Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral

Carlos Antônio de Morais, Rodrigo Oscar de Albuquerque e Ana Claudia Queiroz Ladeira

Este capítulo descreve como a química e a fisicoquímica podem ser utilizadas para a obtenção de metais a partir dos mais diversos minérios. São descritas as técnicas mais comumente utilizadas pelas indústrias de mineração e metalurgia.

► cominuição, flotação, lixiviação, troca iônica, extração por solvente, precipitação ◀

Recebido em 13/03/2014, aceito em 24/04/2014

a crosta terrestre, são encontrados minérios de origens e formações variadas, definidos como uma associação de minerais, diferentes e de variada proporção, em sua grande maioria, de elevado valor econômico. A principal atividade provedora de matérias-primas para a humanidade é a mineração. A partir do processamento desses minérios, obtêm-se diferentes produtos, utilizados em diversos setores industriais. No tratamento de minérios, existem processos de beneficiamento físico, nos quais se obtêm os concentrados minerais e os processos químicos/hidrometalúrgicos, em que o elemento de interesse na forma sólida é solubilizado

e a solução produzida é purificada, gerando um concentrado do elemento de interesse.

O beneficiamento físico e químico de minérios busca adequar os diferentes tipos de minérios às exigências de mercado, além de prepará-los para a etapa de processamento químico. As operações envolvidas no beneficiamento físico descritas neste trabalho são: cominuição, classificação por tamanho, concentração física e

separação sólido-líquido. Na concentração física, destaca-se a flotação, principal técnica utilizada que, no Brasil, desempenhou papel fundamental para o crescimento da mineração, principalmente para as indústrias de ferro e fosfato. No

beneficiamento químico ou processamento hidrometalúrgico, as técnicas mais comumente empregadas são: lixiviação, extração por solventes (extração líquid-líquido), troca iônica e precipitação química. A lixiviação corresponde à transferência do metal de interesse do estado sólido para uma fase líquida. As técnicas de extração por solventes, troca iônica e precipitação podem ser utilizadas tanto para a purificação do licor quanto para a concentração e a obtenção de um determinado metal em elevada pureza. O metal em solução na forma pura pode ser encaminhado para um processo eletrolítico para a obtenção do metal na forma sólida ou então

precipitado na forma do composto químico de interesse.

O beneficiamento físico e químico de minérios busca adequar os diferentes tipos de minérios às exigências de mercado, além de prepará-los para a etapa de processamento químico. As operações envolvidas no beneficiamento físico descritas neste trabalho são: cominuição, classificação por tamanho, concentração

física e separação sólido-líquido.

Beneficiamento físico

O conjunto de operações sequenciais usadas no tratamento de minérios permite a adequação dos bens naturais em produtos com características e qualidade que atendem às especificações dos demais setores industriais que os empregam. Essas operações

envolvem as etapas de cominuição (britagem e moagem), classificação por tamanho (peneiramento, classificação em meio fluido), concentração (gravimetria, separação magnética, flotação) e separação sólido-líquido (espessamento,

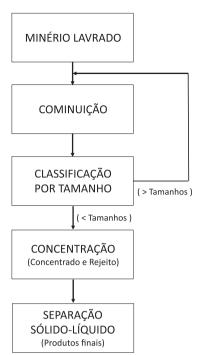


Figura 1: Fluxograma simplificado das operações usadas no beneficiamento físico de minérios.

filtragem), além de diversas outras operações auxiliares tais como amostragem, estocagem, transporte, entre outras (Valadão; Araújo, 2007). Na Figura 1, tem-se um fluxograma simplificado das operações utilizadas no tratamento de minérios.

Cominuição e classificação por tamanho

Após a lavra do minério, a operação inicial usada no tratamento de minérios é a cominuição (fragmentação). A britagem é o primeiro estágio dessa etapa e atua na faixa granulométrica de tamanhos maiores (do metro ao centímetro). Divide-se geralmente em britagem primária e secundária, e os equipamentos empregados apresentam grande robustez. São utilizados normalmente britadores de mandíbulas, de impacto, de rolo dentado, de rolo liso, giratório, cônico etc. Operam geralmente a seco e em circuito aberto ou fechado e em conjunção com grelhas e peneiras vibratórias (Araújo et al., 2006).

Em seguida, utiliza-se a moagem, segundo estágio do processo de cominuição e que atua na faixa granulométrica do centímetro ao micrômetro. São utilizados moinhos de meios revolventes, que são cilindros rotativos em que a fragmentação do minério é realizada no seu interior pela ação de corpos moedores tais como bolas, barras ou fragmentos do próprio minério. Os moinhos são fabricados com materiais metálicos, em geral, aços especiais e alguns tipos de ferro fundido, cerâmica e com revestimento de borracha. De um modo geral, esses equipamentos trabalham a úmido em circuito aberto ou fechado em conjunto com peneiras vibratórias, classificadores espirais e hidrociclones (Peres et al., 2007).

Um circuito de cominuição envolve, portanto, etapas coordenadas de britagem e moagem, intercaladas por

operações de classificação por tamanho, cujo objetivo é produzir, a partir do minério bruto, um material com distribuição granulométrica adequada ao seu uso posterior. O adequado dimensionamento e a disposição dos equipamentos dependem das características do minério a ser fragmentado. Diferentes minerais encontram-se naturalmente incrustados uns nos outros (Figura 2). O processo de cominuição é realizado com o objetivo de promover a liberação dos minerais, gerando partículas individualizadas, apropriadas para uso na etapa de concentração.

As etapas de classificação por tamanho envolvem operações de peneiramento e classificação em meio fluido. São realizadas com o objetivo de adequar, juntamente com as etapas de cominuição, a granulometria dos minérios para um estágio posterior de concentração. No classificador, são obtidos dois produtos: *overflow* (tamanhos menores) e o *underflow* (tamanhos maiores), como está representado no fluxograma da Figura 1. No peneiramento, metodologia mais usada na mineração para classificação mais grosseira, são utilizadas geralmente grelhas (grades), peneiras rotativas e peneiras vibratórias.

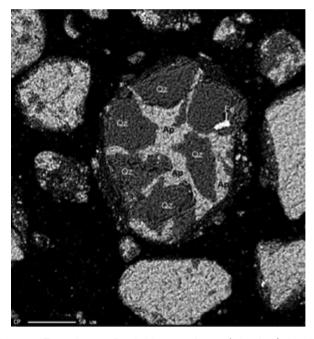


Figura 2: Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico, indicando a presença de quartzo (Qz) com incrustação de apatita (Ap). (Fonte: Sonia Pinto Prates).

Por sua vez, a classificação em meio fluido é realizada em hidrosseparadores e classificadores pneumáticos. Diversos são os equipamentos utilizados, sendo os de maior importância os hidrosseparadores, com destaque para os classificadores hidráulicos, classificadores mecânicos e os hidrociclones.

Os hidrociclones são os equipamentos mais usados na mineração para classificação fina e se caracterizam por usar o efeito de centrifugação como principal agente de classificação granulométrica. São constituídos basicamente por uma parte cilíndrica e outra cônica, onde a polpa mineral (minério

fragmentado + água) é alimentada sob pressão, criando um fluxo descendente em espiral ao longo de sua parede interna. Outro fluxo ascendente também é criado pela formação de uma região de baixa pressão na parte central do equipamento. Esse mecanismo acarreta a classificação granulométrica do minério. Apresentam as seguintes vantagens em relação a outros equipamentos que exercem a mesma função: elevada capacidade, inexistência de peças móveis, facilidade de controle operacional, baixo investimento e fácil manutenção (Valadão; Araújo, 2007).

Concentração física

Após as etapas de fragmentação e classificação, vem a concentração mineral. Nessa etapa, ocorre a separação dos minerais valiosos (úteis) dos minerais de ganga (contaminantes) presentes no minério. É realizada em sistemas dinâmicos em que uma resultante de forças confere diferentes caminhos aos minerais com diferentes propriedades, acarretando a separação destes. Para isso, explora-se determinada propriedade dos minerais como brilho, cor, peso específico, condução de cargas, susceptibilidade magnética e propriedades de

superfície (naturais ou induzidas). Conforme a propriedade explorada, esses métodos dividem-se em gravíticos, elétricos, magnéticos, flotação, dentre outros (Peres et al., 2007).

A concentração por métodos gravíticos (ou densitários) explora diferenças de densidade, tamanho e forma dos minerais constituintes de um dado minério, separando-os por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas. Os principais mecanismos atuantes são: aceleração diferencial, sedimentação retardada, consolidação intersticial, velocidade diferencial em escoamento laminar e ação de forças

cisalhantes. Diversos equipamentos são utilizados, destacando-se jigues, mesas oscilatórias e espirais concentradoras.

A propriedade utilizada na concentração/separação por métodos magnéticos é o diferente comportamento dos minerais sob a ação de um campo magnético, denominada susceptibilidade magnética. Os minerais são classificados em paramagnéticos, quando são atraídos por um campo magnético, e diamagnéticos, quando são repelidos. Há ainda minerais que são tão fortemente atraídos por um campo magnético que recebem a denominação de ferromagnéticos como a magnetita (Fe $_3O_4$). Alguns exemplos de minerais paramagnéticos e que podem ser separados industrialmente são aqueles que contêm os seguintes elementos: manganês (pirolusita - MnO $_2$); ferro (hematita - Fe $_2O_3$; pirrotita - Fe $_{1-x}S$; e siderita - FeCO $_3$); titânio (ilmenita - FeTiO $_3$; e rutilo - TiO $_2$); wolframita ((Fe, Mn)WO $_4$); monazita ((Ce, La, Th, Nd,Y)PO $_4$) e cromita

(FeCr₂O₄) (Valadão; Araújo, 2007).

Industrialmente, são utilizados equipamentos magnéticos com diferentes intensidades de campo, operando a seco ou a úmido. Alguns exemplos de utilização industrial, no Brasil, são: i) na concentração de minérios itabiríticos, eliminando os contaminantes silicatados; ii) na separação de caulim dos minerais portadores de ferro e titânio, prejudiciais à alvura do concentrado; e iii) na separação de fosfatos de contaminantes portadores de ferro, principalmente magnetita (Fe $_3$ O $_4$) e hematita (Fe $_2$ O $_3$). A separação por métodos magnéticos somente é superada pela flotação.

O processo de concentração de minérios por flotação baseia-se em induzir diferenças no comportamento de umectação (molhabilidade) em partículas de certos minerais que se deseja separar de outros, por meio da adição de agentes químicos com funções específicas. Numa máquina de flotação, equipamento que aera uma polpa previamente condicionada, separam-se minerais hidrofóbicos, coletados na espuma, dos minerais hidrofílicos, que afundam (Aquino et al., 2004; Finch; Dobby, 1990).

A técnica de flotação é o principal processo utilizado pela indústria mineral, tanto em quantidade de minérios

processados quanto em diversidade de aplicações. Atualmente, estima-se que cerca de dois bilhões de toneladas de minérios no mundo são processados a cada ano por flotação. No Brasil, essa técnica desempenhou um papel fundamental para o crescimento do setor mineral, principalmente para as indústrias de minério de ferro e de fosfato (Peres et al., 2007).

Vários tipos de minérios são concentrados por meio da flotação. Em pouco mais de 100 anos, foram desenvolvidos e utilizados muitos equipamentos, com destaque para células mecânicas e co-

lunas. Células mecânicas são tanques projetados para receber a polpa mineral previamente condicionada e proporcionar sua suspensão e aeração, acarretando a concentração, isto é, separação dos minerais úteis dos contaminantes.

As colunas foram introduzidas nas unidades industriais em substituição parcial ou total às células mecânicas, com resultados significativamente superiores tanto no que se refere à qualidade dos produtos quanto ao rendimento metalúrgico (Takata, 2006). Sua concepção básica foi desenvolvida no início dos anos 1960 por pesquisadores canadenses, tendo sido introduzida na indústria no início dos anos 1980, marcando um avanço significativo na área de tecnologia mineral. Colunas vêm sendo aplicadas para concentração de diferentes tipos de minérios com variada distribuição granulométrica, com vantagens relacionadas a melhoramentos metalúrgicos, simplificação de circuitos e ganhos em custo

Após as etapas de fragmentação e classificação, vem a concentração mineral. Nessa etapa, ocorre a separação dos minerais valiosos (úteis) dos minerais de ganga (contaminantes) presentes no minério. É realizada em sistemas dinâmicos em que uma resultante de forças confere diferentes caminhos aos minerais com diferentes propriedades, acarretando a separação destes. Para isso, explora-se determinada propriedade dos minerais como brilho, cor, peso específico, condução de cargas, susceptibilidade magnética e propriedades de superfície (naturais ou induzidas).

operacional e de capital (Aquino et al., 2004).

No Brasil, a primeira implantação industrial ocorreu em 1991, na flotação reversa de quartzo em minério de ferro, realizada em uma empresa do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Desde então, diversas implantações industriais têm sido realizadas com sucesso, concentrando minérios de ferro, fósforo, chumbo, zinco, cobre, nióbio, prata, além de minerais como grafita, talco, magnesita, feldspato, dentre outros.

Uma representação esquemática de uma coluna de flotação está apresentada na Figura 3, onde duas zonas distintas são identificadas:

- Zona de Coleta ou Recuperação: compreendida entre o aerador e a interface polpa-espuma. É nessa zona que ocorre a coleta das partículas hidrofóbicas via um contato eficiente com as bolhas geradas.
- ii) Zona de Limpeza: compreendida entre a interface polpa-espuma e o transbordo do material flotado. Nessa seção, mantém-se constante a altura da camada de espuma, que é lavada através de um fluxo de água em contracorrente para eliminação das partículas hidrofílicas arrastadas.

Em uma coluna, a polpa de minério previamente condicionada com agentes químicos específicos é alimentada na zona de coleta a aproximadamente dois terços de sua altura total. As partículas minerais interagem com as bolhas ascendentes, produzidas na base da coluna por um aerador, resultando no processo de coleta das partículas hidrofóbicas. Os agregados partículas hidrofóbicas (bolhas) formados são então transportados até a zona de espuma, onde ocorre a formação de um empacotamento de bolhas mineralizadas, que são contactadas em contracorrente pela água de lavagem introduzida no topo da coluna. O objetivo da água de lavagem é promover a estabilidade e a limpeza da espuma, eliminando as partículas hidrofílicas arrastadas. Assim, as partículas minerais hidrofóbicas coletadas saem no topo da coluna, constituindo a fração flotada, separadas das partículas hidrofílicas, que saem pela base da coluna e constituem a fração não flotada (Finch; Dobby, 1990).

Algumas características da coluna a distinguem das células mecânicas convencionais, destacando-se: uso de água de lavagem, que elimina o material hidrofílico arrastado até a espuma; sistema de geração de bolhas, que permite variar o tamanho de bolhas; ausência de agitação mecânica, gerando condições hidrodinâmicas de baixa turbulência; e relação altura/diâmetro efetiva elevada. As colunas industriais têm tipicamente de 9 a 15 metros de altura, diâmetro variando de

0,5 a 5,0 metros e capacidade variada. As seções transversais podem ser circulares, retangulares ou quadradas

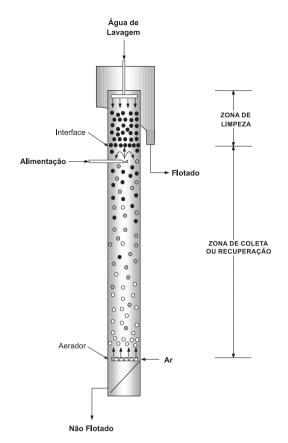


Figura 3: Representação esquemática de uma coluna de flotação. Adaptado de Aquino et al. (2004).

(Finch; Dobby, 1990).

Por fim, após a concentração, normalmente seguem-se as etapas de separação sólido-líquido, que envolvem operações de espessamento, filtragem, centrifugação, peneiramento, secagem, dentre outras. São etapas realizadas com o objetivo de reciclar a água do processo, desaguar concentrados e rejeitos finais e adensar a polpa para posterior uso.

Processos hidrometalurgicos

Em alguns casos, o concentrado mineral é comercializado

ou introduzido diretamente no mercado produtivo. No entanto, em geral, esse concentrado é tratado quimicamente com o objetivo de se obter a espécie metálica de elevada pureza ou na forma de metal ou de um composto metálico. As técnicas mais comumente empregadas na hidrometalurgia são: lixiviação, extração por solventes (extração líquido-líquido), adsorção, troca iônica, cementação e precipitação química. As técnicas hidrometalúrgicas são utilizadas não somente para

o processamento de minérios/concentrados minerais, mas também no tratamento de efluentes e resíduos industriais.

comercializado ou introduzido diretamente no mercado produtivo. No entanto, em geral, esse concentrado é tratado quimicamente com o objetivo de se obter a espécie metálica de elevada pureza ou na forma de metal ou de um composto metálico. As técnicas mais comumente empregadas na hidrometalurgia são: lixiviação, extração por solventes (extração líquido-líquido), adsorção, troca iônica, cementação e precipitação química.

Em alguns casos, o concentrado mineral é

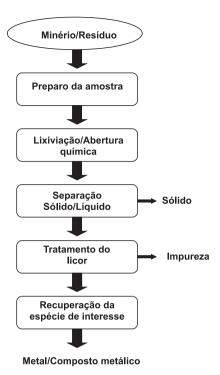


Figura 4: Principais etapas de um fluxograma de processamento hidrometalúrgico na mineração.

Está apresentada na Figura 4 uma representação esquemática das principais etapas envolvidas em um processamento hidrometalúrgico de minério ou resíduo industrial.

Lixiviação

A lixiviação é o processo de extração de um constituinte solúvel de um sólido, o qual apresenta o metal ou metais de interesse, através do contato desse sólido com uma fase aquosa contendo ácidos, bases ou agentes complexantes, que são os agentes lixiviantes em condições variadas. A escolha de um agente lixiviante vai depender da matriz a

ser submetida à lixiviação, da solubilidade da espécie de interesse, da relação custo/benefício, além de fatores ambientais. A habilidade de recuperação do reagente para a reciclagem deste também constitui um critério importante na escolha do agente lixiviante.

Os agentes lixiviantes podem ser usados sozinhos ou em com-

binação com agentes oxidantes. Em poucos casos, são utilizados em combinação com agentes redutores. Geralmente, os agentes oxidantes utilizados são oxigênio do ar, peróxido de hidrogênio (H₂O₂), dióxido de manganês (MnO₂), nitrato de sódio (NaNO₃) e clorato de sódio (NaClO₃). Os agentes redutores mais empregados são cátions ferrosos (Fe (II)) e dióxido de enxofre (SO₂) (Habashi, 1993).

Existem várias técnicas de lixiviação, em que, dentre as mais empregadas, cita-se a lixiviação *in situ*, em pilhas, em tanques agitados a pressão atmosférica e em tanque com

agitação sob pressão. A técnica a ser utilizada na lixiviação depende da composição do minério, de sua granulometria, além da facilidade com que o mineral de valor é dissolvido em um reagente em particular (Habashi, 1993).

No desenvolvimento de processo de lixiviação, existem vários parâmetros que devem ser investigados. Esses parâmetros dependem da técnica a ser empregada: (i) para a lixiviação em tanque agitado a pressão atmosférica, as principais variáveis de processo são: tipo e concentração do agente lixiviante, granulometria, tempo de lixiviação, temperatura, proporções ácido/minério e oxidante/minério, parâmetros de separação sólido/líquido e de lavagem da polpa; (ii) na lixiviação em pilhas, os experimentos para desenvolvimento de processo geralmente são realizados em colunas e as principais variáveis investigadas são: tipo e concentração do agente lixiviante, granulometria do minério, aglomerante, vazão máxima, taxa de abatimento do material na coluna e tempo de lixiviação.

Tratamento do licor

Após a lixiviação, há etapas de separação sólido-líquido, clarificação e purificação do licor. O licor clarificado pode ser tratado pelas técnicas de extração por solventes, adsorção, troca iônica, precipitação e eletrólise ou, então, por uma combinação dessas técnicas, dependendo do sistema. Na sequência, três dessas técnicas largamente empregadas na indústria mineral são comentadas.

Extração por solventes

Após a lixiviação, há etapas de separação

sólido-líquido, clarificação e purificação do

licor. O licor clarificado pode ser tratado

pelas técnicas de extração por solventes,

adsorção, troca iônica, precipitação e

eletrólise ou, então, por uma combinação

dessas técnicas, dependendo do sistema.

A crescente necessidade de metais com elevada pureza para atendimento ao mercado, as leis ambientais cada vez mais exigentes e a redução contínua de minérios com elevados teores metálicos geram a necessidade do aproveitamento de minérios de baixos teores e de maior complexidade, aumentando a utilização da técnica de extração por solventes

em processos hidrometalúrgicos.

Extração por solventes ou extração líquido-líquido é o processo usado para separação, purificação ou concentração de determinado constituinte de uma fase aquosa através do contato dessa fase com uma fase orgânica, denominada solvente. O solvente é uma fase orgânica constituída de um extra-

tor e um diluente, podendo conter também um modificador (geralmente um álcool de cadeia longa). O processo deve ser reversível, ou seja, a espécie extraída deverá ser posteriormente reextraída por uma outra fase aquosa.

A técnica consiste em colocar em contato uma fase aquosa (licor de alimentação) e uma fase orgânica (solvente extrator), imiscíveis entre si, agitando-se até que o equilíbrio de distribuição das espécies nas duas fases seja atingido.

A extração líquido-líquido envolve quatro etapas: extração, lavagem, reextração e regeneração do solvente, sendo

que, em alguns casos, a etapa de lavagem é dispensável e, às vezes, o solvente é regenerado na própria etapa de reextração. A extração consiste na transferência da espécie a ser recuperada da fase aquosa para a fase orgânica. A fase orgânica torna-se saturada (carregada) com o soluto de interesse e a fase aquosa, empobrecida deste. A fase empobrecida, após a extração, pode ser descartada ou reprocessada para o aproveitamento de alguma espécie não extraída, enquanto a fase orgânica segue para a etapa de lavagem. Nessa etapa, uma solução de lavagem é adicionada para a remoção de espécies indesejadas coextraídas (impurezas). A fase aquosa resultante pode ser descartada ou retornar ao circuito de extração. Após a lavagem, a fase orgânica passa para a etapa de reextração, na qual a espécie de interesse é transferida da fase orgânica para outra fase aquosa, denominada reextratora. A fase aquosa, enriquecida com o elemento de interesse, é coletada. A fase orgânica é finalmente tratada para ser reutilizada no processo (Figura 5) (Ritcey, 2006; Thornton, 1992).

A extração por solvente pode ser realizada de forma descontínua ou contínua. Em escala laboratorial, a extração descontínua geralmente é realizada em béquer com agitação

mecânica e, posteriormente, a mistura é transferida para um funil de separação, na qual as fases são separadas e encaminhadas para análise química. A extração contínua pode ser realizada em circuito de misturadores/decantadores ou em coluna pulsada ou agitada. A Figura 6 apresenta montagens para extração descontínua e circuitos contínuos de extração por solventes.

As principais variáveis de processo investigadas na etapa de extração por solventes são: tipo e concentração do agente extrator, relação volumétrica entre as fases aquosa e orgânica, tempo de contato, pH da fase aquosa, tipo e concentração do agente reextrator.

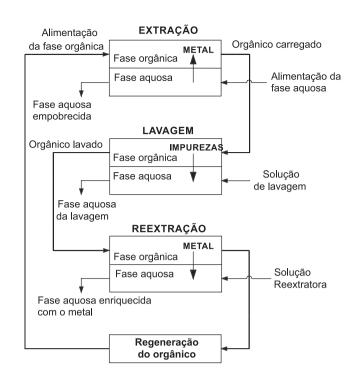


Figura 5: Esquema do processo de extração por solvente.

Troca iônica

Troca iônica é um processo de troca reversível de íons entre um sólido e um líquido em que não ocorre nenhuma mudança na estrutura do sólido. Os agentes trocadores iônicos são materiais sólidos capazes de sorver ânions ou cátions de uma solução e liberar uma quantidade equivalente de outros íons de mesma carga para a

solução. O trocador é um sólido, geralmente um copolímero, com excesso de carga compensada pelos íons contrários ou íons trocadores, que serão trocados no processo de sorção (Figura 7).

O objetivo da troca iônica é retirar íons de uma solução,



(a) Experimentos de extração por solventes - bancada



Troca iônica é um processo de troca

reversível de íons entre um sólido e um

líquido em que não ocorre nenhuma

mudança na estrutura do sólido. Os

agentes trocadores iônicos são materiais

sólidos capazes de sorver ânions ou cátions

de uma solução e liberar uma quantidade

equivalente de outros íons de mesma carga

para a solução.

(b) Circuito contínuo de extração composto de misturadores/decantadores



(c) Coluna Pulsada de extração por solventes

Figura 6: Equipamentos utilizados para realização de experimentos de extração por solventes; (a) experimentos descontínuos; (b) e (c) experimentos contínuos. Laboratório de Extração por solventes – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN (Fotos: Carlos Antônio de Morais).

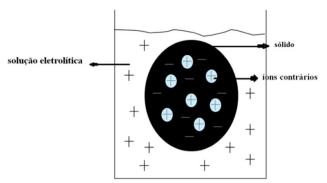


Figura 7: Esquema simplificado do processo de troca iônica.

por exemplo, cátions metálicos e íons complexos, como $Cu^{2+}, Zn^{2+}, [Au(CN)_2]^-, UO_2^{2+}, [UO_2(SO_4)_3]^{4-}, e \text{ substitu\'i-los}$ por íons de menor interesse econômico ou menos agressivos ambientalmente como Na+, Cl-, H+, OH-. Os íons da solução são incorporados no sólido (copolímero) e podem ser removidos por uma lavagem com solução ácida, básica ou salina. Após esse processo de remoção, denominado eluição, o sólido está pronto para ser utilizado novamente. A solução gerada na eluição apresenta uma concentração de íons significativamente maior que a inicial. Os trocadores iônicos podem ser minerais naturais como aluminossilicatos (moscovita-KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂), fosfatos (apatita--Ca₅(PO₄)₂(OH, F, Cl), alumina (Al₂O₂), sílica gel (SiO₂) ou matrizes orgânicas como carvão ativado e resinas (copolímeros). As resinas são as mais comumente empregadas na recuperação de metais, sendo constituídas de um polímero, com grupos funcionais, que podem gerar íons. Existe uma grande variedade de grupos funcionais, mas os economicamente viáveis e quimicamente estáveis são poucos (Helfferich, 1995) e os mais utilizados estão apresentados na Tabela 1.

Geralmente, as resinas são comercializadas com os grupos funcionais ligados ao Cl⁻ ou OH⁻, no caso das resinas aniônicas, ou ligados a cátions, Na⁺ ou H⁺, no caso das resinas catiônicas. Esses substituintes interferem pouco nos processos, ou seja, pouco alteram as condições da solução quando passam a fazer parte dela na troca pelo íon metálico. Os grupos funcionais devem ser capazes de liberar Cl⁻, OH⁻, Na⁺ ou H⁺ para que a troca iônica possa ocorrer.

Resinas catiônicas dissociam-se da seguinte forma:

$$R - SO_3H \rightarrow R - SO_3^- + H^+ \tag{1}$$

A constante de dissociação (K) é definida da seguinte forma:

$$K = \frac{[R - SO_3^-][H^+]}{[R - SO_3H]}$$
; sendo pK = -log K

O valor de pK define a faixa de pH e as condições de operação de cada resina como indicado na Tabela 2.

A Figura 8 ilustra um exemplo de reação de troca iônica para soluções contendo o complexo aniônico de urânio em meio sulfúrico. Cada grupo funcional ligado ao seu

Tabela 1: Exemplos de grupos funcionais presentes em resinas de troca iônica.

Tipo de Resina	Grupo Funcional	
Catiônica Fortemente Ácida	0 = S - O	
Catiônica Fracamente Ácida	R-C = 0	
Aniônica Fortemente Básica	R CH ₃ — N+ — CH ₃ CH ₃	
Aniônica Fracamente Básica	H H —N+— R H	

Tabela 2: Faixa de operação das resinas de acordo com suas constantes de dissociação

Resinas	рК	Faixa de operação
Fortemente ácida	menor que 1	pH > 1
Fracamente ácida	Entre 4 e 6	4 < pH < 6
Fortemente básica	maior que 13	pH < 13
Fracamente básica	Entre 5 e 8	5 < pH < 8

respectivo íon contrário é denominado sítio de troca iônica.

De acordo com a Figura 8, o cloreto deixa o grupo funcional da resina e passa para solução, enquanto o complexo de urânio passa a ocupar seu lugar. A troca aniônica ocorre porque o grupo funcional da resina apresenta maior afinidade pelo complexo de urânio. Após o preenchimento de todos os sítios da resina pelo complexo iônico de urânio, a resina atinge sua capacidade máxima de carregamento e deve ser então lavada com pequenos volumes de soluções para remoção do metal. Nesse processo de lavagem, denominado eluição, pode-se, no caso do urânio, utilizar soluções de carbonato de amônio ((NH₄)₂CO₂) ou de cloreto de sódio (NaCl). A solução de lavagem remove o urânio da resina, concentrando-o em volumes menores. A solução concentrada assim obtida estará então adequada para a próxima etapa do processo que, em geral, consiste da precipitação do urânio.

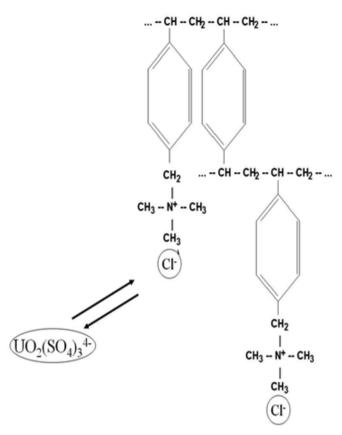


Figura 8: Esquema da remoção do complexo de urânio utilizando resina aniônica fortemente básica.

A capacidade de carregamento das resinas pode ser definida como:

- a) Capacidade máxima ou total de uma resina representa o número de sítios ativos acessíveis ou disponíveis, sendo geralmente fornecida pelo fabricante.
- b) Capacidade operacional é a proporção da capacidade máxima efetivamente utilizada durante o processo e depende das variáveis operacionais. Em geral, é inferior à capacidade máxima, pois espécies semelhantes podem competir pelo mesmo sítio. No caso do urânio na forma do complexo [UO₂(SO₄)₃]⁴⁻, íons sulfato (SO₄²⁻) presentes no meio atuam como competidores e, em altas concentrações, afetam o

desempenho da resina porque ocupam sítios que deveriam ser destinados ao complexo de urânio.

Precipitação química

A técnica de precipitação química é largamente utilizada na indústria química e metalúrgica, na recuperação de metais e no tratamento de efluentes aquosos. A adição de determinadas substâncias químicas a uma fase aquosa pode levar à precipitação seletiva de determinados íons, tornando-se possível sua separação/recuperação. O precipitado pode ser

cristalino, amorfo ou coloidal. As características físicas de um precipitado são em geral determinadas pelas condições que prevalecem no momento de sua formação como: temperatura, concentração dos reagentes, velocidade de adição dos reagentes e solubilidade do precipitado no meio em que se origina.

O processo típico de precipitação química envolve as seguintes etapas:

- Adição dos reagentes e/ou ajuste do pH para a formação do precipitado;
- Floculação;
- Sedimentação;
- Separação sólido-líquido.

A adição dos reagentes é, geralmente, conduzida de forma lenta e agitação controlada, favorecendo a mistura dos reagentes adicionados e a dispersão do precipitado na solução.

No caso de formação de suspensão coloidal na etapa de adição dos reagentes, é necessária a floculação das partículas para favorecer a etapa de sedimentação. A floculação deve ser conduzida sob agitação lenta para favorecer a aglomeração das partículas do precipitado.

A etapa de sedimentação é importante para favorecer a etapa de separação sólido-líquido. Durante a sedimentação, a mistura sólido-líquido deve permanecer em repouso. A separação sólido-líquido pode ser conduzida por filtração, centrifugação ou simplesmente por decantação e lavagem do precipitado.

Considerações finais

A técnica de precipitação química é

largamente utilizada na indústria química e

metalúrgica, na recuperação de metais e no

tratamento de efluentes aquosos. A adição

de determinadas substâncias químicas a

uma fase aquosa pode levar à precipitação

seletiva de determinados íons, tornando-

se possível sua separação/recuperação. O

precipitado pode ser cristalino, amorfo ou

coloidal.

As técnicas utilizadas no processamento mineral são combinações de processos físicos, que exploram diferentes

propriedades físicas dos minerais (susceptibilidade magnética, brilho, cor, peso específico, entre outras) e de processos químicos, envolvendo diferentes propriedades químicas dos materiais (solubilidade, complexação, afinidade química, entre outras). Alguns exemplos de processos químicos são a troca iônica e a extração por solventes, que exploram a afinidade química de alguns grupos orgânicos em relação a diferentes cátions ou

ânions para separar diferentes íons, produzindo soluções mais puras e concentradas. O uso integrado dessas técnicas visa adequar o produto final às exigências das indústrias ou do comprador. Entretanto, como em toda atividade industrial, ocorre a geração de efluentes, líquidos, gasosos e/ou sólidos. Para que as leis de controle ambiental sejam cumpridas, juntamente com um processo eficiente, os equipamentos devem ser específicos para cada processo e as pessoas envolvidas devem ser especializadas no controle deste. O processamento mineral para o Brasil é extremamente relevante uma vez que

4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro advêm dessa atividade. Nesse contexto, a atividade mineral é uma das prioridades da política econômica do governo.

Carlos Antônio de Morais (cmorais@cdtn.br), bacharel em Química e doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Universidade Federal de Minas Gerais

(UFMG), é professor do curso de Pós-Graduação Ciências e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais e pesquisador do CDTN. Belo Horizonte, MG – BR. **Rodrigo Oscar de Albuquerque** (roda@cdtn.br), engenheiro de Minas, doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG, é pesquisador do CDTN. Belo Horizonte, MG – BR. **Ana Claudia Queiroz Ladeira** (ana.ladeira@cdtn.br), Engenheira Química, mestre e doutora em Metalurgia e Minas pela UFMG, é professora do curso de Pós-Graduação Ciências e Tecnologia das Radiações Minerais e Materiais e pesquisadora do CDTN. Belo Horizonte, MG – BR.

Referências

AQUINO, J.A.; OLIVEIRA, M.L.M.; FERNANDES, M.D. Flotação em coluna. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; MONTE, M.B.M.; ALMEIDA, S.L.M. *Tratamento de minérios*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, 2004.

ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C.; VIANA, P.R.M. Pesquisa e desenvolvimento em flotação. In: CHAVES, A.P. *Teoria e prática do tratamento de minérios* - flotação o estado da arte no Brasil. São Paulo: Signus, 2006.

FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. *Column flotation*. Oxford: Pergamon, 1990.

HABASHI, F. *Textbook of hydrometallurgy*. Quebec: Métallurgie Extractive Québec, 1993.

HELFFERICH, F. Ion exchange. New York: Dover, 1995.

PERES, A.E.C.; ARAUJO, A.C.; EL-SHALL, H.; ZHANG, P.; SCHLANZ, J.W. Non-sulfide minerals plant practice. In: FUERSTENAU, M.C.; JAMESON, G.; YOON, R.H. *Froth flotation*: a century of innovation. Colorado: Flotation Plant Practice, 2007. p. 845-868.

RITCEY, G.M. *Solvent extraction*: principles and applications to process metallurgy. Part I. Ottawa: G.M. Ritcey, 2006.

TAKATA, L.A. Flotação em coluna. In: CHAVES, A.P. *Teoria e prática do tratamento de minérios* - flotação o estado da arte no Brasil. São Paulo: Signus, 2006.

THORNTON, J.D. Science and practice of liquid-liquid extraction, v. 2. New York: Oxford University Press, 1992.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007. 234 p.

Abstract: *Physical and Chemical Processes used in the mineral industry*. This chapter describes how the chemistry and physical chemistry can be used to obtain metals from different kind of ores. The techniques most commonly used by mining and metallurgical industries are described. **Keywords:** comminution, flotation, leaching, ion exchange, solvent extraction, precipitation