção de grãos de substância e de ganga dentro das partículas mistas. As partículas de menor tamanho normalmente apresentarão maior liberação. O objetivo da cominuição é a liberação dos grãos de interesse, em nível aceitável para a operação de separação que se segue, e que normalmente corresponde a 80% de proporção de grãos liberados dentro de uma partícula mista.

Carpenter R.D. (1957) afirma que, na medida em que o minério é moído, as fraturas ocorrem mais rapidamente ao longo das bordas dos grãos, de modo que os minérios são primeiramente reduzidos até tamanhos próximos ao tamanho natural do grão. Na ótica do **Modelo Operacional**, a cominuição é como se quiséssemos separar os grãos de amendoim de dentro de uma solução sólida de rapadura, de uma rocha (doce) chamada “pé de moleque”. O processo posterior, de moagem ainda mais fina, envolve a redução de tamanho abaixo do tamanho natural do grão, sendo mais difícil, pois envolve a fratura do próprio grão.

As características específicas das substâncias presentes na rocha são mais evidenciadas quando o minério é mais heterogêneo (mais substâncias diferentes dentro da rocha) e quando a aplicação de energia é maior, ou seja, quando a redução do tamanho e a liberação dos grãos são mais acentuadas, aproximando o tamanho das partículas ao tamanho do próprio grão de cada substância. A aplicação de energia é muito complexa quando se trata da moagem e a sua medida macroscópica envolve perdas eletromecânicas de transmissão, de movimentação dos equipamentos, de corpos moedores, e do próprio minério.

Os grãos de diferentes substâncias inseridas na formação rochosa do minério são desprendidos da mistura quando a rocha é atingida por força externa (impacto, atrição ou abrasão), atingindo algum grau de concentração pela maior liberação dos grãos (maior teor individual) e apresentando tendência à classificação com base nalguma propriedade específica de cada substância que mostre maior diferença com as outras substâncias presentes na mistura (como a gravidade específica no caso da fase polpa, dentro do moinho, produzindo uma sedimentação das partículas mais pesadas). A retirada de alguma parcela de massa, aproveitando apenas o grau de separação produzido diretamente pela cominuição, faz parte do contexto da **pré-concentração** de minérios (a deslamagem também está considerada nesta operação), e a sua utilização é muito recomendável. A velocidade média de liberação da partícula, desde sua solução rochosa, dependerá da intensidade da energia aplicada e do grau de dureza da rocha, dentre outros aspectos.



A aplicação de energia normalmente é inversamente proporcional ao tamanho individual dos grãos, se despreendendo mais rápido as partículas de maior grão individual. Os minérios definidos como “moles” precisarão de menor energia para atingir o grau de liberação desejado. A energia líquida utilizada pela moagem no mecanismo específico de cominuição é quase impossível de medir, pois envolve muitas perdas por ineficiência, dissipação por ruído e calor, gasto energético entre os próprios corpos moedores, entre corpos moedores e o revestimento do moinho, etc.

Já liberadas (ou parcialmente liberadas), as partículas possuem algum grau de mobilidade, devida à heterogeneidade da rocha, por exemplo, no caso de alguns sulfetos, os grãos dirigem-se espontaneamente, pela sua hidrofobia natural, até o ponto de menor contato possível com a água e de menor pressão, ou seja, até a superfície da camada de transporte, em contato com a atmosfera (veremos mais adiante que a adição de reagentes de flotação, dentro do moinho, favorece a seletividade da moagem e, simultaneamente, a seletividade da flotação posterior para determinadas espécies); se os grãos de algumas substâncias fossem mais pesados que outros, as partículas mais ricas destas substâncias tenderão a sedimentar até o fundo do equipamento, na chamada “zona de moagem” (fase rocha), permitindo um maior contato com os corpos moedores (maior seletividade de cominuição) e atingindo um menor tamanho e maior liberação que as outras substâncias. Este mecanismo é definido como “*Classificação Interna*”. Na **Figura 1.2.3** é ilustrado o esquema básico das operações de moagem.

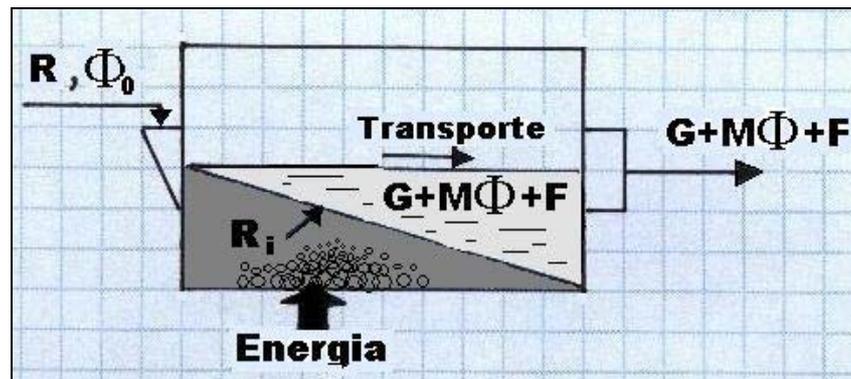


Figura 1.2.3 – Esquema Básico Operações de Moagem

Nas operações de moagem, por exemplo, a Rocha (**R**) é submetida a cominuição e, dentro do equipamento, ela se acumula parcialmente no fundo do equipamento, chamada de Zona de Moagem, com novas características de composição, tamanho e de liberação (**R_i**). Na medida em que o material atinge condições de ser transportado até a saída, a função transporte o fará, numa determinada velocidade. O produto (**P**) se divide em Grossos – **G** (muitas vezes ganga grossa e leve, que não interessa moer mais), em Finos – **F** (muitas vezes corresponde a material fino e leve, como as lamas, já existentes na alimentação) e uma parcela majoritária de material de interesse – **M**, que atinge o grau de liberação desejada.



Onde,

Φ_0 = Grau de liberação da substância de interesse (**A**) na Rocha;

Φ = Grau de liberação da substância de interesse na parcela principal do produto.



1.2.2 Operações de Separação com Concentração

A transferência de massa é parcial (Seletiva) e atinge, teoricamente, apenas às partículas de maior teor de substância de interesse, da forma ilustrada na **Figura 1.2.4**. Na fase inicial, as partículas devem estar convenientemente liberadas e, em quase todos os casos, devem possuir um tamanho médio dentro de uma faixa restrita, evitando as partículas mais grosseiras e também os superfinos e lamas, cuja performance metalúrgica é muito reduzida.

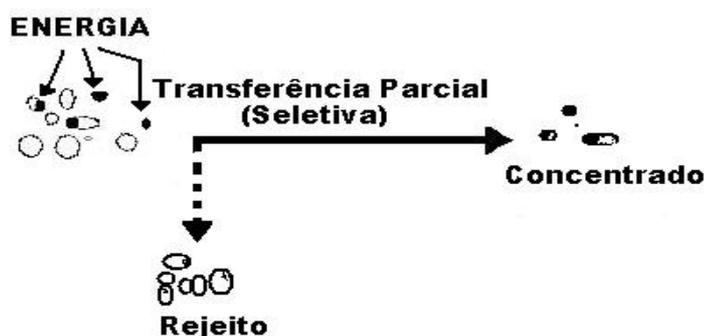


Figura 1.2.4 – Esquema Básico das Operações de Concentração Direta

Dependendo da proporção de massa concentrada e do sentido de fluxo da substância de interesse, a operação pode ser de (1) **concentração direta**, onde a substância principal, em quantidade significativa, é dirigida até o concentrado, ou seja, pelo sentido do gradiente de transporte, ou (2) **concentração inversa**, onde a substância principal é purificada, retirando por TMM uma pequena parcela de material susceptível ao tipo de energia de transporte utilizada. A modo de exemplo, podemos definir que a concentração de minério de Ferro por Flotação é um processo de concentração inversa, onde o minério de Ferro é afundado e purificado de partículas de Sílica e Alumina, as quais são transportadas para a Fase Espuma. Também acontece com processos de separação magnética com concentração inversa, cujo objetivo é de purificar concentrados de diversos minérios, como o Fosfato, Nióbio, e outros.

As operações podem ser a **seco ou a úmido**, sendo esta última forma mais comum nas usinas de beneficiamento. Além das características específicas do material, que definem a sua melhor **susceptibilidade** para serem transportadas seletivamente (alta gravidade específica, boa susceptibilidade magnética, alta flotabilidade, etc.), o **tamanho médio das partículas** é também um indicativo sobre o tipo de operação de separação a ser utilizada. **Bravo, C.S.V. e outros** (2004), estudando processos para concentração de minério aurífero, afirmam que, quando a maior parte do Ouro se distribui em uma faixa de tamanhos entre 150 e 100 μm , o minério é normalmente processado por métodos gravíticos; no caso de granulometria mais fina, é prática usual a concentração do metal por flotação.

De acordo com a analogia seguida com respeito aos processos químicos, podemos agregar que as operações de Separação podem ser diretas ou indiretas (não confundir com a “concentração” direta). A **separação direta** é utilizada em quase todos os métodos conhecidos, e não utiliza outra substância para executar a operação de transferência. A Flotação, excepcionalmente, utiliza bolhas de ar como veículo de transporte, de modo que definiremos esta como sendo de **separação indireta**.



1.2.2.1 Flotação

No caso da Concentração de Massa por Flotação, o reagente coletor é adsorvido na superfície das partículas de interesse, criando ou aumentando a sua hidrofobia. A adição de gás na fase polpa e captura das partículas hidrófobas caracteriza a dessorção macromolecular, retirando massa da fase líquida para o gás e mantendo o fluxo ascendente pela camada de espuma. A adição de água na superfície da espuma (lavagem) produz o arraste de partículas hidrófilas ou pouco hidrófobas de volta para a polpa, caracterizando uma absorção macromolecular, o chamado duplo mecanismo de drenagem, na fase espuma.

*La partícula no migra por si sola, sino que es cargada por burbujas de aire, desde la pulpa hasta la espuma mineralizada donde, después de ascender hasta la porción media de la corriente de espuma (concentrado) es arrastrada. La captura de la partícula es forzada en la fase pulpa por agitación mecánica (celdas convencionales) o neumática, por ejemplo, celdas de columna. En la **Figura 1.2.5** es ilustrado un resumen conceptual de ese proceso.*

A partícula não migra por si só, mas é carregada por bolhas de ar, da polpa até a espuma mineralizada onde, após levar até a porção média da corrente de espuma (concentrado) é arrastada. A captura da partícula é forçada na fase polpa por agitação mecânica (células convencionais) ou pneumática, por exemplo, células de coluna. Na **Figura 1.2.5** é ilustrado um resumo conceitual desse processo.

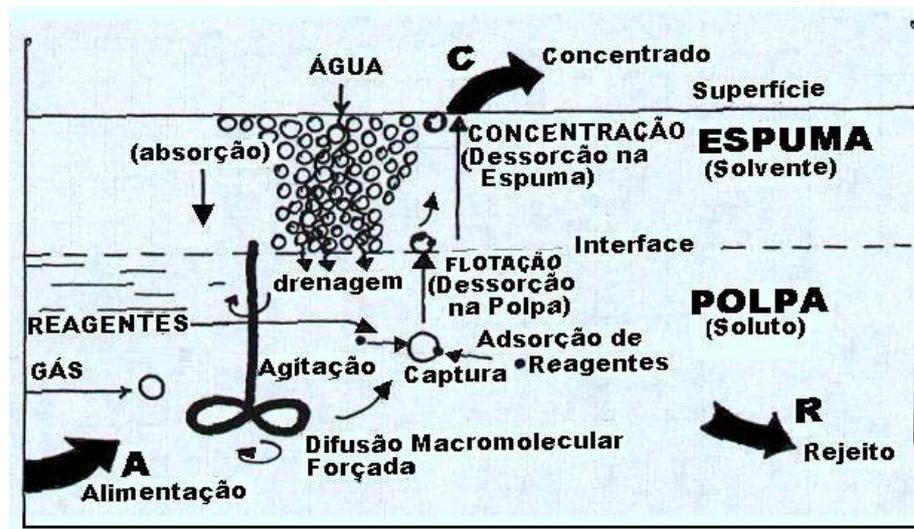


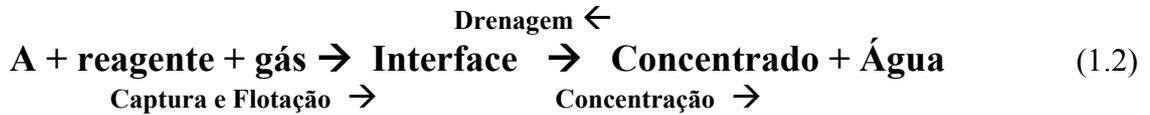
Figura 1.2.5 – Esquema Analógico das Operações de Flotação

Se a analogia química fosse a dessorção, a polpa residual (rejeito) seria considerada como soluto. No caso de mistura e separação de líquidos imiscíveis (extração com solvente) a polpa residual seria chamada de refinado. O que acontece, a rigor, é um fenômeno físico-químico de superfície que produz menor tensão superficial nas partículas, definindo a sua hidrofobia. O leitor deve entender que o enfoque principal do texto é uma analogia e não necessariamente a descrição científica do fenômeno de flotação.

A dessorção continua na fase espuma (solvente) por difusão macromolecular em fluxo laminar (não turbulento), criando um gradiente organizado desde a interface até a camada superior. A espuma não é agitada, justamente para permitir este mecanismo.



É adicionada água de lavagem para limpar a espuma de partículas pouco hidrófobas e de pouco conteúdo de substância de interesse, as quais são drenadas de volta à polpa, configurando um processo de absorção gasosa macromolecular e estabelecendo um duplo mecanismo na fase espuma.



Se a fase espuma fosse considerada como líquido (o que ocorre quando é repolpada) poderia interpretar-se também o processo de limpeza, chamado de "Cleaner", como uma extração em fase líquida; mas, pela necessidade de mobilização das partículas mediante bolhas de ar, recomenda-se manter (teoricamente) a característica gasosa da espuma, como fase de processo. A equação 1.2 constitui a expressão fundamental que descreve a abordagem analógica do processo de Concentração de Massa por Flotação. A interface é, em estado estacionário ⁽¹⁾, uma representação teórica do contato entre as fases, tanto na interface física que delimita a camada de espuma dentro do equipamento de contato e separação, como nos milhares de contatos: bolha / partícula que estão acontecendo em ambas fases.

Ao atingir o equilíbrio, seja em estado não estacionário (célula de laboratório) ou na última célula de um banco de flotação fracionada, em estado estacionário, a transferência de partículas termina e fica definida, fisicamente, a interface final do equilíbrio, que separa definitivamente os produtos ou fases.

Do ponto de vista dinâmico, operando em continuidade, o esquema básico do processo de flotação é ilustrado na **Figura 1.2.6**, onde se observa a existência de uma interface, entre as fases Polpa e Espuma, e uma transferência de partículas em ambos sentidos, como expresso na Equação 1.2 anterior.

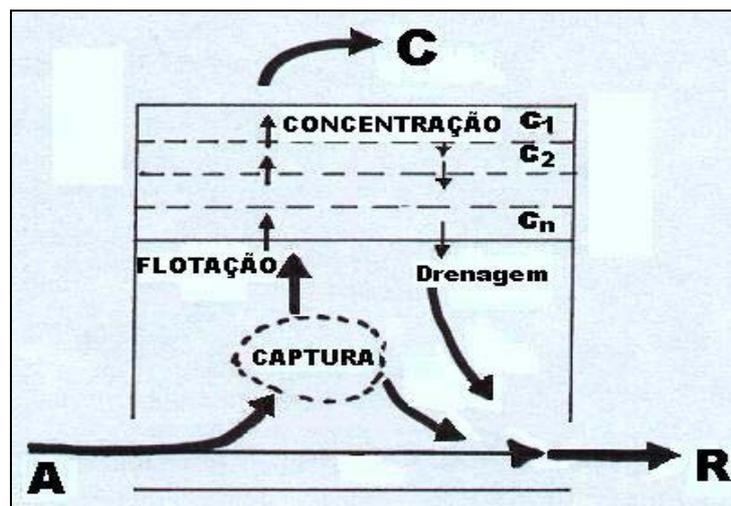


Figura 1.2.6 – Esquema Básico Operação de Flotação

(1) É característico da operação em **estado estacionário** que as concentrações em qualquer ponto do equipamento permaneçam constantes através do tempo. É uma característica da operação em **estado não estacionário** que as concentrações em qualquer ponto do equipamento mudem com o tempo. As operações realizadas em forma descontínua se encontram sempre entre as do tipo em estado não estacionário



1.2.2.2 Separação por Centrifugação

O transporte macromolecular, em meio viscoso, promovido pela força centrífuga, é, a rigor, uma operação de sedimentação forçada no sentido axial do equipamento, de modo que os mecanismos são os mesmos que os observados em outros classificadores/separadores que atuam apenas pela força de gravidade. A partícula é “empurrada” pela força centrífuga até a parede do equipamento (sedimentação forçada); as partículas mais pesadas (de maior tamanho e/ou de maior gravidade específica) possuem mais condições de avançar pela camada axial de polpa, que se torna altamente viscosa ao aproximar-se da parede do equipamento (adensamento). Nesta categoria podemos incluir os hidrociclones, que são muito utilizados na área mineral; os separadores centrífugos do tipo Knelson e outros, geralmente considerados dentro das operações chamadas de gravíticas; e as centrífugas comuns, da forma conhecida na indústria química, e que não iremos considerar neste texto. O esquema básico de transferência de massa destas operações segue uma lógica parecida com a equação 1.3 a seguir:

$$\begin{array}{ccccccc} & & & & \text{Drenagem} \leftarrow & & \\ & & & & \text{Interface} & \rightarrow & \text{Concentrado} \\ \text{A} + \text{força centrífuga} & \rightarrow & & & & & \\ \text{Centrifugação} & \rightarrow & & & \text{Recuperação do Produto} & \rightarrow & \end{array} \quad (1.3)$$

Na **Figura 1.2.7** é ilustrado o esquema básico das operações de centrifugação.

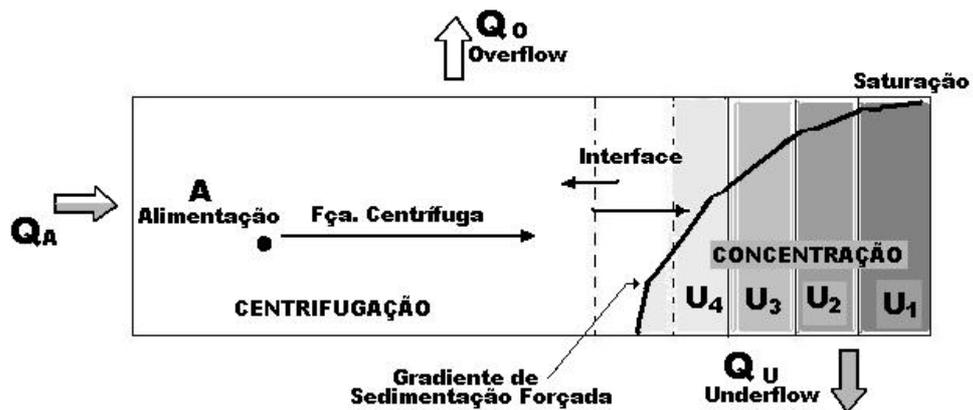


Figura 1.2.7 – Esquema Básico Operações de Separação por Centrifugação

O Leitor poderá observar a grande similitude fenomenológica entre as operações de separação, em geral. Por exemplo, se a Figura 1.2.7 fosse colocada no sentido vertical, pareceria muito com a operação de Flotação, trocando a força centrífuga pela hidrofobia (Flotação Rougher), o gradiente de sedimentação forçada pelo gradiente de concentração metalúrgica, e a retirada de camadas de espuma onde a primeira é mais rica na substância de interesse. No sentido contrário da flotação, o mesmo esquema poderia ser utilizado na separação por força de gravidade, com sedimentação natural.

A função transporte é exercida em termos volumétricos, pelo fluxo, de acordo com as leis da hidráulica. A relação Q_A/Q_U , de acordo com a densidade atingida em U, resulta numa determinada recuperação de massa no underflow, e pode ser mudada operacionalmente de diversas formas, como veremos em detalhe no **Capítulo 4**, seja (1) aumentando a diluição em Q_A , (2) aumentando a área do APEX em U, ou (3) até mesmo inclinando o equipamento, mudando a relação de pressões entre overflow e underflow. Em todos estes casos, a linha (ou região) de interface se desloca horizontalmente, de acordo à Figura 1.2.7.



Hidrociclones

Do ponto de vista do **Modelo Operacional**, o hidrociclone é fundamentalmente um equipamento hidráulico, que atende primeiramente às leis da mecânica de fluidos de onde surgem, da sua aplicação, as primeiras limitações:

1. Capacidade Hidráulica (Q), de acordo ao seu tamanho.
2. Divide fluxos: Vazão no Underflow e Overflow, de acordo com a relação (pressão / área) do APEX e do VORTEX.

Ainda sem considerar aspectos de design como velocidade e área de entrada, distância "h" da zona de centrifugação, etc., o hidrociclone cria um gradiente de força centrífuga do centro até as paredes do cilindro, onde as partículas mais grossas e pesadas se deslocam num meio viscoso, cumprindo as leis de transporte de quantidade do movimento.

Então, acontece que:

3. Aumenta a densidade da polpa no lado do Underflow.

O aumento de densidade, dentro da divisão dos fluxos (APEX/VORTEX), produz:

4. Partição da massa entre o OVERFLOW e o UNDERFLOW

Finalmente, **como conseqüência**, esta divisão de massa irá acontecer em algum ponto da faixa granulométrica característica do fluxo alimentado. Ou seja:

5. O hidrociclone produz um "Corte" granulométrico, com uma determinada eficiência e nitidez.

Em soma, o objetivo metalúrgico de separação com concentração está subordinado às leis da hidráulica, de modo que os resultados esperados de "corte" granulométrico, na faixa desejada (prévia análise granuloquímica por faixas) aparecem como conseqüência de um adequado dimensionamento hidráulico do equipamento e não ao inverso, como alguns modelos pretendem simular.

Na **Figura 1.2.8** é ilustrado um esquema básico de operação da transferência macromolecular de massa mediante a operação de hidrociclonação.

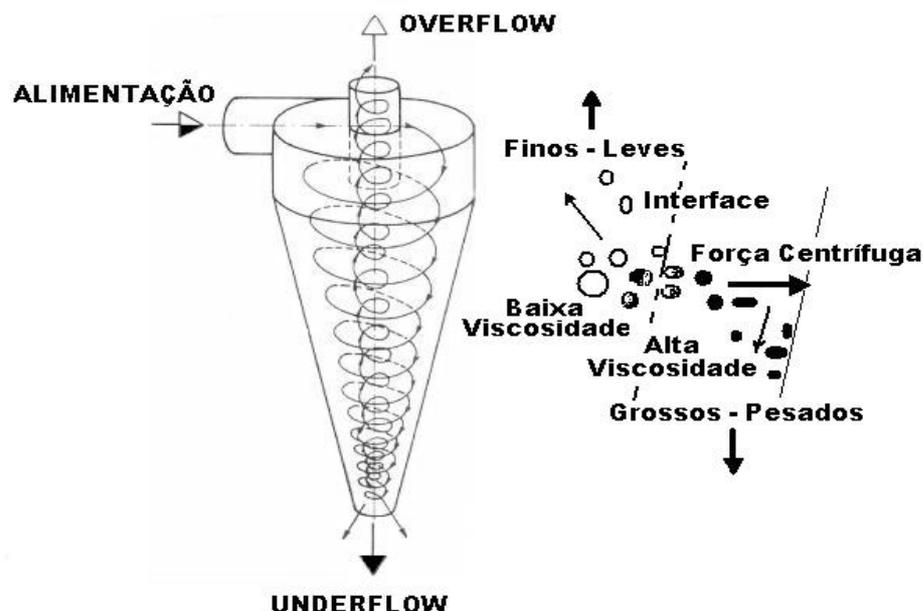


Figura 1.2.8 – Esquema de Operação do Hidrociclone



As operações de classificação/separação com ciclones podem ser feitas a seco ou a úmido. Neste texto nos limitaremos a discutir as operações a úmido (hidrociclones).

As relações de pressão e área dos orifícios de saída influem na repartição do fluxo volumétrico, definindo uma interface que delimita as probabilidades de saída do fluxo até um ou outro orifício. O fluxo do underflow, ao possuir maior densidade, transporta maior proporção de partículas, definindo, para as operações de classificação, um certo “corte granulométrico” no fluxo alimentado, mais ou menos nítido ou eficiente, dependendo de diversas variáveis (Seletividade); nas operações de separação com concentração, tema deste texto, o hidrociclone concentra as partículas de maior gravidade específica no underflow e as partículas mais leves no overflow, como acontece com as operações de deslamagem. Diferentes partículas irão atingir cortes granulométricos diferentes, de modo que para fluxos de partículas heterogêneas, como acontece com grande parte das operações, o hidrociclone separa com concentração de massa no produto (neste caso, definiremos o underflow como produto ou concentrado).

Para efeitos práticos, do ponto de vista de engenharia de processos, o hidrociclone será dimensionado como sendo um equipamento hidráulico, seguindo a receita apresentada no começo deste item. Sua utilização como equipamento de concentração de massa, devido a sua baixa seletividade, será direcionada apenas para os cortes extremos, em ambos lados do fluxo: a **deslamagem**, ou concentração indireta, purificando o fluxo dos superfinos leves, e a **concentração direta de partículas de alta densidade**, como preparação para outros processos de concentração, preferentemente os métodos gravíticos.

Como acontece com quase todas as operações, a aplicação simultânea de outro tipo de energia pode ser utilizada, seletivamente, para determinadas partículas de interesse. É o caso da chamada “hidroflotação” ou “flotação centrífuga”, ou seja, flotação incrementada por força centrífuga. A adição de reagentes de flotação, no fluxo de alimentação, permitiria aumentar a proporção de partículas hidrófobas pelo fluxo do overflow.

No **Capítulo 10**, teremos oportunidade, também, de estudar a operação de hidrociclones, em circuito fechado, como elementos de classificação externa de operações de cominuição, desta vez apenas com a finalidade de classificar pelo tamanho, sem objetivos metalúrgicos de concentração de massa.

Separadores Gravíticos por Centrifugação

Os processos gravíticos, em geral, se utilizam obviamente da Gravidade Específica de determinadas partículas em relação ao médio de transporte, normalmente água (polpa). Os critérios que definem a performance destas operações são, normalmente:

1. **Área superficial de concentração ou contato**, como é fundamentalmente o caso dos separadores gravíticos convencionais, que operam apenas em função da sedimentação, e que iremos discutir no item 1.2.2.4. Este critério de avaliação é importante também nos equipamentos de separação por centrifugação, pois uma maior área de contato permitiria reduzir a espessura da camada de interface e permitiria que os mecanismos básicos de transferência de massa entre as fases possam acontecer com menor aplicação de energia, ou seja, com menor pressão. Equipamentos com maior área de contato são, por norma geral, mais eficientes;



2. **Força Centrífuga** (campo de força, expresso em função da aceleração de gravidade - G), que permite a separação de, por exemplo: Ouro livre (60 G's) ou Tântalo fino ou ferro (> 300 G's), cujo gradiente é função inversa da gravidade específica da substância de interesse. Trata-se da aplicação de energia neste tipo de operações, matéria que veremos com maior detalhe no **Capítulo 5**;
3. **Aceleração da polpa**, como observado nos hidrociclones. A simples rotação do equipamento não é tão efetiva como quando a polpa é alimentada em alta velocidade, maximizando o gradiente de transporte.

É importante comentar que a literatura convencional (**Weiss, N.L**, 1985) define as operações gravíticas como sendo os processos onde partículas de diferentes tamanhos, formas ou gravidade específica, são separadas umas das outras pela força de gravidade ou pela força centrífuga. Do ponto de vista das operações com TMMM, as operações de hidrociclonagem e de moagem a úmido, também utilizam a diferença de gravidade específica entre as partículas, e nem por isso são chamadas de operações gravíticas. Em soma, a proposta deste texto é de organizar as operações unitárias em função do tipo de energia aplicada ao fenômeno fundamental e não apenas pelas propriedades do minério.

A eficiência das separações gravíticas convencionais é muito baixa quando o tamanho da partícula se torna muito fino, ao redor de $100 \mu\text{m}$. Os separadores gravíticos por centrifugação, como por exemplo, do tipo Knelson ou Falcon Superbowl, são frequentemente utilizados para tamanhos menores de partícula, inclusive até a faixa de $38 \mu\text{m}$, com relativa eficiência. Seguindo com o esquema fundamental ilustrado na Figura 1.1.1, os mecanismos de transferência entre a massa alimentada e o produto concentrado, motivados pela energia de pressão centrífuga, são principalmente: infiltração, deposição superficial, substituição e elutriação, como resumido na **Tabela 1.2.2**.

Tabela 1.2.2 - Mecanismos de Transporte nas Operações Gravíticas por Centrifugação

| Mecanismo | Definição | Velocidade do Fluxo | Pressão (kPa) |
|------------------------------|--|---------------------|---------------|
| Infiltração | Quando as partículas transportadas são menores que os espaços livres dentro da camada porosa de interface, permitindo que estas partículas atinjam a zona de descarga de produto | baixa | 10 - 30 |
| Deposição Superficial | As partículas densas de interesse são maiores que os interstícios da interface, acumulando-se na superfície da camada. | | |
| Substituição | A camada de ganga é parcial ou totalmente fluidizada, pela alta pressão, de modo que algumas partículas mais densas substituem outras de ganga, de menor densidade, dentro da camada do produto. | alta | 40 - 70 |
| Elutriação | A alta pressão produz uma substituição volumétrica de ganga, pela alocação de material de maior densidade dentro da camada. | muito alta | > 70 |



1.2.2.3 Separação Magnética

A operação de separar uma partícula de outra, mediante a aplicação de um campo magnético, é chamada de Separação Magnética (Bronkala, W.J., 1980). A utilização principal desta técnica pode dividir-se em duas categorias: Separação de Proteção (para proteger equipamentos como britadores, normalmente em frações granulométricas grosseiras e a seco) e Separação com Concentração, que é o tema deste texto, operando em faixas granulométricas mais finas, e que podem operar a seco ou a úmido.

Qualquer partícula situada dentro de um campo magnético é afetada de alguma forma:

- 1) Partículas diamagnéticas, as quais são repelidas;
- 2) Partículas paramagnéticas, que são atraídas pelo campo magnético:
 - 2.1.- fortemente magnéticas (ferro-magnéticas);
 - 2.2.- levemente magnéticas;
 - 2.3.- não magnéticas.

A força magnética atua normalmente em sentido contrário à força de gravidade, que retêm na fase inicial as partículas que não desejamos transferir. Assim, o campo magnético deve fornecer, como mínimo, a força suficiente para que as partículas transferidas possam vencer a força de gravidade, ou seja, o seu próprio peso, da forma ilustrada na **Figura 1.2.9**.

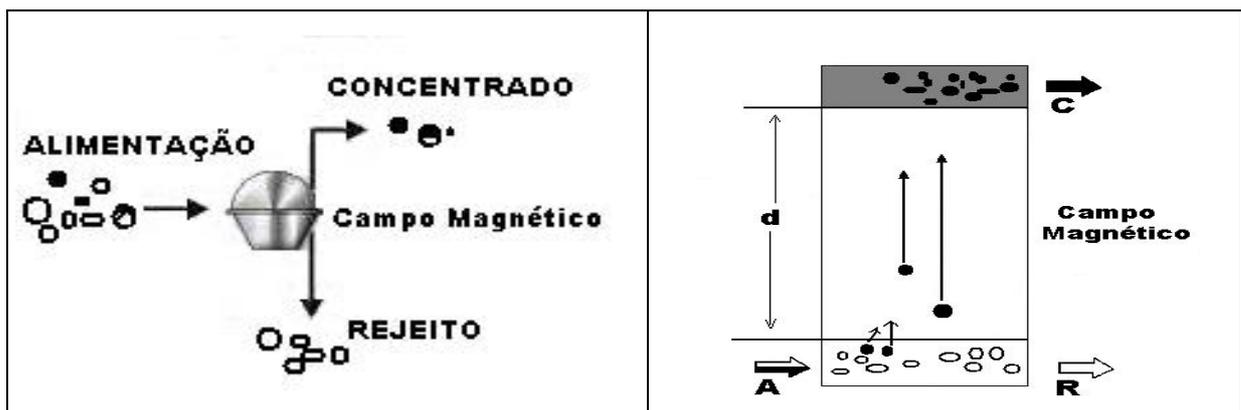


Figura 1.2.9 – Esquema Básico das Operações de Separação Magnética

Neste tipo de separação, por **captura ou atração de partículas**, não existe interface, pelo menos da forma como acontece em outras operações, pois a partícula é extraída da fase polpa de forma individual, fora do contexto geral de transporte fluidizado da fase, como se fosse um peixe fígado com anzol. O esquema básico de transferência de massa destas operações segue uma lógica parecida com a equação 1.4 a seguir:

$$\begin{array}{l} \mathbf{A + força magnética} \rightarrow \mathbf{Concentrado} \\ \mathbf{Separação Magnética} \rightarrow \mathbf{Recuperação do Produto} \end{array} \quad (1.4)$$

O Fenômeno Fundamental de separação magnética, ativado pela intensidade do Campo Magnético (Gauss), ainda pode ser “administrado” pela função transporte, modificando a distância **d** entre o fluxo alimentado e a placa magnetizada, como observado na Figura 1.2.9. As características da alimentação também influirão significativamente na performance do processo, como o tamanho das partículas, a liberação do componente de interesse, a sua susceptibilidade magnética, a % de sólidos na polpa alimentada e a velocidade do fluxo, dentre outros aspectos.



1.2.2.4 Separação por Força de Gravidade e Sedimentação

Diversas operações utilizam a diferença de gravidade específica entre as substâncias submetidas à separação com concentração, utilizando como força impulsora apenas a força de gravidade. Nestes casos, podemos dizer que o fenômeno fundamental observado é a sedimentação. Nesse grupo podemos identificar dois tipos principais: de extração seletiva de **partículas sólidas** a partir da polpa (separação gravítica) ou de **separação de polpas** com base na sedimentação (hidroclassificadores). As operações simples de espessamento normalmente não são utilizadas com fins de concentração, mas apenas para recuperação de água e/ou adensamento de polpas (espessadores) ou de limpeza de efluentes (clarificadores), de modo que não serão consideradas nesta abordagem.

Separação Gravítica Convencional

Dentro destas operações podemos citar o Jigue, mesas concentradoras e espirais, como os processos mais comuns dentro desta categoria. No Jigue, a capacidade de produção é diretamente proporcional à área do leito.

Nesse tipo de separação, por captura seletiva de partículas, do mesmo modo que nas operações de separação magnética, não existe interface. O esquema básico de transferência de massa destas operações segue uma lógica parecida com a equação 1.5 a seguir:

$$\begin{array}{l} \mathbf{A + força de gravidade} \rightarrow \mathbf{Concentrado} \\ \text{Separação Gravítica} \rightarrow \text{Recuperação do Produto} \end{array} \quad (1.5)$$

Hidroclassificadores

A pesar de terem sido originalmente criados apenas como classificadores (tamanho), para circuitos fechados de moagem, algum grau de separação com concentração é produzido quando o material está devidamente liberado, em tamanhos grossos, onde a diferença de gravidade específica das espécies presentes definirá o grau de seletividade e eficiência deste processo, como operação de separação com concentração. Normalmente este tipo de equipamento é ainda utilizado nas usinas de beneficiamento meramente como classificador.

O fenômeno fundamental de Sedimentação é ativado pela energia proveniente da força de gravidade, com maior sucesso (seletividade) nas partículas mais pesadas (maiores ou de maior gravidade específica). A Sedimentação irá requerer de um tempo mínimo para acontecer da forma desejada (Cinética de Sedimentação), cria um inventário de massa dentro do equipamento e mantém uma certa interfase com a função transporte, a qual define o rumo que a partícula irá seguir (Overflow ou Underflow).

A função transporte é exercida pela velocidade do espiral, e depende de uma decisão do operador, no sentido de atingir a **Rcm** e a Recuperação desejada. O Ponto de Operação (**R**, **Rcm**) pode flutuar entre os limites impostos pela velocidade de retirada, com produto cada vez mais próximo da alimentação (alta Recuperação mássica, baixo Rcm) ou de alta Seletividade (Alto Rcm), em condições próximas da saturação hidráulica da polpa, em termos de densidade. Para o caso de operações de simples classificação, a função transporte irá definir o corte granulométrico da operação. A rigor, trata-se de um tanque de sedimentação comum, operando de forma contínua, provido de um dispositivo mecânico helicoidal que exerce a função transporte do produto sedimentado, como ilustrado na **Figura 1.2.10**.



Figura 1.2.10 - Esquema Básico do Hidroclassificador de Espiral

Dependendo do tamanho / gravidade específica das partículas, que levam a produzir diferentes taxas de sedimentação dentro do equipamento (tanque inclinado), a recuperação do produto é executada por uma ou duas espirais, que transportam lentamente, com uma adequada taxa de remoção (R_{cm}), as partículas mais “pesadas” de interesse, desde o fundo do equipamento para fora do tanque de sedimentação. O esquema básico de operação é ilustrado na **Figura 1.2.11**, onde novamente podemos observar a grande semelhança entre os diversos fenômenos até agora observados.

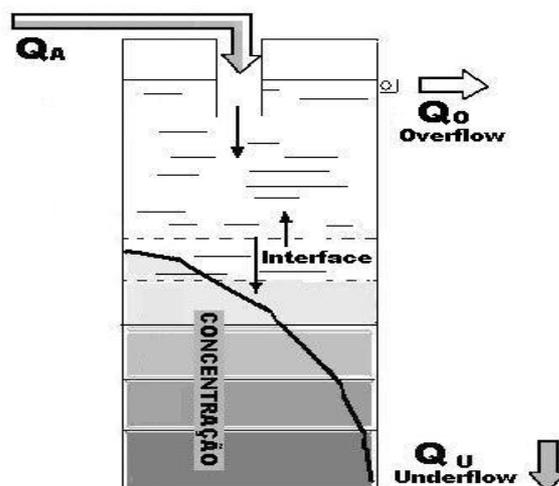


Figura 1.2.11 – Esquema Básico nas Operações com Hidroclassificação

Para efeitos deste texto, esta operação será avaliada na sua condição de separar produzindo concentração ou purificação da substância de interesse. A concentração de minério de ferro (sinter feed) mediante a redução do conteúdo de Sílica é um bom exemplo de utilização deste processo. A classificação da faixa granulométrica exigida para o sinter feed (150 até 10.000 μm) traz consigo, simultaneamente, uma concentração do minério de Ferro.

O esquema básico de transferência de massa destas operações segue uma lógica parecida com a equação 1.6 a seguir:

$$\begin{array}{ccccccc} & & & \text{Drenagem} \leftarrow & & & \\ \text{A} + \text{força de gravidade} & \rightarrow & \text{Interface} & \rightarrow & \text{Concentrado} & & (1.6) \\ \text{Sedimentação} \rightarrow & & \text{Recuperação do Produto} & \rightarrow & & & \end{array}$$



1.3 O Modelo Operacional

1.3.1 Geral

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). Durante 1908 foi reportada a operação do primeiro moinho tubular, para minério de Barita, operando de forma autógena. 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 Químicos consideram que os processos mecânicos de beneficiamento estão fora da sua área de atuação. Engenheiros de Minas, paradoxalmente, utilizam abordagens da engenharia química para tentar interpretar e simular os processos, em analogia com as reações químicas e reatores (constantes cinéticas, distribuição de tempo de residência - RTD, etc.) ou até mesmo com complexas equações derivadas dos Fenômenos de Transporte, que pretendem simular virtualmente o fluxo dinâmico de massa numa condição qualquer da usina, que raramente é a ótima, sem indicar o mais básico: o caminho ótimo para o processo.

Matemáticos participam com técnicas de Estatística Avançada e Programação Lineal, gerando algoritmos de filtragem que fazem com que qualquer modelo acabe se adaptando à realidade, qualquer que seja essa realidade, seja estimando valores desconhecidos ou difíceis de medir, ou ajustando dados chamados errados ou sujos, porque não se ajustam ao modelo utilizado. Versões chamadas de estendidas ou adaptativas desse "filtro matemático" permitem que os próprios parâmetros do modelo original de simulação sejam constantemente modificados, levando em consideração as recentes experiências adquiridas pelo processo, a cada instante, como se fosse um avançado sistema de ajuste de curvas. Com tudo isso, a realidade do processo ainda permanece desconhecida.

Engenheiros Mecânicos têm muitas coisas a dizer sobre o SPLIT de distribuição hidráulica de massa nos produtos de muitas operações da área mineral, como a hidrociclonagem e também a flotação. O transporte de fluxo viscoso e a hidrodinâmica nos equipamentos de contato são outros tópicos que podem ser destacados. 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" dos processos foi introduzida a lógica nebulosa ou difusa para considerar as apreciações qualitativas do operador, do tipo: "o moinho está barulhento", "a espuma está esverdeada" ou "as bolhas arrebentam com facilidade".

O engenheiro de processos está perdendo o seu espaço dentro das usinas; 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 de equipamentos padronizados, e usinas enxutas, de baixo investimento e custo operacional, requerem também uma interpretação macroscópica simples, porém clara, dos processos de beneficiamento, em geral, e particularmente do processo de moagem, de longe a operação mais cara em investimentos e custo operacional das usinas de beneficiamento mineral. 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 beneficiamento mineral. A disciplina "Transferência Macromolecular de Massa" pode servir de apoio para os profissionais da área mineral, nessa constante procura do seu particular espaço científico/teórico nas ciências da engenharia.

1.3.2 A Estrutura do Modelo Operacional

*El **Modelo Operacional** establece una analogía con los procesos químicos de transferencia de masa sugiriendo, inclusive, la creación de una nueva materia específica para introducir en el programa de estudios de los ingenieros químicos y de minas, la Transferencia Macromolecular de Masa, que propone estudiar diversos procesos de tratamiento de minerales en la perspectiva macromolecular (partículas, granos), mas de la forma como son estudiados los procesos moleculares de la ingeniería química, o sea: **¿Cómo las partículas actuarían si ellas fuesen moléculas?**. Conociendo esta condición, que normalmente hace tender los procesos hasta el equilibrio o, en la falta de este, indica el mejor camino para llegar al producto, el operador puede actuar sobre el circuito, induciendo el flujo másico bajo esta importante orientación, y por eso el modelo es llamado de operacional. El modelo no simula condiciones aleatorias de proceso, mas define su camino óptimo, o sea, es un **modelo de optimización y no de simulación**. El proceso de Concentración de Masa por Flotación fue integralmente desarrollado bajo esta óptica, en analogía con el proceso de absorción gaseosa (Yovanovic, 2004).*

O **Modelo Operacional** estabelece uma analogia com os processos químicos de transferência de massa sugerindo, inclusive, a criação de uma nova matéria específica para introduzir no programa de estudos dos engenheiros químicos e de minas, a Transferência Macromolecular de Massa, que propõe estudar diversos processos de tratamento de minérios na perspectiva macromolecular (partículas, grãos), porém da forma como são estudados os processos moleculares da engenharia química, ou seja: **Como as partículas agiriam se elas fossem moléculas?**. Conhecendo esta condição, que normalmente faz tender os processos até o equilíbrio ou, na falta dele, indica o melhor caminho para chegar ao produto, o operador pode atuar sobre o circuito, induzindo o fluxo mássico acima desta importante orientação, e por isso o modelo é chamado de operacional. O modelo não simula condições aleatórias de processo, mas define o caminho ótimo dele, ou seja, é um modelo de otimização e não de simulação.

Estabelecendo a analogia com os processos moleculares, o modelo passa, numa segunda fase, a identificar o fenômeno real que deve ser estudado e extrapolado para as operações industriais, que consiste numa combinação entre o fenômeno fundamental (submetido à aplicação de energia), os mecanismos de transporte e a função de retirada do produto. O terceiro passo é definir a propriedade macrofenomenológica do modelo, que será utilizada nos cálculos de dimensionamento. Salvo indicação em contrário, todo o desenvolvimento teórico sobre processos minerai utilizado neste livro corresponde à visão de Transferência Macromolecular de Massa introduzida pelo **Modelo Operacional**, e a determinação dos seus mecanismos macroscópicos será preferentemente observada para sistemas contínuos (e em estado estacionário).



1.3.3 Leis do Modelo Operacional

Nesta nova abordagem, o **Modelo Operacional** introduz novos conceitos na área mineral:

1. **Fenômeno Real**

As operações levam em conta, além do fenômeno natural de ocorrência, os sub-processos de classificação hidráulica e de transporte macromolecular em meio viscoso, incorporando as atuações do operador nas rotinas de simulação.

2. **Transferência Macromolecular de Massa**

A transferência de massa é interpretada de maneira macromolecular, onde a migração dos grãos ou partículas (mediante a aplicação de energia) é observada em analogia com as operações utilizadas na engenharia química.

3. **Equações de Continuidade**

A descrição do processo no estado estacionário é feita a partir de equações de continuidade, 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 molecular.

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 **otimizante**, porque ele determina as condições ótimas de operação e permite que o operador (ou o sistema de controle automático) induza o processo até o ponto ótimo.

Leis Matemáticas e Aplicações do Modelo

- **Primeira Lei:** Define o fenômeno fundamental, ou propriedade macrofenomenológica e o seu scale-up para a operação contínua industrial.
Aplicações: Avaliação de estudos em laboratório e/ou usina piloto; rotinas de “scale-up”; dimensionamento dos equipamentos; maior confiabilidade do projeto.
- **Segunda Lei:** Expressão matemática que descreve o processo em estado estacionário, chamada de **Equação de Continuidade**.
Aplicações: Avaliação geral / diagnóstico da usina; controle preciso dos operadores sobre a usina; identificação de problemas operacionais.
- **Terceira Lei:** Equação matemática que expressa a condição ótima para o processo, Chamada de **Equação de Otimização**.
Aplicações: Máxima capacidade e/ou mínimo custo de operação; melhores resultados metalúrgicos; sistemas especialistas de controle; estabilidade operacional.



Figura 1.3.1 – A Estrutura do Modelo Operacional