

HIDROMETALURGIA

Ronaldo Santos*; Virgínia Ciminelli**

1. ESTADO DA ARTE

O termo Hidrometalurgia designa um conjunto de processos de extração de metais, nos quais a principal etapa de separação meta e ganga envolve reações de dissolução do mineral-minério – mineral(is) contendo os metais de interesse: alumínio, ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio, terras-raras, dentre outros – em meio aquoso.

A primeira etapa, preparação, ajusta as propriedades físicas e químicas do sólido, para a etapa seguinte (lixiviação). A preparação envolve operações de processamento mineral (cominuição, classificação, concentração e separação sólido-líquido). Em alguns casos, requer modificações químicas do minério ou concentrado. Nesses casos são usados processos pirometalúrgicos, tais como: ustulação (na oxidação de ZnS em ZnO ou na oxidação de minérios refratários de ouro), redução (lateritas de Ni no processo de lixiviação amoniacal), hidrometalúrgicos (oxidação sob pressão de minérios refratários de ouro) e biohidrometalúrgicos (biooxidação de minérios refratários de ouro). Após a preparação, tem-se a etapa de lixiviação, a qual, juntamente com a recuperação do metal, constituem as etapas mais características do processamento hidrometalúrgico.

A lixiviação consiste na dissolução seletiva de minerais, contendo o metal ou metais de interesse, através do contato do sólido (minério ou concentrado) com uma fase aquosa ácida (frequentemente o ácido sulfúrico), alcalina (como hidróxidos de amônio e sódio) ou, ainda, com agentes complexantes (como o cianeto de sódio e o hidróxido de amônio), em condições variadas de pressão e temperatura (usualmente de 25 a 250°C). A lixiviação pode, ainda, ser mediada por microrganismos (biolixiviação), sendo a sua grande aplicação na dissolução de sulfetos, desde que providas as condições operacionais necessárias para a atuação eficaz desses microrganismos (i.e., potencial redox, pH, temperatura, concentração de oxigênio e nutrientes).

As operações de lixiviação podem ser classificadas em dois grandes grupos: leito estático e tanques agitados. O primeiro inclui a lixiviação *in situ*, em pilhas (de rejeito, estéril ou minério). O segundo grupo compreende a lixiviação em tanques agitados - abertos ou sob pressão. Seguem-se a essa etapa, as operações de separação sólido-líquido (ciclonação, espessamento e filtragem) para a obtenção da fase aquosa ou licor (contendo o metal de interesse).

A etapa de tratamento do licor visa à purificação e à concentração da solução. O tratamento do licor envolve processos tais como: precipitação, adsorção em carvão ativado ou em resinas poliméricas de troca iônica e extração por solventes - SX.

A última etapa do processamento hidrometalúrgico objetiva a recuperação do metal, que pode ser feita na forma de sal ou hidróxido metálico (como $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ e CuSO_4), através de processos de precipitação/cristalização ou, ainda, na forma metálica. Nesse

* Pesquisador Titular do CETEM. Mestre pela COPPE/UFRJ, rsantos@cetem.gov.br

** Professora da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais.

caso utiliza reações de redução em fase aquosa, como a cementação, a redução por hidrogênio ou a eletrorrecuperação, que é o principal processo utilizado na produção de metais de elevada pureza diretamente de soluções aquosas. Para metais de potencial redox muito negativo, como o alumínio, a eletrorrecuperação é realizada em banho de sais fundidos.

Os contaminantes gerados nos processos hidrometalúrgicos ou nos processos de geração de drenagem ácida (AMD) podem se apresentar na forma de sólidos em suspensão, material coloidal ou na forma de espécies (cátions, ânions ou moléculas neutras) dissolvidas a partir do minério ou incorporadas pela adição de reagentes. A AMD ou ARD é caracterizada pela elevada acidez e altas concentrações de metais, como Al, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, oxiníons (sulfato, arsenato, arsenito) e compostos residuais orgânicos (no caso de carvão). O método convencional de remoção das espécies dissolvidas na fase aquosa é a precipitação-sedimentação, seguida do espessamento do lodo formado. Entretanto, outras tecnologias vêm sendo testadas, incluindo o uso de resinas poliméricas de troca iônica, compósitos, diversos materiais funcionalizados, eletrólise, processos envolvendo membranas, flotação não convencional, processos envolvendo fotólise, biorremediação e fitorremediação. A remoção dos particulados requer operações como peneiramento (gradeamento), espessamento, filtração ou flotação, na presença ou não de agentes químicos que possam auxiliar na separação sólido/líquido (S/L). Estes incluem modificadores de pH, agentes coagulantes (íons inorgânicos de carga elevada), tensoativos e agentes floculantes (compostos orgânicos).

2. AGENDA DE PRIORIDADES

Com o aperfeiçoamento da legislação ambiental e a formulação de requisitos mais rigorosos quanto ao desempenho ambiental de instalações hidrometalúrgicas, cabe o incentivo a projetos dedicados ao aperfeiçoamento da gestão ambiental da produção e à redução dos impactos ambientais decorrentes da operação destas instalações. Ainda, constituem fatores merecedores de atenção a necessidade de melhor e o aproveitamento dos recursos minerais, por meio de tecnologias que maximizem a recuperação dos produtos e subprodutos, minimizando a geração de resíduos e o consumo de energia.

2.1 Tema a: aspectos ambientais da operação de processos minero-metalúrgicos

- Previsão, prevenção e abatimento da drenagem ácida de minas.
- Desenvolvimento de barragens secas.
- Redução do grau de periculosidade dos resíduos de não inertes para inertes.
- Busca de alternativas para a reutilização do resíduo gerado no tratamento, processamento da bauxita.
- Recuperação ambiental de áreas mineradas em seus aspectos geotécnicos, geoquímicos e hidrológicos.
- Racionalização do consumo da água e energia em processos hidrometalúrgicos.

- Incentivo à implantação e operação de sistemas de gestão ambiental e de mecanismos de medida de desempenho ambiental de unidades hidrometalúrgicas.
 - Desenvolvimento de sorventes não convencionais (exemplo fibra de coco) como alternativas às resinas não convencionais utilizadas no processo RIP.
 - Busca de alternativas seguras, ambientalmente adequadas e economicamente viáveis para a disposição de resíduos sólidos.
 - Maior prioridade ao controle e automação dos processos industriais de forma a, principalmente, adequá-los às boas práticas/normas de Saúde, Meio Ambiente e Segurança (SMS).
 - Desenvolvimento de processos específicos para o tratamento de grandes vazões de efluentes com baixos teores de contaminantes em solução.
 - Remoção de ânions de efluentes aquosos de alta vazão das instalações hidrometalúrgicas com alta concentração de íons de cálcio, magnésio e sulfato.
- Valor sugerido de investimento: R\$ 6.000.000,00/ano

2.2 Tema b: otimização de processos hidrometalúrgicos

- Redução de perdas de valores metálicos em processos hidrometalúrgicos.
 - Incentivo ao reúso e reciclagem de resíduos do processamento hidrometalúrgico.
 - Emprego de modelamento, instrumentação e controle para a otimização do desempenho de processos hidrometalúrgicos.
 - Estudos de eletrorrecuperação direta de metais de soluções resultantes da etapa de lixiviação.
 - Redução de consumo energético nas plantas.
 - Uso de modelagem e instrumentação de processos hidrometalúrgicos para elevadas pressões e temperaturas.
 - Aplicação de modelagem molecular na busca de agentes de lixiviação e/ou de purificação de solução mais seletivos.
 - Otimização de projetos de reatores.
- Valor sugerido de investimento: R\$ 6.000.000,00/ano

2.3 Tema c: inovação e desenvolvimento de processos hidrometalúrgicos

- Biolixiviação com o emprego de microrganismos termófilos e com microrganismos geneticamente modificados.
- Desenvolvimento de processos de lixiviação de minérios polimetálicos.
- Aperfeiçoamento de processos de separação de metais em solução com o uso de resinas poliméricas e sorventes sólidos.
- Estudos para investigação de efeitos sinérgicos e de contaminação de extratantes em sistemas de extração por solventes.
- Estudos para a diversificação da aplicação das técnicas de extração por solventes.

- Combinação de técnicas espectroscópicas avançadas e de modelagem molecular nos estudos de mecanismos de reações de adsorção.
- Estudos de precipitação para produção de metais e compostos metálicos com granulometria e morfologia controladas.
- Biolixiviação de minérios refratários de ouro e da calcopirita.
- Desenvolvimento de processos de lixiviação em meio cloreto.
- Estudo do efeito e comportamento de metais contaminantes em processos hidrometalúrgicos para o zinco.
- Agentes alternativos para e uso de catalisadores na lixiviação minérios de ouro.
- Redução do consumo específico de energia na eletrorrecuperação e eletrorrefino.
- Utilização de maiores densidades de corrente em operações de eletrorrecuperação.
- Construção de unidades de eletrorrecuperação mais compactas.
- Estudos para o desenvolvimento de alternativas ao emprego de anodos de chumbo e para a minimização de corrosão de forma a elevar sua vida útil.
- Valor sugerido de investimento: R\$ 6.000.000,00/ano

2.4 Tema d: formação de recursos humanos e incentivo à pesquisa cooperativa

- Incentivo ao estabelecimento de redes cooperativas de pesquisa para a investigação de problemas de processamento hidrometalúrgico comuns a mais de uma unidade industrial. O incentivo à formação de redes cooperativas foi apontado pelos especialistas como fundamental para a redução dos custos da pesquisa e para a difusão acelerada de conhecimentos no setor mineiro-metalúrgico com impactos positivos sobre a eficiência e sustentabilidade deste setor.
- Incentivo à interação entre universidade e empresa no sentido de identificar oportunidades de estágios e treinamento, tanto de estudantes quanto de profissionais atuantes na área industrial. O investimento na formação e aprimoramento de recursos humanos foi apontado como fundamental para a consecução do objetivo de desenvolver e aprimorar o setor mineiro-metalúrgico e a hidrometalurgia nacional.

Valor sugerido de investimento: R\$ 4.000.000,00/ano

2.5 Tema e: preparação de minérios e/ou concentrados

- Desenvolvimento de equipamentos mais eficientes de britagem e cominuição.
- Alternativas de processo e de projeto para o uso/substituição de espessadores.
- Desenvolvimento de equipamentos de flotação menores.
- Desenvolvimento de flotação seletiva de minérios sulfetados.
- Ustulação de concentrados sulfetados com neutralização as espécies voláteis.

Valor sugerido de investimento: R\$ 4.000.000,00/ano