

ÁGUA NO PROCESSAMENTO MINERAL

João Alves Sampaio (*in memoriam*)

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

Adão Benvindo da Luz

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em
Engenharia Mineral pela EPUSP
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

Mônica Calixto de Andrade

Eng. Química pela UFRJ, Doutora em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ
Professora do IPRJ-UERJ

Silvia Cristina Alves França

Eng. Química pela UFS, Mestre e Doutora em
Engenharia Química pela COPPE/UFRJ
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC

INTRODUÇÃO

A maioria dos bens minerais utilizados pela sociedade possui baixo valor agregado. Portanto, os usos de tecnologia e de insumos de baixo custo tornam-se requisitos indispensáveis para garantir a viabilidade econômica de sua exploração. Segundo esse foco, a água é o mais importante insumo no âmbito da mineração, notadamente na área de concentração de minérios na qual é usada, basicamente, como meio de transporte. Vários são os fatores que justificam essa aplicação, dentre os quais se destacam a sua disponibilidade, ainda considerável, e o baixo custo de captação. De igual interesse são as características química e física, das quais se sobressaem: densidade, viscosidade, composição química, condutividade, pressão de vapor, tensão superficial, pontos de congelamento e ebulição.

Embora utilizada em menor volume do que na agricultura (Figura 1), a água é imprescindível na cadeia produtiva mineral (atividade incluída no setor industrial). A água é largamente utilizada nas atividades de mineração, desde a lavra, passando pela usina de beneficiamento de minérios, onde é utilizada nos processos de separações a úmido (gravítica, magnética, flotação, floculação, pelotização, lixiviação e outros), além dos processos hidrometalúrgicos (CIMINELLI et al., 2006). A sua disponibilidade é um dos requisitos básicos para a atividade de mineração, além de ser fator determinante na localização da usina de beneficiamento de minérios. Logo, o abastecimento confiável e adequado da água, bem como o seu estoque e transporte, tornam-se indispensáveis no processamento mineral.

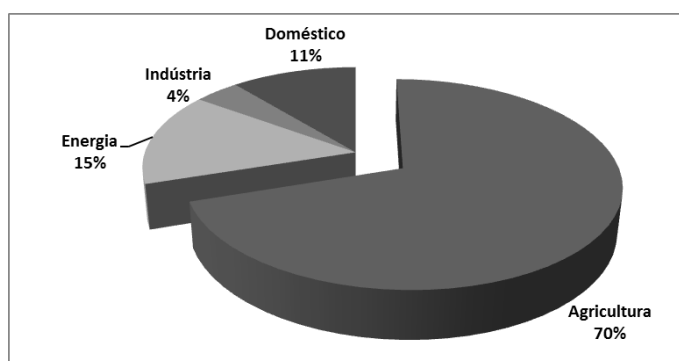


Figura 1. Utilização mundial de água por setores.

Fonte: UN WWAP, 2015

Nas usinas modernas de beneficiamento, exigem-se, cada vez mais, água com melhor qualidade e nas proporções água/minério, variando de 0,4 a 20 m³/t produzida. Na Tabela 1, estão apresentados valores de consumo de água na produção de alguns bens minerais (CNI & IBRAM, 2012). A quantidade de água necessária às operações de beneficiamento de minérios e a sua qualidade são determinadas por meio de estudos em escalas de laboratório e piloto.

Tabela 1. Consumo de água na produção mineral (m³/t produzida).

Manganês	0,03 a 0,17
Potássio	0,11
Minério de ferro	0,18 a 1,0
Ouro	0,14 a 2,28
Titânio	1,58
Cobre	2,03
Fosfato	6,6 - 13,8

Fonte: CNI & IBRAM, 2012

Outro fator considerado relevante na localização de uma usina de beneficiamento de minérios está relacionado à bacia para disposição de rejeitos. As leis ambientais, cada vez mais exigentes com o uso da água e no controle dos efluentes, promovem, de forma substancial, nova concepção dos projetos das unidades de beneficiamento de minérios.

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997, resultou no instrumento econômico de gestão dos recursos hídricos, ou seja, na cobrança pelo uso da água (BOSON et al., 2006). O pagamento pelo uso da água corresponde ao volume de água captada, ao volume real de água consumida e à qualidade da água devolvida ao meio ambiente. Quanto menos contaminada for a água devolvida, menor será o valor da taxa cobrada.

Diversas usinas de processamento mineral captam água em mananciais e pagam pelo seu uso. Todavia, esses mananciais devem pertencer às bacias hidrográficas já submetidas ao processo regulatório da ANA – Agência Nacional de Água, implementado por meio de determinação dos comitês de bacias.

Atualmente, na maioria das unidades de processamento de minérios, a água é recuperada e reutilizada para minimizar os custos operacionais, reduzir a quantidade de efluentes descartados para o meio ambiente e, em alguns casos, para recuperação de reagentes. O emprego da água de reuso reduz, de forma significativa, a necessidade de água nova na usina e minimiza seus custos de captação.

Embora existam alguns estudos que datam da segunda metade da década de 1970, quando começou a preocupação com o meio ambiente no Brasil, as atividades de mineração ainda carecem de registros suficientes, por parte das empresas e dos órgãos governamentais reguladores, para prover informações reais sobre o consumo, a origem e o gerenciamento da água, inclusive as interações entre a água, a indústria e o meio ambiente.

A escassez de recursos hídricos e a imagem negativa associada aos impactos ambientais gerados pela atividade mineral têm contribuído para o aumento das pressões da sociedade para o desenvolvimento e a utilização de tecnologias mais limpas

pelo setor. As estratégias de gerenciamento de água tornaram-se o ponto de equilíbrio da atividade de mineração, visando minimizar o impacto ambiental das operações de mineração em curso e viabilizar o desenvolvimento de novas áreas (DAS & GOSWAMI, 2014). Assim, a gestão hídrica eficiente é tida como um elemento de competitividade industrial, uma vez que o insumo (água) é essencial para as operações e os custos envolvidos no seu acesso, transporte, despoluição, etc. são bastante significativos (CNI & IBRAM, 2017).

Neste capítulo, é feita uma apreciação sobre a origem da água utilizada na lavra e nas diferentes etapas do processamento mineral. É apresentada também uma descrição sobre as técnicas mais usadas no tratamento dos efluentes, as quais propiciam a reutilização ou reciclagem da água no processo industrial, a racionalização do seu consumo ou o seu descarte para o meio ambiente, de acordo com a legislação vigente.

FONTES DE ÁGUA UTILIZADA NA MINERAÇÃO

O consumo de água na mineração atinge valores elevados. Ressalta-se que na flotação, o total de água utilizada chega a 85% do volume da polpa minério/água (LEVAY, 2001). Há ainda uma atenção constante relativa à qualidade da água, em especial àquela utilizada na flotação, uma vez que tem influência direta no processo, podendo refletir no custo de produção, qualidade do produto final, entre outros.

Assim, diversos estudos vêm sendo realizados (RAMOS et al., 2013; WANG e PENG, 2014; BALDOINO, 2017) com o objetivo de respaldar o uso, na indústria mineral, de água com elevado índice de salinidade e, até mesmo, água do mar. Adicionalmente, a água proveniente das bacias de rejeitos, dos espessadores, das operações de filtração, etc, reciclada nas usinas de concentração, contribui para diminuir o consumo desse insumo no processo. O interesse especial pelo controle da qualidade da água no beneficiamento de minério, notadamente, nos processos de flotação, conduz ao desenvolvimento de métodos para o monitoramento dos parâmetros, tais como: sólidos em suspensão, variações de Eh e pH, reação e dissolução dos minerais, reagentes residuais e suas interações com os constituintes da polpa. Além disso, ganha importância o conhecimento sobre a origem da água, em especial a natureza das fontes responsáveis pelo seu abastecimento na mineração, basicamente fontes subterrâneas, de superfície e as chamadas águas de reúso.

As fontes de água para uso na mineração são objeto de estudos com a finalidade de se investigar características adequadas à sua utilização com custos mais baixos. Há casos, hoje mais frequentes, para os quais são exigidos tratamentos prévios ao uso da água no processo de concentração. Quando isso ocorre, várias podem ser as causas, dentre outras, destacam-se:

- a água da fonte local tem elevada dureza (altas concentrações de CaCO_3) e a concentração de íons derivados da dissociação de minerais pode prejudicar o processo de beneficiamento;
- o suprimento de água do mar na usina, em geral, carece de tratamento para remoção da salinidade;
- a água nova contém quantidade expressiva de sólidos em suspensão, especialmente material argiloso.

Água de Cava de Mina

A partir da mineralogia da cava da mina e do solo do seu entorno e das variações na mineralização da água sobre a área impactada, Costa et al. (2016) desenvolveram uma metodologia para avaliar a qualidade da água de diferentes fases da lavra a céu aberto da mina N5S do minério de ferro de Carajás, no estado do Pará. No trabalho, foram feitas medições ambientais no entorno da malha de drenagem para as três diferentes etapas: planejamento, instalação e operação. Os resultados iniciais obtidos permitiram introduzir, com sucesso, mudanças nos procedimentos operacionais de forma a manter a qualidade da água nas vizinhanças da mina.

Água de Origem Superficial

São aquelas oriundas de barragens ou grandes reservatórios, rios, lagos, dentre outras. São as mais adequadas aos processos de beneficiamento em geral por não possuírem contaminações que afetam o desempenho dos processos, essencialmente, a flotação. Todavia, a sua escassez, o alto custo de obtenção e as restrições ambientais limitam a sua utilização, favorecendo a busca por alternativas, particularmente, a água de reúso. Neste caso, ocorre a necessidade de tratamento prévio cuja escala intensifica-se cada vez mais, dados os crescentes índices de escassez desse bem mineral.

Água de Origem Subterrânea

As águas de origem subterrânea são mais utilizadas onde há carência de água superficial. Dependendo da natureza e localização do aquífero, podem existir algumas restrições ao uso direto da água, como problemas localizados de elevada dureza e/ou sólidos totais dissolvidos, nas regiões de ocorrência de rochas calcárias; elevados teores de sólidos totais dissolvidos nas porções mais profundas dos aquíferos, dentre outras (PNRH, 2006). Tais características comprometem o desempenho do processo, em especial a flotação.

Exige-se, nesses casos, um tratamento anterior à sua utilização nos processos de beneficiamento de minérios. Seu custo de obtenção pode ser mais elevado, comparado ao da água de superfície, em virtude das dificuldades para sua captação, eventual necessidade de tratamento, além da sua localização.

Água de Reciclagem

Esse tipo de água pode ser oriundo das bacias de rejeitos ou resultante dos processos de desaguamento por peneiramento, espessamento, filtragem etc. As fontes mais comuns são as bacias de rejeitos nas quais ocorre um aumento progressivo do índice de salinidade, como resultado da evaporação, tal como acontece no semiárido. A relação entre a quantidade de água nova no processo e a água de reúso varia de processo a processo. A situação ideal é aquela com descarte zero, isto é, a otimização do processo de reciclagem que viabiliza a reutilização de toda água já usada. O emprego desse tipo de água cresce de forma contínua, por diversas razões, dentre as quais pode-se citar:

- elevado custo de obtenção da água nova;
- a natureza do processo facilita a reutilização desse tipo de água;
- há exigências ambientais que proíbem o descarte da água com qualidade inferior à da água originalmente captada.

Na Tabela 2, são apresentados valores de consumo e percentual de água de processo recirculada para as instalações industriais (CNI & IBRAM, 2012).

Tabela 2. Consumo de água na produção mineral e índice de recirculação por tipologia mineral.

Tipologia mineral	Volume de água consumida por tonelada produzida (m ³ /t)	Recirculação/reciclagem (%)
Minério de ferro (concentrado)	0,18 - 1,0	90
Cobre	2,03	83
Bauxita	3,0	50-90
Caulim	3,93	85
Alumínio	4,9 - 5,2	62
Fosfato	6,6 - 13,8	50-83
Minério de ferro (pelotas)	6,80	91
Aço	85 – 230	95,5

Fonte: Adaptado de CNI & IBRAM (2012); Instituto Aço Brasil (2016)

USO DA ÁGUA NA LAVRA

Segundo Luz (1998), as minas de caulim de Devon e Cornwall, na Inglaterra, utilizam o método de lavra a céu aberto, com desmonte hidráulico, durante o qual já se realiza uma pré-concentração, de forma a minimizar o manuseio excessivo de material estéril. O caulim resultante do desmonte, já na forma de polpa, é coletado por gravidade em uma cava e bombeado para a usina de beneficiamento.

No Brasil, a Mineração Horii, no município de Mogi Guaçu, São Paulo, utiliza também o método de lavra do caulim com o auxílio de monitor hidráulico. O desmonte de minérios aluvionares de ouro e cassiterita, na Amazônia, constitui exemplos práticos de aplicação desse método de lavra.

A existência de lençol freático conduz à abertura de poços subterrâneos ou bombeamento da água na cava ou galeria da mina. Tal procedimento, utilizado tanto na lavra a céu aberto como na subterrânea, promove o rebaixamento do lençol freático, além de facilitar a extração e transporte do minério. Na maioria dos casos, a água resultante desse processo é utilizada na usina de beneficiamento do minério lavrado. Em outros, porém, a água é bombeada para as bacias de rejeitos ou descartada no meio ambiente, desde que com a devida qualidade exigida pelas agências reguladoras.

USO DA ÁGUA NA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS

A utilização da água para fins diversos exige um produto com características físicas e químicas em conformidade com o uso a que se destina. Portanto, a água empregada para fim doméstico possui características diferentes daquela usada na indústria, agricultura etc. Na mineração, não poderia ser diferente. A água é utilizada, notadamente, como meio de transporte, além de influir, de forma significativa, nos processos de concentração de minérios. Sob esse aspecto, a água empregada na flotação difere daquela utilizada na separação gravítica, na separação em meio denso, nos processos de lavagem e decantação, na lixiviação, assim por diante.

Os parâmetros de qualidade da água para o uso no processamento mineral, bem como aqueles inerentes à água a ser descartada para o meio ambiente de acordo com as agências reguladoras e em harmonia com a legislação ambiental vigente, são obtidos com base nos resultados das pesquisas em escalas de laboratório e piloto. Muitas vezes, a característica de qualidade da água tolerável ou benéfica ao processo é ainda pouco conhecida na operação industrial da usina, em decorrência da sua difícil reprodução em laboratório e/ou unidade piloto. Nesses casos, somente a operação da unidade industrial, por cerca de um ano ou mais, torna conhecidas as interações entre a água utilizada e os diferentes tipos de minérios, inclusive as composições ou misturas dos mesmos na alimentação da usina. Enquanto isso, a água disponível à operação da usina passa pelos conhecidos ciclos de sazonalidade, o que exige tempo para atingir as necessárias condições de equilíbrio.

Água para o Processo de Flotação

Embora os conceitos de dureza e alcalinidade sejam considerados relevantes ao tratamento da água para uso doméstico, também se verifica a sua aplicação no caso da chamada água industrial, neste caso, a água para o processamento mineral.

A flotação é um processo físico-químico de superfície usado na separação de minerais que dá origem à formação de um agregado - partícula mineral e bolha de ar - que, em meio aquoso, flutua sob a forma de espuma. Logo, a composição química da água, precisamente sua concentração iônica, constitui um parâmetro de controle da água empregada na flotação. Essa concentração iônica, no caso da água nova, pode ser formada na própria fonte de origem da água, ou durante o processo de flotação com a dissolução parcial ou total dos minerais que constituem a polpa. Quando se trata de água reciclada, a concentração iônica pode ocorrer da mesma maneira que no caso anterior, ou pelo armazenamento da água em barragens de rejeitos por longos períodos, ou em espessadores, nos quais a água está sujeita à evaporação, etc. Nesses casos, torna-se indispensável o seu monitoramento para assegurar o suprimento da água com as características exigidas pela flotação.

A diferença na resposta de certos minérios ao processo de flotação, particularmente nas etapas de limpeza, pode ser expressiva, quando se comparam os resultados de testes usando água nova *versus* outros tipos de água, como exemplo, a de reciclagem, aquela contaminada ou com sólidos em suspensão etc. Para essas situações, está prevista a avaliação prévia do desempenho da flotação por meio de testes específicos. Portanto, o pesquisador ou engenheiro de processo deve, preferencialmente, usar água com características físicas e químicas adequadas às peculiaridades do processo.

O uso de água de recirculação promove o aumento contínuo da sua concentração iônica e do índice de salinidade, exigindo um tratamento adicional antes da reciclagem, com a finalidade de remover esses constituintes, caso sejam deletérios ao processo.

Os compostos orgânicos, inorgânicos, até mesmo os resíduos sólidos contidos na água de reciclagem podem inviabilizar a flotação ou, pelo menos, causar sérios danos ao processo pela ocorrência de efeitos adversos, tais como:

- a formação de complexos entre os metais e os íons dos coletores, ambos dissolvidos no meio aquoso, o que reduz ou elimina o efeito coletor desses íons;
- a existência de certos cátions no meio aquoso pode resultar na ativação de minerais de ganga, tornando-os flotáveis;
- a variação do índice de dissolução de vários coletores inibe a capacidade de adsorção dos mesmos nas superfícies dos minerais.

Nesse sentido, o uso da atividade bacteriológica, biolixiviação, na água de reciclagem pode resultar em uma alternativa, já que promove a degradação de certos componentes químicos presentes na água, neutralizando as suas atividades deletérias ao processo de flotação. O procedimento pode ser aplicado, tanto à água da bacia de rejeitos como àquela contida no circuito, isto é, no espessador, nos tanques de

sedimentação etc. Essa ação continuada demanda um longo período para que a degradação dos reagentes aconteça em níveis aceitáveis para a reciclagem da água. Para tanto, exigem-se estudos qualificados com profissionais especializados.

Água para os Processos de Lavagem

Os processos de lavagem consistem de etapas do tratamento de minérios que demandam utilização de elevados volumes de água. Na maioria das vezes, a água não requer um controle rigoroso de qualidade, dependendo do produto final a ser obtido. Todavia, na lavagem de minérios para os quais parâmetros como a alvura, caso de muitos minerais industriais do tipo caulim, predomina como requisito de controle, o monitoramento da água de lavagem torna-se mais criterioso. Nesses casos, a operação é levada a efeito, não só com a água limpa ou clara, mas também com uma composição química adequada ao processo. Sabe-se, contudo, que os constituintes químicos contidos na água podem reagir com a superfície dos minerais constituintes da polpa, alterando sobremaneira as suas propriedades físico-químicas de superfície e levando ao comprometimento da aplicação industrial do produto mineral advindo do processo de beneficiamento.

Água para os Processos de Concentração Gravítica

O projeto de um circuito de concentração gravítica passa por uma análise detalhada do balanço de água, inclusive da densidade ótima de polpa para cada operação. Desse modo, para assegurar o êxito da operação, os parâmetros de balanço de água devem ser estudados com detalhes em unidade piloto na qual a relação sólidos/água deve ser conhecida para cada etapa do circuito. Cabe ressaltar que a porcentagem de sólidos nos cones Reichert é de 55-60%, de 20-25% nas mesas vibratórias e de 7-10% nos separadores Bartles-Mosley. Esses equipamentos são muito sensíveis às variações na quantidade e, em menor proporção, na qualidade da água. Invariavelmente, mais água sairá do equipamento com os produtos, comparada com a água nova na alimentação. Esse é um alerta importante aos engenheiros de processo para que sejam evitados equívocos com o abastecimento de água na usina.

A menos que a usina tenha um elevado suprimento de água nova, sem restrições ambientais, um volume significativo de água será exigido para reciclagem. Na concentração gravítica, há mais facilidades na reciclagem da água em virtude da pouca exigência na qualidade da mesma, pois suas restrições químicas são toleráveis. Na maioria dos casos, a água clara e com pouco conteúdo de sólidos em suspensão atende às exigências do processo, salvo quando parâmetros como a alvura dos produtos finais e conteúdo de material argiloso são exigidos como controle de processo. Isso é muito comum no beneficiamento de minerais industriais.

Água como Meio de Transporte

A água é o meio de transporte mais utilizado no processamento mineral. Assim, o líquido é usado de forma intensa como meio de transporte nas mais variadas operações, tais como:

- na lavra, para desmonte hidráulico;
- na lavagem de minérios;
- nos processos de concentração a úmido;
- nos minerodutos.

No caso da concentração a úmido utilizando água, além de meio de transporte, esta participa de forma direta no processo de separação e/ou concentração dos minerais. Entretanto, há casos em que a água é usada, *stricto sensu*, como meio de transporte, isto é, a água empregada nos minerodutos. Aqui a viscosidade, a porcentagem de sólidos e as características reológicas da polpa são alguns dos vários fatores que influenciam no transporte do minério.

Esse tipo de transporte é praticado na mineração brasileira desde a década de 1970, com o início da operação do mineroduto da empresa SAMARCO. Com extensão aproximada de 360 km, e hoje duplicado, o mineroduto para transporte de polpa de minério de ferro liga a usina de beneficiamento, em Mariana, Minas Gerais, à usina de pelletização, em Ubu, município de Guarapari, litoral do estado do Espírito Santo.

Dois casos de destaque na indústria nacional, que utilizam o transporte de polpas minerais através de dutos são: o Projeto Minas-Rio, de minério de ferro da Anglo American, em operação desde 2014, tem o mineroduto mais extenso do mundo, com 529 km, no trecho de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, até São João da Barra, no Rio de Janeiro; o segundo caso destaca-se por ser o primeiro mineroduto no mundo para transporte de concentrado de bauxita, com 244 km de extensão, operado pela empresa Norsk Hydro, liga a usina de beneficiamento de bauxita, na localidade de Miltônia, município de Paragominas, ao distrito industrial de Barcarena, ambos no estado do Pará. Existem, ainda, minerodutos em operação nas minerações de fosfato, em Minas Gerais, e de caulim, no estado do Pará. Estima-se, assim, uma extensão total de cerca de 1500 km em minerodutos no Brasil.

Devido ao crescimento na modalidade de transporte de polpas minerais através de dutos a longas distâncias, diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura, com foco na compreensão dos fatores reológicos que têm maior influência nessa forma de transporte, com relação a consumo energético, custos operacionais e desgaste de tubulações (CHAVES, 2012; BARBATO et al., 2013).

EFLUENTES DA MINERAÇÃO

Os efluentes da lavra e das unidades de beneficiamento de minérios geralmente não podem ser descartados diretamente em rios ou lagos. A maioria contém partículas de pequenos tamanhos, dispersas e com pouca capacidade de sedimentação, o que confere turbidez ao efluente, constituindo-se em uma das maiores dificuldades nas unidades de beneficiamento de minérios, tanto no que se refere ao descarte direto no meio ambiente quanto ao tratamento dos efluentes para reúso da água (FENG e ALDRICH, 2004; LOAYZA, 2015; FRANÇA et al., 2017). Além disso, tais efluentes possuem sais e compostos orgânicos sintéticos, geralmente, reagentes de flotação, que podem causar danos à flora e à fauna quando descartados no meio ambiente, sem tratamento prévio.

Os íons metálicos oriundos da maioria das minerações, geralmente, não interagem com o ciclo biológico dos seres vivos. São armazenados e, conseqüentemente, sua concentração é ampliada nos tecidos vivos que integram a cadeia alimentar do ecossistema. Da mesma forma, os metais pesados contidos em efluentes reduzem a capacidade autodepurativa das águas devido à ação tóxica que esses exercem sobre os microrganismos. Estes microrganismos são os responsáveis pela recuperação das águas, por meio da decomposição dos compostos orgânicos dos efluentes (AGUIAR et al., 2002).

Dentre os efluentes oriundos das atividades de mineração, a drenagem ácida de minas (DAM) causa graves impactos ambientais, pois as elevadas concentrações de metais pesados dissolvidos na água, além de sulfatos, resultam em valores baixos de pH e turbidez elevada.

A lavra dos minérios de ouro, cobre, zinco, urânio e carvão, entre outros, assim como a disposição inadequada dos resíduos de seu processamento podem gerar a drenagem ácida, se o mineral ou o metal de interesse estiver associado a sulfetos. A DAM consiste em uma solução aquosa ácida, gerada quando minerais sulfetados contidos em resíduos de mineração (rejeito ou estéril da mina) são lixiviados pela ação da água, produzindo um líquido rico em ácido sulfúrico e metais dissolvidos, o qual pode contaminar recursos hídricos ou solos.

Os efluentes oriundos de minas de minérios sulfetados e de carvão, sejam minas ativas ou desativadas, são geralmente ácidos e possuem grandes quantidades de sulfatos e íons metálicos, os quais, mesmo em concentrações reduzidas, sofrem o efeito de ampliação biológica quando lançados no corpo receptor. Portanto, são encontrados diversos trabalhos da literatura que abordam tratamentos da drenagem ácida de minas para a redução dos impactos ambientais desses efluentes (TRINDADE e SOARES, 2004; AGBOOLA et al., 2017; AMARAL FILHO et al., 2017).

No capítulo 18 deste livro, Azevedo e colaboradores apresentam uma abordagem detalhada sobre os aspectos ambientais da DAM e de outros efluentes da mineração, bem como diferentes tipos de tratamentos empregados.

As unidades de beneficiamento de minérios de ouro e prata associados aos sulfetos, geralmente, produzem efluentes com íons cianetos, oriundos dos processos de lixiviação. Estes íons são nocivos à vida animal, pois se ligam fortemente aos íons metálicos da matéria viva, por exemplo, ao ferro das proteínas, que são necessárias para o oxigênio molecular utilizado pelas células. Além de formar uma espécie muito estável e não se decompor naturalmente, confirma-se a importância de um tipo de tratamento efetivo para os íons cianetos dos efluentes. Cabe ressaltar também a existência dos íons arsênios, consequência da dissolução dos minerais, como arsenopirita ou escorodita, geralmente associados aos minérios sulfetados de ouro ou polissulfetos de chumbo, zinco e cobre.

A dureza da água pode, em algumas ocasiões, afetar as características dos efluentes, como nas minerações de urânio. Os teores elevados de cálcio e magnésio influenciam a dissociação dos íons de urânio, favorecendo diferentes respostas de toxicidade (CHARLES et al., 2002).

No beneficiamento de minérios de ferro e fosfato, geralmente, os efluentes incluem reagentes de flotação, principalmente as aminas, e partículas finas, que lhes conferem turbidez e odor até a completa degradação destes compostos orgânicos sintéticos. Em processos que utilizam apenas etapas de lavagem, uma completa recirculação de água só poderá ser aplicada após a retirada de particulados finos em suspensão. Essa medida evita o comprometimento do produto final. No caso específico do beneficiamento de caulim, a água pode ser recirculada, desde que não interfira negativamente na alvura do produto final (LUZ, 1998).

A maioria dos efluentes das minerações é enviada para disposição em bacias de rejeitos, causando uma perda significativa da água depositada. Nesse caso, considera-se o efeito da evaporação, especialmente em regiões áridas, e as perdas por infiltração no solo, maior responsável pela contaminação do lençol freático. O índice de evaporação da água nessas bacias de rejeito é usado como fator para cálculo do balanço de água nas usinas de concentração. As condições meteorológicas de cada região são tomadas como base para determinação desse índice.

Na operação de sedimentação, geralmente precedida pelas etapas de agregação de partículas (coagulação e/ou floculação) quando se utilizam reagentes inorgânicos e/ou polímeros, as águas de reciclagem ou fluxos de descargas poderão revelar quantidades residuais de reagentes, dentre os quais se destacam:

- reagentes, que dissolvidos no meio aquoso, dão origem a cátions e ânions, na maioria dos casos na forma complexada;
- sais de ácidos graxos, nas águas alcalinas;
- sais solúveis de amina, em águas ácidas, e agentes quelantes.

A reciclagem desse tipo de efluente, isto é, da água para o processo de flotação, exige estudos em escalas de laboratório e/ou piloto para determinar seus efeitos sobre o desempenho do processo.

REUTILIZAÇÃO DA ÁGUA NA MINERAÇÃO

Água de Reciclagem

De um modo geral, o retorno da matéria-prima ao ciclo de produção é denominado reciclagem, embora o termo seja utilizado popularmente para designar o conjunto de operações associadas. Na maior parte dos casos, o produto reciclado é completamente diferente do produto original. O vocábulo surgiu na década de 1970, quando as preocupações ambientais passaram a ser tratadas com maior rigor, especialmente após a crise do petróleo, quando reciclar ganhou importância estratégica.

O Brasil recicla quantidades elevadas de resíduos, mas gera, no entanto, um enorme desperdício de matérias-primas recuperáveis, em especial a água, que costuma ser descartada como passivo ambiental, notadamente nos rios e mananciais.

A compreensão do termo reciclagem não prescinde do conceito de reutilização da água. Na concepção moderna de reciclagem, está inserido o conceito de uma tecnologia nova que leva em conta a finalidade de uso da água, bem como a sua utilização anterior. Cabe, então, definir, com maior exatidão, quando se inicia realmente a fase de reutilização. De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), há três formas de reúso: indireto, direto e reciclagem interna (SANTOS e MANCUSO, 2003).

Reúso indireto ou interno: ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente a jusante, de forma diluída.

Reúso direto: decorre do uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades, como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável.

Reciclagem: também conhecida como **reciclagem interna**, é o reúso da água internamente às instalações industriais com o objetivo de reduzir o consumo de água nova e controlar, por exemplo, a poluição.

No processamento mineral, entende-se como água de reciclagem aquela retornada ao processo, após tratamento ou não, cujas características físicas e químicas são adequadas ao processo. Nas usinas que empregam modernos fluxogramas de

processamento, a etapa de reciclagem abrange a água dos espessadores, sistemas de recuperação, bacias de rejeitos, entre outros. Algumas minerações têm suas bacias de rejeitos localizadas próximas à usina de concentração, facilitando a reciclagem da água após o devido período de decantação.

Nas operações de espessamento, torna-se necessária a utilização de coagulantes ou floculantes para aumentar a razão de sedimentação dos sólidos, promover a clarificação da água e reduzir as dimensões dos espessadores. Desse modo, as características físicas e químicas da água oriunda dos espessadores devem ser adequadas à sua utilização no processo.

A água de reciclagem é, geralmente, composta por diferentes fluxos industriais, como *overflow* de espessadores, filtrados, sobrenadante de barragens de rejeito, dentre outras contribuições. A variabilidade dos parâmetros de controle de qualidade da água, como pH, Eh, oxigênio dissolvido e sólidos em suspensão, nos diferentes fluxos de água de processo, foi abordada por Levay et al. (2001) para chamar a atenção de que a adição aleatória desses fluxos pode levar a variações indesejadas e dificilmente controláveis no processo de beneficiamento. Na Tabela 3, são apresentados os valores de parâmetros de qualidade da água em função do fluxo de origem.

Tabela 3. Variabilidade de parâmetros de qualidade da água de recirculação em função do fluxo de origem (LEVAY et al., 2001).

Parâmetros	Origem dos fluxos de água			
	F1	F2	F3	F4
pH	6,8	6,7	8,8	6,0
Eh (mV)	92	440	338	264
Composição química (ppm)				
(HCO ₃) ⁻	120	176	434	35
Ni	0,15	4,15	n.d.	n.d.
Fe	0,44	6,16	n.d.	n.d.
Na	47.300	4.350	4.970	4.540
K	280	145	160	150
Ca	631	120	56,4	135
Mg	6.700	1.820	1.480	2.250
(SO ₄) ²⁻	11.600	14.418	14.114	17.076
SiO ₂	< 1	10,2	n.d.	n.d.
Cl ⁻	115.000	2.087	2.340	2.213
STD	180.000	9.900	11.000	11.000
COT	7	15	47	16
OD	n.d.	2,4	4,8	1,8

F1 - Água de poço; F2 - Água de circuito; F3 - *Overflow* dos espessadores; F4 - Barragem de rejeitos.

STD = sólidos totais dissolvidos COT = carbonos orgânicos totais OD = oxigênio dissolvido nd – não determinado

É comum, nas usinas modernas, a prática de obtenção de água reciclada com as características físicas e químicas compatíveis com o processo a fim de assegurar o controle da operação. Com efeito, os fluxogramas para reciclagem de água variam muito, dependendo do tipo de minério. No entanto, em geral, são levados em conta os seguintes fatores:

- limitada disponibilidade de água nova devido à localização da usina ou de restrições ambientais;
- custo elevado do tratamento da água para devolvê-la ao meio ambiente;
- redução dos custos operacionais com a recuperação de reagentes residuais;
- possível redução de custo no bombeamento da água nova de longas distâncias;
- remoção de sólidos residuais da água, processo mais utilizado na mineração brasileira;
- cumprimento das exigências legais do meio ambiente.

Qualidade da Água de Reciclagem

No processamento mineral, a reciclagem da água não difere daquela que é realizada com outras finalidades, salvo as devidas características inerentes a cada aplicação. Portanto, os resultados dos estudos prévios em unidades de laboratório e piloto determinam o padrão da água a ser utilizada na usina. Em seguida, os estudos complementares, em escala industrial, finalizam, nos primeiros anos de operação, a etapa de otimização do processo. A água de reciclagem na unidade industrial possui diferenças significativas daquela reciclada na unidade piloto. Entre outras razões, podem ser enumeradas as seguintes:

- há, na usinas de beneficiamento, um tempo de residência mais longo nos espessadores, em comparação àquele utilizado nos estudos em escala piloto;
- a água de reciclagem na unidade industrial provém, em muitos casos, da barragem de rejeitos cujas condições ambientais e químicas não foram estudadas em escala piloto;
- a água nova usada na unidade piloto é diferente da industrial e, portanto, gera uma água de reciclagem com características físicas e químicas também distintas.

Essas circunstâncias causam imprevistos nas operações industriais, exigindo conhecimentos específicos sobre os constituintes dissolvidos na água e as formas como estes interferem no processo. Portanto, recomenda-se a utilização de métodos de monitoramento da água de reciclagem e também da água nova.

A qualidade da água nova ou reciclada é definida segundo as exigências operacionais do processo, do sistema de reagentes, e o termo qualidade depende, isoladamente, de cada aplicação. Os parâmetros de qualidade da água de interesse serão aqueles que têm efeito nocivo ou benéfico sobre a operação. Esse é o motivo pelo qual a compreensão desses parâmetros deve ser objeto de cuidado especial, ou seja, tais parâmetros devem ser definidos com detalhes.

Um conhecimento adequado da composição química da água e das espécies nela contidas é indispensável aos procedimentos de tratamento, tanto da água nova, como da reciclada. Procedimentos analíticos padronizados são disponibilizados para a determinação dos parâmetros químicos, contudo esses métodos são continuamente adaptados às situações específicas ou da usina. A composição química da água varia de forma contínua ao longo do tempo de operação, exigindo um sistema de análise química também contínuo para melhor monitoramento dessas variações. O desenvolvimento de uma base de dados sobre a composição química da água deve ser realizado durante os estudos em escala piloto, inclusive no início da operação industrial. Tal procedimento é valioso para o ajuste e controle do sistema de abastecimento de água de toda unidade de concentração, além de manter a estabilidade operacional do processo.

Efeitos da Água de Reciclagem no Processo de Flotação

A água reciclada, oriunda de espessadores, filtros e barragens de rejeitos, possui diferentes concentrações de espécies inorgânicas, orgânicas e microbiológicas, de sólidos em suspensão, dentre outros. Esse fato torna-se mais notório quando há, na usina, a produção de múltiplos concentrados. Assim, cada tipo de água reciclada deverá ser reintroduzida no circuito, em pontos adequados, como, por exemplo: na moagem, nas etapas da flotação (*rougher*, *cleaner* e *scavenger*).

Assim, no caso de espécies inorgânicas, como hidróxidos de ferro, chumbo, cálcio, magnésio, alumínio, além de carbonatos, sulfatos, sílica hidratada, aluminossilicatos, dentre outras, deve-se investigar a forma que essas se encontram sobre as partículas dos minerais existentes na polpa. Esses íons, em geral, podem ser resultantes do processo de moagem do minério, da dissolução e/ou oxidação dos sulfetos, da adição dos reagentes no circuito de flotação, finalmente, das águas nova e de reciclagem. Esta última reflete os efeitos cumulativos desses íons no processo de flotação.

Reciclagem de Reagentes Orgânicos

As espécies orgânicas existentes na água de reciclagem e, em concentrações elevadas na polpa de flotação, contribuem para a formação de espuma. Além disso, elas podem agir como ativadores, dispersantes ou floculantes.

As alterações nas características da espuma são muito diferentes em relação à intensidade e forma em que ocorrem. A formação de espuma, ora estável ora não, cria graves problemas ao processo, que por vezes, exige a utilização de água nova como

única solução. Os efeitos surgem meses após o início da reciclagem e constituem a principal dificuldade na reutilização da água. Na flotação, o *cleaner* é a etapa mais sensível aos efeitos da água reciclada. Nesta etapa, pequenas variações nas características da espuma causam efeitos significativos no processo de flotação, prejudicando a recuperação dos minerais valiosos e/ou a seletividade do processo (FORSSBERG e HALLIN, 1989).

A presença de diferentes espécies iônicas na água industrial pode influenciar fortemente no potencial zeta e na viscosidade de uma polpa mineral, gerando graves prejuízos à flotação (FARROKHPAY e ZANIN, 2011), especialmente na perda de controle de estabilidade da espuma. Dessa forma, o pH da polpa e a concentração de espécies iônicas devem ser cuidadosamente monitorados, uma vez que a estabilidade da espuma é diretamente correlacionada com a valência dos íons presentes, $Al^{3+} > Ca^{2+} > Na^{+}$, e com a redução do pH, como exemplificado na Figura 2. O aumento da concentração de sais em solução pode proporcionar a desestabilização de cargas e a agregação de partículas, e, como consequência, a geração de espuma mais estável.

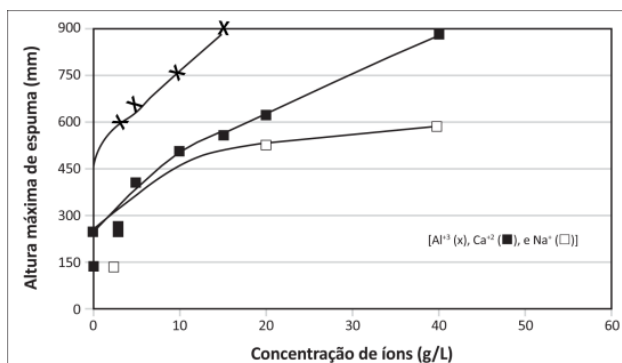


Figura 2. Efeitos da concentração de íons presentes na água da flotação na altura da camada de espuma (adaptado de FARROKHPAY e ZANIN, 2011).

Acúmulo de Coletores na Polpa de Flotação

Nos circuitos de flotação, a água de reciclagem, em especial aquela proveniente dos espessadores, possui um potencial significativo de reagentes orgânicos e ainda de reagentes coletores. Para a utilização dessa água no processo, há um limite máximo para o valor das concentrações desses reagentes, pois os seus efeitos, em geral, são deletérios à flotação. A determinação desse limite constitui objeto de estudos em escalas piloto e industrial.

A decomposição da molécula do coletor, após o seu uso no circuito de flotação, prejudica sobremaneira o processo. As moléculas guardam ainda propriedades coletoras contribuindo para o baixo desempenho do processo de flotação. Assim, produtos da degradação do xantato em atmosfera oxidante, como dixantógeno, podem existir na água de recirculação em maior concentração que o xantato, inclusive com poderes de

coleta maiores que o próprio xantato. Um exemplo é o caso da flotação da pirita em circuito de flotação de sulfetos (KLIMPEL, 1996).

Outro exemplo é dado por Manono *et al.* (2017), que avaliaram o efeito da força iônica e do pH na flotação de metais do grupo da platina (pmg – *platinum metals group*). Segundo os autores, o aumento no pH e na força iônica promoveram a redução na recuperação de sólidos e de água na flotação. Acredita-se que há influência dessas variáveis na inibição da coalescência das bolhas, retardando a drenagem da espuma. A presença de íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , capazes de reduzir a carga superficial negativa dos minerais e, conseqüentemente, a adsorção do xantato na superfície dos mesmos, reduz a eficiência de coleta e a recuperação de sólidos.

Acúmulo de Espécies Inorgânicas

Na flotação, as variações na água de reciclagem ou associadas à adição de reagentes (exemplo: controle do pH de flotação) podem resultar no acúmulo de íons cálcio, sulfato ou ambos na água do sistema, ou melhor, na polpa de flotação. Sucede-se que o aumento nas concentrações desses íons resulta em um aumento no valor do produto de solubilidade para o sulfato de cálcio, favorecendo a sua precipitação. No caso da flotação, isso pode ser usado para deprimir a ganga silicosa.

Na flotação de minerais sulfetados que, geralmente, ocorre em meio alcalino, também se deve considerar que o produto de solubilidade dos hidróxidos metálicos - $\text{Mn}(\text{OH})_2$ - pode atingir valores capazes de promover a precipitação desses íons. Isso pode ocorrer na polpa de flotação e esses íons podem adsorver-se, de forma indiscriminada, na superfície dos minerais constituintes da polpa de flotação.

As variações do pH da polpa de flotação causam a precipitação dos íons hidróxidos metálicos que influenciam na recuperação e na seletividade da flotação de minerais valiosos, de acordo com o tempo de residência. As variações no pH e no Eh da polpa são relevantes na produção de espécies coloidais de vários tipos de minérios, e essas espécies permanecem dispersas na polpa ou, de alguma forma, sobre as superfícies dos minerais, formando leitos hidrofílicos.

O acúmulo de espécies inorgânicas na polpa de flotação deve ser estudado, em detalhes, para evitar os efeitos deletérios dessas espécies ao processo. Os estudos podem ser conduzidos em escalas piloto e industrial. Cabe ressaltar que a manifestação desses efeitos ocorre semanas ou meses após o início da reutilização da água (JOHNSON, 2003).

Liu *et al.* (2013) fizeram uma revisão de trabalhos da literatura que abordaram questões sobre o efeito da qualidade da água na flotação. É evidente que os problemas com a qualidade da água são resolvidos internamente, na usina de concentração, por meio de ajustes operacionais da própria flotação em si como, por exemplo, modificações no sistema de reagentes. Entretanto, isso se dá de maneira empírica, sem

uma compreensão diagnóstica e pró-ativa das reais causas da variação na qualidade do insumo, dificultando a adoção de boas práticas de monitoramento e controle na gestão dos recursos hídricos.

Na maioria dos casos, o monitoramento da qualidade da água é feito nas áreas das minas, portanto, deve-se levar em consideração a conectividade entre as diferentes correntes de água que compõem a água de abastecimento da usina de concentração e suas particularidades. Isso representa um desafio potencial para uma subsequente utilização desses dados na análise da variação da qualidade da água.

PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A seleção do sistema de tratamento de efluentes oriundos de qualquer atividade humana, inclusive os de mineração, depende:

- da característica do efluente, da forma predominante do poluente, de sua biodegradabilidade, da existência de compostos orgânicos e inorgânicos tóxicos;
- da qualidade requerida ao produto resultante do tratamento do efluente, em geral, prescrita pelas legislações vigentes;
- do custo operacional do processo, de acordo com as exigências legais.

De modo geral, as unidades de tratamento de efluentes baseiam-se em três etapas com diversos métodos para definir o processo global de cada estação de tratamento. As principais etapas utilizadas são: primárias, secundárias e terciárias, conforme esquema da Figura 3. Alguns autores adicionam mais duas etapas, um tratamento preliminar (NGES, 2009), anterior ao primário, para a remoção de constituintes que interferem nas etapas seguintes, e a etapa de tratamento do resíduo sólido obtido, denominado de lodo. Para o tratamento do lodo, o processo mais utilizado ainda é o de incineração (SANCHEZ et al., 2009), embora, atualmente, muitos estudos sejam realizados objetivando processos alternativos. Zhang e colaboradores (2009) realizaram o tratamento do resíduo do processamento da cromita com pirólise e posterior tratamento dos gases para a redução do cromo hexavalente.

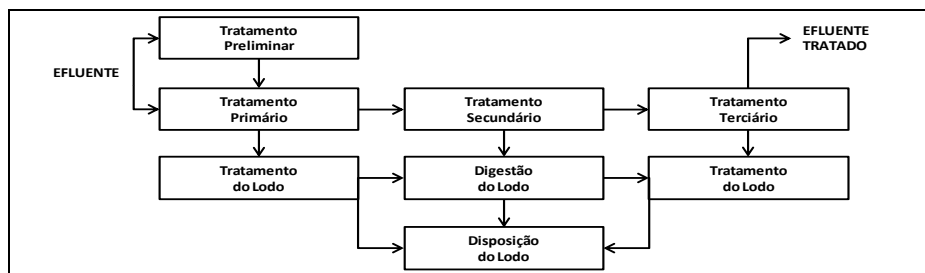


Figura 3. Esquema geral de um sistema tradicional de tratamento de efluente.

O tratamento primário é utilizado na maioria das estações de tratamento de efluentes para eliminar os sólidos, os óleos e as gorduras dispersos. A separação dos sólidos ocorre por meio de grades ou peneiras. Nessa etapa, utilizam-se diversas operações unitárias, como desintegração, floculação, sedimentação e flotação.

Na etapa de tratamento secundário ou biológico, utiliza-se o metabolismo de microrganismos para transformar os contaminantes dos efluentes em substâncias inócuas. Nas unidades de tratamentos de efluentes tradicionais, os processos biológicos restringem-se à degradação de compostos orgânicos dissolvidos e coloidais, à oxidação do nitrogênio da amônia em nitritos e nitratos, à conversão dos nitratos em nitrogênio gasoso e à remoção de compostos de fósforo e estabilização de lodos orgânicos. Entretanto, com o avanço da biotecnologia, os tratamentos biológicos são também aplicados em efluentes com compostos orgânicos insolúveis e com maior dificuldade de degradação, constituintes inorgânicos e íons metálicos (AKCIL et al., 2003).

Os tratamentos terciários utilizam operações físicas e químicas para a remoção de tipos específicos de poluentes, entre os quais incluem-se operações unitárias de microfiltração, adsorção (a maioria com carvão ativado granulado), osmose reversa, flotação iônica, processo oxidativo avançado, eletrorrecuperação etc.

Tratamento Primário

O tratamento primário ou a clarificação é, provavelmente, o processo de purificação de água conhecido há mais tempo. No geral, baseia-se em etapa de separação sólido-líquido para diminuir a turbidez dos efluentes. Os sólidos em suspensão nos efluentes são removidos por sedimentação simples, sedimentação por coagulação, flotação e desidratação. Por sedimentação simples, podem ser retirados da água o cascalho grosso, o cascalho fino, a areia grossa, a areia média, a areia fina, a areia muito fina e o silte, dependendo do tempo de sedimentação. Entretanto, a argila precisa de agentes coagulantes ou floculantes, já que a formação de coloides ($\phi < 2,0 \mu\text{m}$) dificulta a sedimentação e confere turbidez ao efluente.

A floculação é a etapa de agregação de partículas pequenas e coloidais, de grande importância para aumentar a eficiência da separação sólido-líquido nos processos de sedimentação, de flotação por ar dissolvido e de filtração. Na mineração, os floculantes mais utilizados são os polímeros, que promovem a agregação das partículas finas em forma de flocos. Os floculantes são naturais, modificados ou sintéticos, de baixo ou elevado peso molecular, neutros, aniônicos ou catiônicos. A eficiência da floculação depende da escolha do floculante, da forma de aplicação, do ambiente químico, do sistema hidrodinâmico e do tamanho das partículas. A coagulação exige adição de produtos químicos e agitação controlada (até um valor crítico para não quebrar os flocos), que tornam neutras as cargas coloidais e formam os flocos, facilitando a remoção. Os mais utilizados na mineração são as poliácridamidas, polióxidoetileno,

poliacrílico e seus sais, principalmente poliacrilamidas e polietilenoamina (BALTAR, 2010). Os processos de agregação de partículas estão mais bem detalhados no Capítulo 12, deste livro.

A clarificação do meio líquido pode ocorrer por sedimentação ou flotação por ar dissolvido. Na sedimentação, devido à gravidade, as partículas em suspensão possuem movimento descendente no meio líquido de menor massa específica, enquanto a flotação caracteriza-se pela ascensão das partículas suspensas e pela aderência de microbolhas de ar às mesmas, o que lhes confere menor massa específica do que o meio no qual se encontram (BERNARDO e CENTURIONE FILHO, 2003). As bolhas de ar são geradas pela súbita redução de pressão na corrente líquida saturada de ar, proveniente de um saturador, ou seja, um compressor alimenta o ar em um tanque com pressão de 4 a 5,5 atm e uma diminuição brusca de pressão gera microbolhas de ar após a aderência dessas aos flocos, que ascendem e acumulam-se na superfície do efluente.

Segundo Costanzi e Daniel (2002), que realizou experimentos para comparar a sedimentação com a flotação objetivando diminuir a turbidez de efluentes de uma fábrica de papel, a flotação por ar dissolvido é mais eficiente, além de utilizar unidades de operação com menores áreas. Já para efluentes da mineração de ferro (deslamagem), Lima et al. (2017) obtiveram melhores resultados para a sedimentação, devido à concentração de sólidos no efluente e ao tipo de floco formado, que ainda apresentava elevada densidade, sendo mais propício à sedimentação.

Na sedimentação, a remoção das partículas sólidas contidas nos efluentes se dá pela ação do campo gravitacional, o que torna o processo de baixo custo e com simplicidade operacional. Frequentemente, classificam-se os sedimentadores em espessadores, com elevado teor de sólidos (produto de interesse é o sólido), e clarificadores (produto de interesse é o líquido) com baixo teor de sólido. Nas unidades de beneficiamento de minério, tradicionalmente, utilizam-se espessadores (Figura 4) para recuperação de água (reciclo industrial) e para o espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando ao transporte e descarte mais eficazes.



Figura 4. Espessador de rejeito de usina de beneficiamento de minério.

Fonte: autores

O processo final para obtenção de um lodo com o menor valor possível de umidade, para a deposição do resíduo sólido em locais adequados das unidades de tratamento de efluente, envolve diversas operações de desaguamento, como espessamento, filtragem e secagem. Entre os diversos equipamentos de desaguamento, podem ser citados: as prensas desaguadoras, as centrífugas, os filtros-prensa e os filtros-rotativo a vácuo. O filtro-prensa foi o primeiro equipamento usado para desaguar (ou desidratar) lodos provenientes da coagulação de efluente. O filtro-prensa de câmara (Figura 5) foi o primeiro sistema que produziu tortas com elevado conteúdo de sólido, adequadas à deposição direta em aterros industriais.

As operações unitárias de separação sólido-líquido e seus respectivos equipamentos são descritos mais detalhadamente neste livro, no Capítulo 14.



Figura 5. Filtro prensa para produção de torta com elevado conteúdo de sólidos.

Fonte: autores

Tratamento Secundário

Os principais tipos de processos utilizados nas estações de tratamentos convencionais são os aeróbicos com crescimento em suspensão (lodo ativado, lagoas aeradas), os aeróbicos com crescimento em película fixa (filtros-biológicos e biodisco), os combinados, filtro-biológico e lodo ativado ou lodo ativado e filtro-biológico, os anaeróbicos com crescimento em suspensão (digestão anaeróbica, lagoas anaeróbicas e desnitrificação em suspensão), os anaeróbicos com crescimento em película fixa (filtro-anaeróbico e desnitrificação em película fixa) e os processos que associam os metabolismos aeróbicos com os anaeróbicos (lagoas facultativas).

Embora cada processo utilize microrganismos específicos para cada tipo de contaminante, o mais utilizado é de lodo ativado cujas etapas do tratamento estão ilustradas na Figura 6. Consiste na produção de uma massa ativada de microrganismos, uma parte da qual é recirculada para o tanque de aeração e misturada ao efluente, a fim de estabilizar a matéria orgânica contida no efluente. Por serem mais densas que a água, as células de microrganismos são separadas do líquido no decantador e uma parte delas é recirculada e misturada ao efluente na entrada do tanque de aeração.

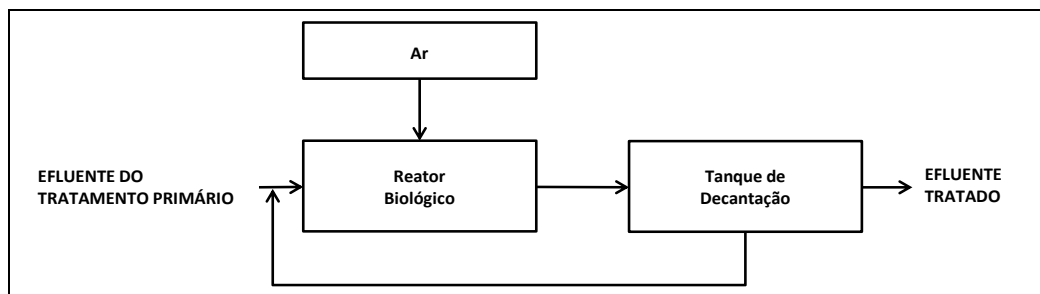


Figura 6. Esquema do processo convencional com lodo ativado.

Geralmente, nas condições aeradas, a matéria orgânica associada ao oxigênio transforma-se em dióxido de carbono e água, já a amônia dos efluentes transforma-se em nitritos e nitratos. Nas condições anaeróbicas, a matéria orgânica converte-se em metano e dióxido de carbono. Nesse contexto, muitas vezes, utiliza-se uma sequência de reatores anaeróbico e aeróbico, com lodo ativado, para remover uma combinação de compostos do efluente, como nitrogênio, fósforo e matéria orgânica degradável, ampliando-se também a utilização dos reatores combinados para a remoção de alguns constituintes específicos, como o íon cianeto, advindo da lixiviação de minério de ouro e prata.

Na degradação de cianetos e tiocianatos por microrganismos, as bactérias convertem estes íons para carbonatos, amônia e sulfato (no caso somente do tiocianato), sendo o metal livre adsorvido dentro dos *biofilmes*. O íon amônia produzido nesse processo também pode ser tratado pelas bactérias *nitrosomonas* e nitrobactérias, sendo convertido para nitrito e nitrato. Ao se empregar as bactérias *pseudomonas sp.* nos efluentes de mineração, constatou-se uma eficiência na degradação dos íons cianetos, competindo com outros tratamentos químicos (AKCIL et al., 2003).

Os filtros de fluxos verticais de lama contendo diferentes macrofilos, similares aos filtros biológicos de areia filtrante, são eficientes para tratar efluentes domésticos e alguns industriais. Amplia-se a utilização destes filtros com zonas aeróbicas e anaeróbicas nos tratamentos de efluentes de drenagem de minas com teores baixos de cobre e chumbo (poluição difusa) e contendo uma variedade de bactérias, fungos, algas e protozoários (SCHOLZ e XU, 2002; SCHOLZ, 2003). Nesse contexto, amplia-se a utilização da biorremediação com lamas ativadas nos efluentes com baixos valores de pH, já que o método tradicional de neutralização pode tornar-se muito oneroso, além de produzir lamas que requerem secagem e disposição adequada (BURGESS e STUETZ, 2002). Priya e colaboradores (2009) observaram a degradação de formaldeídos em reator anaeróbico com filme-fixado. Os processos de biossorção para a recuperação de efluentes foram estudados para os efluentes com concentração acima dos padrões aceitáveis dos íons Cd^{2+} , Co^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , AsO_2^- , CrO_4^{2-} , MoO_4^{2-} e WO_4^{2-} (XIE et al., 1996).

Tratamento Terciário

O tratamento terciário é utilizado, algumas vezes, em efluentes contendo constituintes específicos, substâncias tóxicas, substâncias recalcitrantes, ou ainda, quando a qualidade não se encontra satisfatória após a utilização dos tratamentos primários e/ou secundários. Os vários íons metálicos e compostos orgânicos sintéticos são removidos dos efluentes, segundo a utilização de métodos químicos e físicos (JAIN et al., 2009) ou da combinação destes com os métodos biológicos.

Os íons metálicos são, geralmente, recuperados por precipitação, ou somente neutralização, principalmente quando originários de uma drenagem ácida. Entretanto, em alguns casos, é necessário remover agentes complexantes, como o cianeto e a amônia, que podem dificultar a total recuperação dos íons cobre. Outras vezes, torna-se fundamental a oxidação antes da precipitação, como no caso da transformação do arsenito para arsenato, na recuperação de arsênio.

A diferença nos produtos de solubilidade dos íons impede a total recuperação dos mesmos em um único valor de pH (FENG et al., 2004). A utilização apenas do processo de precipitação pode tornar-se inviável para baixas concentrações, devido ao grande volume de reagentes demandados para atingir a concentração necessária à precipitação. Neste caso, pode-se optar pelo processo de co-precipitação com baixa concentração, no qual são adicionados sais de ferro, alumínio, cálcio ou lantânio, aos efluentes com arsênio e precipitam-se os hidróxidos, que arrastam o arsênio para a fase sólida, gerando efluentes com teores menores que 0,005 mg/L. Pode-se, ainda, remover esses contaminantes por meio de carvão ativado, ou processos de adsorção e troca iônica (geralmente com resinas).

O processo de abrandamento, por exemplo, consiste no método tradicional de tratamento de água para a remoção total ou parcial da dureza (teor de íons cálcio e magnésio, quase sempre na forma de bicarbonato, sulfatos e cloretos). Esses íons são responsáveis por incrustações nos equipamentos industriais e/ou por interferir na dissolução de outros íons. Utiliza-se, geralmente, a precipitação para recuperar íons de cálcio e magnésio nos efluentes com maiores concentrações; a troca iônica com resinas é utilizada para efluentes com menores concentrações desses íons.

As resinas de troca iônica são copolímeros sintéticos que possuem grupos funcionais ativos, apropriados para adsorver cátions e ânions de uma solução e os substituírem por outros íons de mesma carga. As diferentes características físico-químicas das resinas disponíveis no mercado, como tipo de matriz, porosidade e grupos ionizáveis proporcionam maior facilidade na definição da resina mais adequada a cada processo (KREMER, 2018; SAKAI, 2012). O processo de troca iônica com a utilização de resinas é o mais empregado quando se necessita da total remoção dos íons (deionização ou desmineralização) contidos numa corrente de água ou efluente industrial. Nesse processo, o efluente a ser tratado passa primeiro por colunas de resinas catiônicas, as

quais servem como filtro e proteção para as resinas aniônicas, que serão alimentadas em seguida. Pode-se, ainda, utilizar colunas de leito misto, contendo os dois tipos de resina. A regeneração - remoção dos íons adsorvidos nas colunas de troca iônica - deve ser realizada com frequência, para evitar a colmatção da resina e perda de eficiência no processo de troca iônica.

Resinas de troca iônica podem ser usadas no tratamento de efluentes contendo cianocomplexos metálicos, resultantes do processo de cianetação do ouro (FREITAS e COSTA, 2002; RIANI et al., 2004; ARAUJO et al., 2009), efluentes de galvanoplastia (RIANI, 2008), licores de lixiviação de minérios de níquel, contendo níquel e cobalto (SIQUEIRA, 2010), efluentes de usinas nucleares contendo íons radioativos (WANG e WAN, 2015) dentre outros.

A atração entre a superfície e a espécie adsorvida resulta, provavelmente, de interações como ligações de hidrogênio, reações de coordenação, ligações covalentes e reações de troca iônica que se definem como processos de sorção para a recuperação de íons em efluentes. Entretanto, a utilização das resinas de troca iônica implica em custo mais elevado para o tratamento do efluente, o que justifica os constantes estudos de sorção em diversos materiais de menor custo. O carvão ativado, por exemplo, tem vasta aplicação no tratamento de efluentes contendo metais pesados, corantes, matéria orgânica natural e outros compostos carcinogênicos. Portanto, é considerado um agente de sorção de eficiência comprovada, devido ao seu baixo custo, efetividade e flexibilidade (THINES et al., 2017).

Outros materiais modernos à base de carbono, como os nanotubos de carbono e as nanofibras de carbono, têm eficiência comprovada na adsorção de diversos compostos contaminantes em escala de laboratório; entretanto, o custo elevado da matéria prima dificulta a sua aplicação industrial. A busca por matérias primas de menor pureza e a adoção de processos de limpeza que permitam a reutilização dos materiais adsorvedores são consideradas medidas imprescindíveis para a redução de custo e viabilização da aplicação industrial (THINES et al., 2017).

A existência do íon cromo hexavalente em efluentes industriais implica em risco à saúde humana por ser um agente causador de câncer, dermatites e úlceras gastrointestinais. O tratamento clássico por precipitação de hidróxido de cromo trivalente possui custo elevado, devido à utilização de agentes redutores. Assim, outros processos vêm sendo utilizados para diminuir custos e aumentar a eficiência.

Os processos de adsorção têm substituído a precipitação por possibilitar a remoção direta dos íons cromo hexavalente sem os converter para trivalente, reduzindo o custo com agentes redutores. Diversos adsorventes de baixo custo são estudados para tratamento de efluentes, como alternativa ao bem estabelecido carvão ativado, destacando-se os rejeitos da agricultura e da indústria (MARTÍN-LARA et al., 2009), os materiais naturais (MATIS et al., 2004; QUEISSADA et al., 2011), a biomassa de plantas,

como “erva alligator” (WANG et al., 2009) e a utilização de bactéria e fungos como biossorventes (PRIGIONE et al., 2009). Erdem et al. (2004) utilizaram bauxita ativada termicamente para adsorção dos íons cromo (VI) e seu reuso na produção da alumina. Diversas turfas são também comparadas aos materiais inorgânicos na eficiência de adsorção. As escórias de alto-forno, em geral, possuem boa capacidade de adsorção após a neutralização.

A flotação, muito utilizada no beneficiamento de minérios, torna-se promissora no tratamento de efluentes para uma variedade de espécies químicas, por meio da flotação por ar dissolvido (FAD). A FAD, associada a outros métodos, é utilizada não somente na redução de turbidez (remoção dos sólidos finos), mas também na remoção de compostos orgânicos e inorgânicos para a recirculação da água ou para o descarte adequado no meio ambiente (RINGQVIST et al., 2002; FENG e ALDRICH, 2004; ELANGOVAN e PHILIP, 2009).

Couto et al. (2014) utilizaram a flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de refinaria de alumina, contendo partículas finas de lama vermelha. Os resultados são da ordem de 97% de remoção de sólidos e turbidez residual, o que permite a recirculação da água para diversas etapas do processo. Faustino et al. (2017) avaliaram a eficiência da FAD na clarificação da água do rio Gualaxo do Norte, contaminado pelas lamas de minério de ferro das barragens de Fundão e Santarém, com obtenção de água tratada com turbidez abaixo de 100 NTU, permitindo o uso para abastecimento urbano e industrial. Calgaroto et al. (2016) utilizaram a FAD, com micro e nanobolhas, para a recuperação de amina e outros compostos insolúveis contidos em rejeitos de flotação de minério de ferro.

A recuperação dos efluentes de minas e das usinas de processamento mineral pode também utilizar a flotação iônica usando xantatos, flotação de precipitados de hidróxidos de cobre e flotação das partículas adsorvedoras de zeólitas (OLIVEIRA e LUZ, 2001; LAZARIDIS et al., 2004; MATIS et al., 2004).

A flotação por ar induzido também é utilizada para a remoção de partículas finas, mas, devido à velocidade terminal menor necessita de grandes equipamentos (JAMESON, 1999). A recuperação de finos de cromita foi realizada utilizando flotação em coluna com diversos coletores (FENG e ALDRICH, 2004). A eletroflotação pode ser aplicada em efluentes da célula eletrocoagulação e eletrofloculação, sendo usada principalmente para óleos e graxas (CRESPILHO, 2004).

Os tratamentos terciários mais utilizados para efluentes contendo íons cianetos são baseados na oxidação do íon cianeto para cianato. A oxidação eletroquímica possibilita a recuperação dos metais complexados pelo cianeto sem que seja necessário adicionar reagentes químicos, o que, por fim, atende às exigências ambientais (SOBRAL et al., 2002). Utilizam-se também oxigênio molecular dissolvido em altas temperaturas ou ar com elevadas pressões, oxidantes mais fortes como Cl_2 ou ClO^- , peróxido de

hidrogênio, oxigênio com catalisador de sal de cobre, processo eletroquímico para elevadas concentrações, seguido da oxidação com ClO^- para a solução residual (BAIRD, 2002).

Os métodos convencionais de tratamento de efluentes frequentemente são pouco efetivos para compostos orgânicos sintéticos, que se encontram dissolvidos e em baixas concentrações, como os tricloroeteno (TCE) e percloroeteno (PCE), ambos solventes industriais de amplo uso, além de serem os poluentes mais comuns de águas subterrâneas. Neste contexto, com a finalidade de purificar efluentes com compostos orgânicos extra-estáveis, principalmente os compostos organoclorados (FREIRE et al., 2000), são utilizados os chamados processos oxidativos avançados - POA (LI et al., 2009). Estes processos baseiam-se na geração do radical hidroxila (OH^\cdot), que tem elevado poder oxidante e pode promover a degradação de vários compostos poluentes em pouco tempo. Os processos oxidativos avançados visam à mineralização dos poluentes, isto é, sua conversão em CO_2 e em ácidos minerais, como ácido clorídrico. Dentre os vários processos para a obtenção desses radicais livres, destacam-se a utilização de ozônio (ALMEIDA et al., 2004), peróxido de hidrogênio, inclusive sua mistura e combinação com outros elementos (por exemplo, mistura de peróxido de hidrogênio e sais ferrosos) (DANIEL, 2001; BAIRD, 2002).

Gerar os radicais livres hidroxila em solução é um processo caro, por isso, é importante fazer um pré-tratamento do efluente, retirando a maioria dos compostos orgânicos e inorgânicos por meio de processos mais simples e de menor custo para, então, somente os compostos mais estáveis serem atingidos e tratados com os radicais hidroxila. Nesse sentido, devido à eficiência dos POA, ampliam-se os estudos objetivando desenvolver técnicas alternativas para obtenção desses radicais com menores custos e em menores tempos. Um exemplo interessante são os transdutores cerâmicos, que provocam ondas no meio reacional e aceleram a obtenção dos radicais livres hidroxila. Estas cerâmicas são feitas de materiais piezoelétricos (INCE et al., 2001). Os transdutores foram também utilizados para desintegrar lamas antes da digestão anaeróbica, facilitando a solubilização de compostos orgânicos (SALSABIL et al., 2009).

Na etapa de tratamento terciário do efluente, geralmente removem-se compostos específicos não avaliados nas etapas anteriores (primário e secundário), como é o caso da dessalinização, que pode ser realizada pelos seguintes processos: osmose reversa, ultrafiltração, eletrodialise e eletrodeposição.

Os processos que utilizam membrana, como osmose reversa (inclusive osmose reversa com pressão muito baixa) e nanofiltração, têm grande aplicação nos tratamentos de efluente para reúso da água, uma vez que possibilita a remoção de diversos tipos de constituinte, como sólidos dissolvidos, carbono orgânico, íons inorgânicos e compostos orgânicos tóxicos em quantidades traços (BELLONA et al., 2004; INTO et al., 2004; RAS e VON BLOTTNITZ, 2012).

Na osmose reversa, ou hiperfiltração, são produzidas duas soluções de diferentes concentrações, separadas por membranas porosas. Aplica-se uma pressão na seção de elevada concentração, gerando um fluxo de água para o compartimento de menor concentração (solução diluída), o que aumenta a concentração da salmoura. O processo, com elevada sensibilidade, possui baixo consumo de energia e independe do conteúdo de sais do efluente. Entretanto, a membrana deve ser uniforme e permitir alta velocidade de filtração (BERTRÁN, 1988).

Existem no mercado membranas de acetato de celulose - principalmente a tratada com perclorato de magnésio, de maior permeabilidade - e de poliamida. A primeira é resistente a produtos oxidantes e pode ser utilizadas na presença de cloro; já a membrana de poliamida, embora apresente flexibilidade de uso em vasta faixa de pH (2 a 11), não é resistente a oxidantes, possibilitando, assim, a maior proliferação de microrganismos e o aumento da formação de biofilmes em suas superfícies, levando a maior perda de carga durante a operação (FERRUGIA, 2013; INDFILTROS, 2016).

Uma instalação de osmose reversa é composta de poucos equipamentos, entretanto, é necessário um pré-tratamento do efluente para que os resíduos sólidos existentes não danifiquem nem obstruam a membrana.

Na África do Sul, onde a água é escassa e de qualidade inadequada ao uso direto, muitas usinas de beneficiamento de carvão e termelétricas utilizam a osmose reversa no tratamento da água e efluentes, com o objetivo de viabilizar a operação das unidades industriais. Em Tutuka, uma indústria de carvão implantou o processo de osmose reversa, precedida por uma etapa filtração com areia, para operação com descarte zero de água da mina de carvão e da torre de resfriamento (BUHRMANN et al., 1999). Em alguns casos o pré-tratamento em filtros de areia não é eficiente; entretanto, o uso de ultrafiltração para a remoção de sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, compostos orgânicos, além de microrganismos contidos no efluente tem se mostrado eficiente e economicamente viável como pré-tratamento, combinado com a osmose reversa, para a indústria carbonífera local (RAS e VON BLOTTNITZ, 2012; HUNTER e DU TOIT, 2015).

Ultrafiltrações utilizando membranas foram aplicadas para a remoção e recuperação de íons de cobre, chumbo, ferro e manganês, com adição de ligante polimérico (celulose metil carboxil) para serem retidos na membrana (PETROV e NENOV, 2004). Membranas de cerâmicas, de alumina modificada com sílica (tamanho dos poros de 100 nm) e alumina alfa (tamanho dos poros de 10 nm) foram utilizadas por Laitinen et al. (2002) na remoção de sólidos muito finos em suspensões de efluentes de minas a céu aberto, para redução da turbidez.

A eletrodialise, outro processo que emprega membrana, é utilizada para a diminuição de salinidade e para evitar corrosão em equipamentos industriais, no caso de reúso da água. O processo baseia-se no efeito gerado pela aplicação de uma corrente elétrica contínua no efluente e por uma sucessão de membranas trocadoras de cátions e

ânions alternadamente, o que provoca uma diminuição da concentração em um compartimento e aumento no seguinte e, assim, sucessivamente, ao longo de todo o equipamento (STREIT et al., 2011).

No tratamento de efluentes de mineração, em alguns casos pode ser necessária a inclusão de uma etapa de desinfecção, principalmente quando o objetivo é a recirculação da água no processo, pois alguns microrganismos podem provocar corrosão em equipamentos das unidades de beneficiamento ou interferência nos processos, como na flotação. Essa etapa poderá utilizar o processo de cloração, o de uso mais frequente e de menor custo, ou de outros agentes desinfectantes, se a cloração interferir no processo de beneficiamento.

Em resumo, os efluentes de minas ou de unidades de beneficiamento de minérios podem ser tratados utilizando-se somente as etapas primárias e terciárias, ditos tratamentos físicos e químicos, ou somente os tratamentos biológicos, ou uma combinação dos tratamentos físicos, químicos e biológicos. A definição do processo de tratamento dependerá das características físicas, químicas e biológicas de cada efluente em questão.

MONITORAMENTO

Diversas doenças infecciosas têm sua origem nos microrganismos patogênicos encontrados nas águas poluídas pelo esgoto e efluentes doméstico e industrial. A poluição causada pelo esgoto pode contaminar novas nascentes, reduzir o nível de oxigênio em rios e lagoas, contaminar poços, mananciais de superfícies e muitos recursos hídricos. Entretanto, não são somente os microrganismos podem gerar doenças e impactos ambientais, mas também constituintes inorgânicos e orgânicos sintéticos com elevado teor de toxicidade. Desse modo, o monitoramento de efluentes industriais torna-se importante. Entretanto, é um processo muito complexo, tendo em vista o custo de análises dos diversos constituintes existentes nos efluentes atuais.

Para aperfeiçoar e viabilizar o monitoramento dos efluentes, é de fundamental importância a análise de todo o processo a fim de determinar os possíveis contaminantes e, então, escolher as técnicas de análises. Cabe lembrar que as análises químicas de efluentes possuem custos elevados, pois utilizam o recurso da instrumentação. Os métodos clássicos não têm limites de detecção satisfatórios, uma vez que os valores dos compostos orgânicos e inorgânicos tóxicos são da ordem de ppm ou ppb.

As análises físico-químicas clássicas para determinação de turbidez ou concentração de oxigênio dissolvido, por exemplo, devem ser realizadas. As concentrações de compostos específicos de cada mina e/ou unidade de beneficiamento também precisam ser determinadas, entretanto, em muitos dos casos,

não existe método estipulado. Assim, necessita-se do desenvolvimento de técnicas de análises específicas para o monitoramento, como também de métodos específicos para o tratamento do efluente.

Ações da Mineração no Mundo para Redução no Consumo de Água

No Brasil, mais especificamente, na região metropolitana de Belo Horizonte, a Mina de Capão Xavier (VALE) produz cerca de 760 m³/mês de vazão de água de mina. Para manter a sustentabilidade da operação, a empresa disponibiliza 30% da água para a Companhia de Abastecimento do Estado (COPASA-MG) para o abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte. Planeja-se, quando do fechamento da mina, a formação de um lago/reservatório integrado ao sistema de abastecimento de Belo Horizonte com a função de regular o fluxo hídrico durante a estação seca (SALUM, 2017).

Na África do Sul, as empresas Anglo Coal South Africa e BHP Billiton Energy Coal South Africa (BECSA) assinaram um acordo com o governo local para tratar e bombear a água da mina para a localidade urbana, a 40 km da mina. A vazão de bombeamento disponibilizada, de 20.000 m³/d, é suficiente para suprir uma população de 80 mil habitantes (CORNISH, 2013; CIMINELLI e PEDREIRA, 2014).

Na Namíbia e no Chile, o uso de água do mar ou de água salobra tratadas nos processos de mineração e metalurgia é visto como uma alternativa à carência de água doce. A Trekkopje Uranium Mine, localizada na Namíbia, possui uma unidade de dessalinização de água para alimentar a planta de beneficiamento baseada em lixiviação em pilha e processo de troca iônica, o qual é extremamente sensível à salinidade da água. Com capacidade para processar 45 milhões m³/ano de água do mar, a unidade de tratamento - inaugurada em 2010 - produz 20 milhões m³/ano de água potável por meio de filtração, ultra-filtração, osmose reversa e tratamento químico (AREVA, 2014).

No Peru, a expansão das instalações da mina de cobre Cerro Verde, localizada na região de Arequipa, foi garantida pela contrapartida da empresa Freeport-McMoRan em tratar o efluente urbano e disponibilizar 1 m³/s de água tratada para a comunidade local. Dessa forma, contribui para a segurança hídrica na região, melhora a qualidade da água do rio, reduz as doenças relacionadas com a água, além de favorecer a agricultura na região (FREEPORT MCMORAN, 2017).

Aqui foram citados alguns exemplos de uso sustentável da água na mineração, propiciando a disponibilidade do recurso para os diversos setores demandantes. Certamente, muitas empresas de mineração ao redor do mundo estão empenhadas na redução do consumo de água nova, incentivadas pela intensificação da prática do reuso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A discussão sobre o uso da água, seu abastecimento, consumo, qualidade, e preservação, dentre outros, não constitui uma questão específica da mineração, pelo contrário, trata-se de uma questão global que atinge todas as sociedades. O equívoco em considerar a água um bem mineral renovável e abundante adquire um novo foco, isto é, o termo escassez faz parte do cotidiano dos usuários desse bem mineral.

Estimativas da Organização das Nações Unidas (UN WWAP, 2015) alertam para o fato de que em 2025 apenas 25% da humanidade terá água para suas necessidades essenciais. Jacobi e Grandisoli (2017) apresentam dados do *Water Resources Group* com projeções de um déficit hídrico global de cerca de 40% em 2030, caso os diferentes setores da sociedade mantenham a dinâmica atual de consumo. Esses alertas mostram que os recursos hídricos são uma das grandes inquietações prioritárias dos objetivos do milênio para o desenvolvimento sustentável. Diante dessa realidade, há na indústria mineral a visível consciência da utilização desses recursos de forma racional, em perfeito equilíbrio com o meio ambiente e o desenvolvimento econômico sustentável. Resta, apenas, tornar comum a todos a prática dessa consciência.

Na mineração brasileira, a prática do tratamento da água está restrita à etapa de tratamento primário para separação sólido-líquido, isto é, à remoção dos resíduos sólidos dos efluentes. Comprova-se a maior recirculação de água pela utilização predominante de espessadores e barragens de rejeitos, como etapa de tratamento mais usual. A carência de dados sobre o consumo, origem e qualidade da água utilizada na mineração dificulta uma abordagem correta da situação, tornando necessário e urgente o levantamento preciso dessas informações pelas empresas e órgãos públicos do setor para planejamento, controle ambiental e gerenciamento da água na mineração.

Os engenheiros de processo, pesquisadores e especialistas da área devem conhecer, com detalhes, a influência da água e seus constituintes nos processos pelos quais são responsáveis. Assim será possível estabelecer, de forma criteriosa, os parâmetros para o controle de qualidade da água a ser utilizada na atividade mineral, até mesmo aquela destinada ao descarte.

No caso dos efluentes das drenagens ácidas, o tratamento promove a neutralização da acidez e conseqüente precipitação, imobilizando então as espécies dissolvidas no lodo formado. Alternativamente, podem ser utilizados outros sistemas de processos. Nesses sistemas, está associado um grande número de processos físicos, químicos e biológicos naturais resultante da interação entre água, solo, plantas, microrganismos e atmosferas para tratar os efluentes da drenagem ácida, ocorrendo uma biorremediação.

No processamento mineral, há avanços significativos, em termos de pesquisas, nas áreas de química de superfície, otimização dos processos de moagem, de concentração etc. Todavia, a influência da água no beneficiamento de minérios recebe pouco comprometimento dos pesquisadores, especialistas, gerentes e empresários do setor mineral. Os esforços existentes situam-se na área de controle da qualidade da água, em especial no reúso, em virtude apenas da deficiência no suprimento de água nova ou por exigências ambientais. Falta muito para atingir uma utilização racional e consciente desse bem mineral nos diversos setores da mineração. Mesmo assim, já são conhecidos casos de operações com descarte zero de água, isto é, otimização dos sistemas de reciclagem (LEVAY et al., 2001; DAS e GOSWAMI, 2014; FRANÇA et al., 2017).

Para aproveitamento e reutilização integral dos recursos hídricos, é fundamental o desenvolvimento de sistemas eficientes de tratamento. As partículas finas e os reagentes residuais constituem os contaminantes básicos contidos nos efluentes das diversas usinas de processamento de minérios no Brasil. Nesse sentido, torna-se evidente a necessidade de processos que acelerem a degradação dos reagentes e diminuam o conteúdo de sólidos nos efluentes. Assim, será possível não apenas reduzir em número e em tamanho as barragens de rejeitos, mas também melhorar o aproveitamento econômico dos finos de minérios, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da atividade mineral.

O setor mineral deve fazer um esforço para utilizar os avanços tecnológicos ocorridos nos últimos anos na área de tratamento de efluentes, tornando-se, assim, mais eficiente no reúso da água de processo. Sugere-se, por exemplo, que a degradação de compostos orgânicos sintéticos, originários do processo de flotação, seja acelerada por processo oxidativo avançado, diminuindo, assim, o seu tempo de retenção nas bacias de rejeito e, conseqüentemente, as dimensões das mesmas.

Não se deve negligenciar a existência de reagentes espumantes resultantes do processo de beneficiamento, ou de outras moléculas orgânicas oriundas da água de reciclagem da barragem de rejeitos. Os efeitos dessas moléculas podem ser diversos, desde aparentemente positivos, reduzindo o consumo de reagentes, até negativos, em razão da existência de espumas estáveis e da ação flocculante e/ou depressora de espécies orgânicas contidas na água de reciclagem das barragens de rejeitos, com conseqüências deletérias ao processo de flotação.

A reciclagem de água aumenta a concentração de espécies orgânicas e inorgânicas derivadas do minério, dos reagentes e da própria água. O aumento da concentração dessas espécies torna-se determinante se o produto de solubilidade de um hidróxido de metal, sulfato ou outro composto atingir valores que promovem a formação de espécies coloidais, que podem ser adsorvidas na superfície dos minerais, formando leitos hidrofílicos, ou mesmo permanecer dispersos na polpa de flotação.

Tais efeitos são usualmente deletérios e ocorrem quando há aumento nas concentrações de íons hidróxidos e de cálcio, em especial, nas etapas de *cleaner* da flotação.

Há necessidade de investigações intensas para o melhor entendimento do impacto da qualidade da água na flotação de minérios. Os resultados dessas pesquisas terão fundamental importância para que os operadores de unidades industriais possam minimizar os efeitos adversos da água sobre o processo, além de promover a melhor utilização da água disponível como um recurso mineral de elevado valor econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGBOOLA, O.; MOKRANI, T.; SADIKU, E.R.; KOLESNIKOV, A.; OLUKUNLE, O.I.; MAREE, J.P. Characterization of two nanofiltration membranes for the separation of ions from acid mine water. *Mine Water Environment*, v. 36, p. 401-408, 2017.

AGUIAR, M.R.M.P.; NOVAES, A.C.; GUARINO, A.W. S. Remoção de Metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*, 25, p. 1145-1154, 2002.

AKCIL, A.; KARAHAN, A.G.; CIFTCI, H.; SAGDIC, O. Biological Treatment of Cyanide by Natural Isolated Bacteria (*Pseudomonas* sp.). *Minerals Engineering*, 16, p. 643-649, 2003.

ALMEIDA, E.; ASSALIN, M.R.; ROSA, M.A.; DURAN, N. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. *Química Nova*, 27, p. 818-824, 2004.

AMARAL FILHO, J.R.; WEILER, J.; BROADHURST, J.L.; SCHNEIDER, I.A.H. The use of static and humidity cell tests to assess the effectiveness of coal water desulfurization on acid rock drainage risks. *Mine Water Environment*, v. 36, p. 429-435, 2017.

ANDRADE, M.C.; FRANÇA, S.C.A.; LUZ, A.B. Flotação por ar dissolvido na recuperação de água de processo. *XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, v. 2, p. 103-110, 2004.

ARAUJO, D.M.; YOSHIDA, M.I.; STAPELFELDT, F.; CARVALHO, C.F.; DONNICI, C.L.; KASTNER, G.F. Estudos comparativos entre carvão ativado e resina de troca iônica para adsorção de ouro, cobre e ferro. *Revista da Escola de Minas*, v. 62(4), p. 463 - 468, 2009.

AREVA TREKKOPJE MINE STAKEHOLDER REPORT 2012-2013, 22p., 2014. Disponível em: <http://www.rse-mines.aveva.com/images/mediatheque/01-rapport-et-charte/a-08-Trekkopje-stakeholder-report-2012-2013.pdf>. Acesso em 10 nov. 2017.

BAIRD, C. *Química Ambiental*, 2. ed., Porto Alegre, Ed. Bookman, 622 p., 2002.

BALDOINO, R.O. Concentração de fosfato de Bayóvar: aspectos fundamentais e tecnológicos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da USP, São Paulo, 121p., 2017.

BALTAR, C.A.M. Processos de agregação. In: LUZ, A.B. et al. (Eds). Tratamento de Minérios-CETEM, 5. ed., p. 559-594, 2010.

BARBATO, C.N.; FRANÇA, S.C.A., SOUZA, M.N. Influence of solids concentration, particle size distribution, pH and temperature on yield stress of bauxite pulp. *Light Metals (New York)*, v. 1, p. 19-24, 2011.

BARBATO, C.N.; SILVA, F.A.N.G.; SAMPAIO, J.A.; MEDEIROS, M.E.; FRANCA, S.C.; NELE, M. Avaliação estatística das variáveis que influenciam a viscosidade da polpa de bauxita do Pará com alto teor de SiO₂ reativa. *Matéria (UFRJ)*, v. 18, p. 1410-1424, 2013.

BARBOSA, R.K.C. Avaliação do tratamento de efluentes da indústria de alumina no contexto dos impactos da mineração na Amazônia Oriental. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, UFPA, Belém, 90p., 2014.

BELLONA, C.; DREWES, J.E.; XU, P.; AMY, G. Factors affecting the rejection of organic solutes during NF/RO treatment – a literature review. *Water Research*, 38, p. 2795-2809, 2004.

BERNARDO, L. di; FILHO, P.L.C. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. *Engenharia Sanitária e Ambiental-Nova Técnica*, p. 39-44, 2003.

BERTRÁN, J.R.R. Tratamiento de Água para Las Instalaciones Energéticas Nucleares, 1988.

BOSON, P.H.G.; CASTRO, L.M.A.; FEITOSA, V.M.N. Os instrumentos de gestão de recursos hídricos e sua implantação na mineração: a experiência brasileira. In: *A gestão dos recursos hídricos e a mineração*, IBRAM e ANA, p.71-85, 2006.

BUHRMANN F.; WALDT, M.V.D.; HANEKOM, D.; FINLAYSON, F. Treatment of industrial wastewater for reuse. *Desalination*, v. 124, p. 263-269, 1999.

BURGESS, J.E.; STUETZ, R.M. Activated sludge for the treatment of sulphur-rich wastewaters. *Minerals Engineering*, v. 15, p. 839-846, 2002.

CALGAROTO, S.; AZEVEDO, A.; RUBIO, J. Separation of amine-insoluble species by flotation with nano and microbubbles. *Minerals Engineering* v. 89, p. 24–29, 2016.

CHARLES, A.L.; MARKICH, S.J.; STAUBER, J L.; FILIPPIS, L.F. de. The effect of water hardness on the toxicity of uranium to a tropical freshwater alga (*Chlorells sp*). *Aquatic Toxicology*, v. 60 (1-2), p. 61-73, 2002.

CHAVES, A.P. Bombeamento de polpa e classificação, v. 1, 4ª Ed. (revisada e aprimorada). São Paulo, Oficina de Texto, 303p., 2012.

CIMINELLI, V.S.T.; PEDREIRA, R.R.V. Água na indústria mineral, impactos da seca, perspectivas. Seminário Recursos Hídricos na Região Sudeste: Segurança Hídrica, Riscos, Impactos e Soluções (Slides). Academia Brasileira de Ciências. São Paulo, 20p. 2014. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-5942.pdf>. Acesso em 12 nov. 2017.

CIMINELLI, V.S.T.; SALUM, M.J.G.; RUBIO, J.; PERES, A.E.C. Água e mineração. Águas Doces no Brasil, 3ª edição, Rebouças, A.C., Braga, B.; Tundisi, J.G. (Orgs.), Escrituras Editora e Distribuidora de Livros Ltda. SP, p. 433 - 458, 2006.

CNI & IBRAM (Conferência Nacional da Indústria & Instituto Brasileiro de Mineração), Mineração e economia verde. Cadernos setoriais Rio+20. Brasília, CNI, 69p., 2012.

CNI & IBRAM (Confederação Nacional da Indústria & Instituto Brasileiro de Mineração). Mineração e economia verde. Confederação Nacional da Indústria, Brasília, 72p., 2017.

CORNISH, L. Preserving the environment for future generations. Mining News, Feb., 2013. Disponível em <http://www.miningnews.com.au/2013/02/06/preserving-the-environment-for-future-generations>. Acesso em 12 nov. 2017.

COSTA, M.F.; HENRIQUES, J.C.C.; AMARAL, F.G. Water quality assesment in catchment areas of open pit mines - a methodological approach. In: 24th World Mining Congress Proceedings, Mining in a World of Innovation, Rio de Janeiro, p. 549-554, 2016.

COSTANZI, R.N.; DANIEL, L.A. Estudo de tratamento dos efluentes de uma fábrica de papel para imprimir visando o reúso por flotação e sedimentação. Engenharia Sanitária e Ambiental, p. 156-160, 2002.

COUTO, H.J.B.; FRANÇA, S.C.A.; BARBOSA, R.K.C. The use of DAF (Dissolved Air Flotation) as an alternative treatment for the red mud wastewater. Proceedings of International Mineral Processing Congress - IMPC 2014. IMPC_C1208, p. 1-10, 2014.

CRESPILHO, F.N.; SANTANA, C.G.; REZENDE, M.O.O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. Química Nova, 27(3), p. 387-392, 2004.

DANIEL, L.A. Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável. São Carlos-SP, Ed. Rima Artes e Textos, 149p., 2001.

DAS, M.; GOSWAMI, S. Water management techniques in mining sectors: an overview. National Workshop on Management of Water Resource with Zero Waste Approach (MWRZW – 2014), IIT Kharagpur, Bhubaneswar, p. 160-173, 2014.

ELANGOVA, R.; PHILIP, L. Performance evaluation of various bioreactors for the removal of Cr (VI) and organic matter from industrial effluent. Biochemical Engineering Journal, 44, p. 174-186, 2009.

ERDEM, M.; ALTUNDOGAN, H.S.; TUMEN, F. Removal of hexavalent chromium by using heat-activated bauxite. Minerals Engineering, 17, p. 1045-1052, 2004.

FARROKHPAY, S.; ZANIN, M. Effect of water quality on froth stability in flotation. Proceedings of CHEMECA 2011, Engineering a better world, Sydney, NSW, Sep., p. 1-5, 2011.

FAUSTINO, L.M; BRAGA, A.S.; WHITAKER, W.; MATAI, P.H.L.; LEAL FILHO, L.S. Flotação por ar dissolvido aplicada ao tratamento de água poluída por lamas de minério de ferro. In: Anais do XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belém - PA, p. 2078 - 2085, 2017.

FENG, D.; ALDRICH, C. Recovery of chromite fines from wastewater streams by column flotation. *Hydrometallurgy*, 72, p. 319-325, 2004.

FENG, D.; VAN DEVENTER, J.S.J V.; ALDRICH, C. Removal of pollutants from acid mine wastewater using metallurgical by-product slags. *Separation and Purification Technology*, v. 40, p. 61-67, 2004.

FERRUGIA, B. Membranas de osmose reversa: aplicações e novidades do mercado. *Revista TAE*, Outubro, 2013. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/6637-noticias>. Acesso em 08 abr. 2018.

FORSSBERG, K.S.E; HALLIN, M.I. Process water recirculation in a lead-zinc plant and other sulphide flotation plants. In: SASTRA, K.V.S.; FUERSTENAU, M. C (Ed.). *Challenges in Mineral Processing*, Society of Mining Engineers, Inc: Littleton, p. 452-466, 1989.

FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. Separação Sólido-líquido. In: LUZ, A.B. et al. *Tratamento de Minérios-CETEM/MCT*, 5. ed., p. 635-680, 2010.

FRANÇA, S.C.A.; ANDRADE, L.S.; LOAYZA, P.E.V.; TRAMPUS, B.C. Water in mining – challenges for reuse. *Proceedings of 13th International Mine Water Association Congress – IMWA 2017, Mine Water and Circular Economy*, Lappeenranta, Finland. Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M, Häkkinen A (Eds.), v. 1, p. 445-452, 2017.

FREEMPORT MCMORAN, Cerro Verde. Disponível em: <https://www.fcx.com/operations/south-america>. Acesso em 11 nov. 2017.

FREIRE, R.S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L. T.; DURAN, N.; PERALTA-ZAMORA, P. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. *Química Nova*, v. 23, p. 504-511, 2000.

FREITAS, L.R.; COSTA, R.S. Recuperação de ouro dissolvido. In: *Extração de ouro - princípios, tecnologia e meio ambiente*. Trindade, R.E. e Barbosa Filho, O. (Eds.), CETEM/MCT, p. 94-133, 2002.

Instituto Aço Brasil. Relatório de sustentabilidade 2016. Disponível em: www.acobrasil.org.br/sustentabilidade. Acesso em 02 jan. 2018.

INCE, N.H.; TEZCANLI, G.; BELEN, R.K.; APIKYAN, I.G. Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 29, p. 167-176, 2001.

INDFILTROS. Membranas de osmose reversa, 2016. Disponível em <http://www.indfiltros.com.br/produtos/membrana-de-osmose-reversa>. Acesso em 12 ago. 2017.

INTO, M.; JÖNSSON, A.; LENGÉN, G. Reuse of industrial wastewater following treatment with reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, v. 242, p. 21-25, 2004.

JACOBI, P.R.; GRANDIZOLI, E. Água e sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções. 1. ed. São Paulo: Ed. IEE/USP e RECONNECTA, 110p., 2017.

JAIN, S.; YAMGAR, R.; JAYARAM, R.V. Photolytic and photocatalytic degradation of atrazine in the presence of activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, v. 148, p. 342-347, 2009.

JAMESON, G.J. Hydrophobicity and floc density in induced-air flotation for water treatment. *Colloids and Surfaces*, v. 151, p. 269-281, 1999.

JOHNSON, W.N. Issues in maximization of recycling of water in mineral processing plant. In: *Water Mining. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Publication Series N6/2003*. Brisbane, Australia, 2003.

KLIMPEL, R.R. The effect of water chemistry, reagent type, and environmental factors on the performance of industrial grinding and flotation process involving sulfide minerals. Paper presented at SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, 1996.

KREMER, T.O. Resinas de troca iônica. Disponível em: <http://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/resinas-de-troca-ionica>. Acesso em 10 abr. 2018.

LAITINEN, N.; KULOVAARA, M.; LEVÄNEN, E.; LUONSI, A.; TEILLERIA, N.; NYSTRÖM, M. Ultrafiltration of stone cutting mine wastewater with ceramic membranes – a case study. *Desalination*, 149, p. 121-125, 2002.

LAZARIDIS, N.K.; PELEKA, E.N.; KARAPANTSIOS, T.D.; MATIS, K.A. Copper removal from effluents by various separation techniques. *Hydrometallurgy*, 74, p. 149-156, 2004.

LEVAY, G.; SMART, R.St.C.; SKINNER, W.M. The impact of water quality on flotation performance. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, p. 69-75, 2001.

LI, J.; AI, Z.; ZHANG, L. Design of a neutral electro-Fenton system with Fe@ Fe₂O₃/ACF composite cathode for wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, p. 18-25, 2009.

LIMA, N.; SILVA, K.; MATIOLO, E.; COUTO, H.J.B.; ALMEIDA, R.N.; FREITAS, A.S. Estudo comparativo entre sedimentação e flotação por ar dissolvido para adensamento de lamas de minério de ferro. *Anais do XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, Belém, p. 45-51, 2017.

LIU, W.; MORAN, C.J.; VINK, S. A review of the effect of water quality on flotation. *Minerals Engineering*, 53, p. 91-100, 2013.

LOAYZA, P.E.V. Estudo de eficiência de polímeros naturais (quitosana e ácido húmico) na floculação e desaguamento de polpas minerais. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 147p., 2015.

LUZ, A. B. Estudo de reoxidação e redução de ferro contido em caulins, Tese (Doutorado) - EPUSP, São Paulo, 1998.

MARTÍN-LARA, M.A.; HERNÁINZ, F.; CALERO, M.; BLÁZQUEZ, G.; TENORIO, G. Surface chemistry evaluation of some solid wastes from olive-oil industry used for lead removal from aqueous solutions. *Biochemical Engineering Journal*, 44, p. 151-159, 2009.

MATIS, K.A.; ZOUBOULIS, A.I.; GALLIOS, G.P.; ERWE, T.; BLÖCHER, C. Application of flotation for the separation of metal-loaded zeolites. *Chemosphere*, 55, p. 65-72, 2004.

MANONO, M.S.; MATIBIDI, K.; THUBAKGALE, C.K.; CORIN, K.C.; WIESE, J.G. Water quality in PGM ore flotation: the effect of ionic strength and pH. *Proceedings of the International Mine Water Association – IMWA 2017, Mine Water and Circular Economy, Lappeenranta, Finland. Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M, Häkkinen A (Eds.), v. 2, p. 777-784, 2017.*

NGES, I. A.; LIU, J. Effects of anaerobic pre-treatment on the degradation of dewatered-sewage sludge. *Renewable Energy*, 34, p.1795-1800, 2009.

OLIVEIRA, A.P.A.; LUZ, A.B. Recursos hídricos e tratamento de água na mineração. *Série Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, 2001.*

PETROV, S.; NENOV, V. Removal and recovery of copper from wastewater by a complexation-ultrafiltration process. *Desalination*, 162, p.201-209, 2004.

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos. Síntese executiva - português/Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 135p., 2006.

PRIGIONE, V.; ZERLOTTIN, M.; REFOSCO, D.; TIGINI, V.; ANASTASI, A.; VARESE, G.C. Chromium removal from a real tanning effluent by autochthonous and allochthonous fungi. *Bioresource Technology*, 100, p.2770-2776, 2009.

PRIYA, K.R.; SANDHYA, S.; SWAMINATHAN, K. Kinetic analysis of treatment of formaldehyde containing wastewater in UAFB Reactor. *Chemical Engineering Journal*, 148, p.212-216, 2009.

QUEISSADA, D.D.; SILVA, F.T.; PAIVA, T.C.B. Tratamentos integrados em efluente metal-mecânico: precipitação química e biotratamento em reator do tipo air-lift. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, p. 181-188, 2011.

RAMOS, O.; CASTRO, S.; LASKOWSKI, J.S., Copper-molybdenum ores flotation in sea water: floatability and frothability, *Minerals Engineering*, 53, p. 108-112, 2013.

RAS, C.; von BLOTTNITZ, H. A comparative life cycle assessment of process water treatment technologies at the Secunda industrial complex, South Africa. *Water South Africa*, 38, p. 549-554, 2011.

RIANI, J.C. Utilização de resinas de troca-iônica em efluentes de galvanoplastia. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo-SP, 121p., 2008.

RIANI, J.C.; LEÃO, V.A.; SILVA, C.A. Efeito estrutura da matriz na adsorção de cianocomplexos metálicos em resinas de poliestireno. *Revista da Escola de Minas*, v. 57(2), p. 115-120, 2004.

RINGQVIST, L.; HOLMGREN, A.; ÖBORN, I. Poorly humified peat as the adsorbent for metals in wastewater. *Water Research*, 36, p.2394-2404, 2002.

SAKAI, S. Resinas trocadoras de íons, soluções a favor do tratamento de água e efluentes. *Revista TAE (Tratamento de Água e Efluentes)*, out., 2012. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/4915-noticias>. Acesso em 21 jan. 2018.

SALSABIL, M.R.; PROROT, A.; CASELLAS, M.; DAGOT, C. Pré-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility. *Chemical Engineering Journal*, 148, p. 327-335, 2009.

SALUM, M.J.G. Por que a água é utilizada na mineração? Seminário de tecnologia para monitoramento de barragens de mineração. Brasília-DF, outubro, 2017.

SANCHEZ, M.E.; OTERO, M.; GÓMEZ, X.; MORÁN, A., Thermogravimetric kinetics of the combustion of biowastes. *Renewable Energy*, 34, p. 1622-1627, 2009.

SANTOS, L.D. Remoção de íons Zn²⁺ por adsorção em carvão ativado em batelada e processo contínuo. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre - RS, 73p., 2014.

SANTOS, H.F.; MANCUSO, P.C.S. A escassez e o reúso de água em âmbito mundial, Reúso de Água. Universidade de São Paulo/Faculdade de Saúde Pública: ABES 2003, p. 21-36, 2003.

SCHOLZ, M., XU, J. Performance comparison of experimental constructed wetlands with different filter media and macrophytes treating industrial wastewater contaminated with lead and copper. *Bioresource Technology*, 83(2), p. 71-79, 2002.

SCHOLZ, M. Performance predictions of mature experimental constructed wetlands which treat urban water receiving high loads of lead and copper. *Water Research*, 37(6), p. 1270-1277, 2003.

SIQUEIRA, P.F. Utilização de resina de troca iônica para o tratamento de licor de lixiviação contendo níquel e cobalto (adsorção). Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 94p., 2010.

SOBRAL, L.G.S.; DUTRA, A.J.B.; LEMOS, F.A.; SANTOS, F.H.S. O Processo eletroquímico como alternativa para o tratamento de efluentes cianídricos. *Revista Escola de Minas*, p. 267-272, 2002.

STREIT, K.F.; GEREVINI, G.G.; RODRIGUES, M.A.S.; FERREIRA, J.Z.; BERNARDES, A.M.; DE PINHO, M.N. Electrodialysis in an Integrated NF/ED process for water recovery in the leather industry. *Separation Science and Technology (Print)*, v. 48, p. 445-454, 2013.

THINES, R.K.; MUBARAK, N.M.; NIZAMUDDIN, S.; SAHU, J.N.; ABDULLAH, E.C.; GANESAN, P. Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 72, p. 116–133, 2017.

TRINDADE, R.B.E.; SOARES, P.S.M. Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas. *Série Tecnologia Ambiental*, 30, CETEM/MCT, 2004.

UN WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world. Paris, UNESCO, 122p., 2015.

XIE, J.Z.; CHANG, H.; KILBANE, J.J. Removal and Recovery of metal ions from wastewater using biosorbents and chemically modified biosorbents. *Bioresource Technology*, 57, p. 127-136, 1996.

WANG, X.S.; TANG, Y.P.; TAO, S.R. Kinetics, equilibrium and thermodynamic study on removal of Cr (VI) from aqueous solutions using low-cost adsorbent Alligator weed. *Chemical Engineering Journal*, 148, p. 217–225, 2009.

WANG, B.; PENG, Y. The effect of saline water on mineral flotation – a critical review. *Minerals Engineering*, v. 66-68, p. 13-24, 2014.

WANG, J.; WAN, Z. Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry. *Progress in Nuclear Energy*, v. 78, p. 47-55, 2015.

ZHANG, D.; KONG, H.; WU, D.; HE, S.; HU, Z.; HU, X. Remediation of chromite ore processing with sewage sludge. *Bioresource Technology*, 100, p. 2874-2877, 2009.