

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MECANISMOS DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE ROCHAS E MEDIDAS MITIGADORAS

R.M.G., Mendonça¹ P.S.M. Soares¹ E. van Huyssteen²

¹CETEM - Centro de Tecnologia Mineral - Av. Ipê, 900 - Cidade Universitária - 21941-590, Rio de Janeiro - R.J. -
Brasil rmendonca@cetem.gov.br

²CANMET - Canada Centre for Mineral and Energy Technology - 555 Booth St. - K1A0G1 Ottawa - Ontario -
Canada

RESUMO

O trabalho apresenta e discute de forma sucinta, mecanismos de geração de drenagem ácida e suas medidas mitigadoras no contexto da mineração. A exposição de rochas contendo minerais sulfetados ao ar e à água ocasiona a geração de drenagens ácidas. Os impactos causados por estas drenagens em águas superficiais e subterrâneas compreendem, entre outras, a redução do pH, elevação da quantidade de sólidos dissolvidos e aumento da concentração de sulfato e metais em solução. Estes impactos podem ser minimizados limitando-se a exposição dos materiais geradores de ácido ao intemperismo e/ou tratando-se os efluentes ácidos gerados. O uso de coberturas secas, disposição subaquática dos rejeitos, instalação de sistemas de drenagem/contenção e instalação de sistemas de tratamento ativo e passivo são algumas das soluções recomendadas para alcançar os resultados desejados. As medidas adotadas devem ser específicas para cada sítio e usualmente é necessário uma combinação de várias técnicas.

INTRODUÇÃO

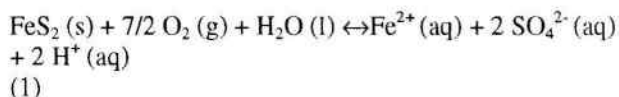
Alguns dos impactos ambientais mais importantes relacionados à atividade de mineração associam-se à disposição dos resíduos sólidos (estéril/rejeito) gerados durante as etapas de lavra/beneficiamento. Particularmente quando estes resíduos são potencialmente geradores de drenagens ácidas. Estéreis e rejeitos ricos em sulfetos de ferro oxidam-se em presença do ar e da água, desencadeando o processo de acidificação de drenagens que pode ocorrer tanto em minas abandonadas quanto em operação, contribuindo significativamente para a contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos (Yanful, 1990).

GERAÇÃO DE DRENAGENS ÁCIDAS

Processos de oxidação

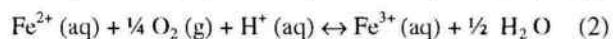
A geração das drenagens ácidas é causada pela exposição de rochas contendo minerais sulfetados (principalmente pirita e pirrotita) ao ar e a água, resultando na produção de ácido e elevadas concentrações de sulfato e metais dissolvidos.

A reação de oxidação da pirita pode ser representada pela equação (1).



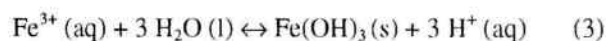
Como resultado desta reação Fe (II), sulfato e ions hidrogênio são liberados, aumentando a quantidade de sólidos totais dissolvidos e a acidez da água.

Em um ambiente de pH baixo (1,5 a 3,5) e com a presença de oxigênio dissolvido, pode ocorrer a oxidação do Fe (II) como representado pela equação (2),

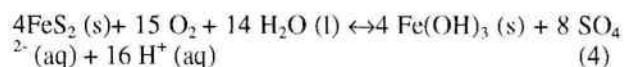


Esta reação tem seu equilíbrio significativamente deslocado no sentido dos produtos pela ação de bactérias ferro oxidantes usualmente presentes nas águas de drenagem.

Reações de hidrólise do Fe (III) gerado pela reação representada pela equação (2) são favorecidas para valores de pH pouco mais altos, ocasionando a reação de precipitação do hidróxido de ferro representada pela equação (3) que retira parte do Fe (III) disponível no sistema e também diminui o pH como a reação de oxidação da equação (1).

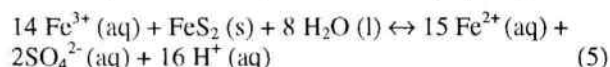


A combinação das equações (1), (2) e (3) pode ser representada pela equação (4)



Como se observa nesta equação, a cada mol de pirita que se oxida são gerados 2 moles de SO_4^{2-} e 4 moles de H^+ .

O íon férrico liberado (equação (4)), pode também oxidar a pirita, como representado na equação (5).



Como consequência desta reação é gerada acidez adicional e aumenta a concentração de íons ferrosos em solução. Estes íons serão por sua vez oxidados segundo a reação representada pela equação (2) que é potencializada pela presença de bactérias.

Desta forma, é possível notar que após a instalação do processo de oxidação e conseqüente acidificação, o mecanismo das reações se auto perpetua.

Influem também na oxidação de minerais sulfetados presentes em resíduos de mineração a granulometria e porosidade do material, a distribuição e tamanho dos poros e a densidade de população bacteriana. Pode-se dizer porém que os elementos essenciais para a geração de drenagens ácidas são a presença de sulfetos sua exposição à água e o oxigênio do ar.

Uma vez que oxigênio e água são essenciais no processo de geração de acidez, aspectos como a disponibilidade e mecanismos de transporte destes reagentes devem sempre ser levados em consideração na estratégia para o gerenciamento dos resíduos ricos em sulfetos. Alguns destes aspectos são:

Transporte de oxigênio

O oxigênio migra através de pilhas de materiais contendo sulfetos através de dois mecanismos principais de transporte: difusão e advecção.

a) Difusão

O transporte de um gás por difusão entre dois pontos ocorre quando existe um gradiente de concentração entre estes. Em uma pilha de resíduos (rejeitos/estéreis) este gradiente resulta da diferença da concentração de oxigênio nos poros do material entre dois pontos ou entre um ponto em seu interior e a atmosfera.

A disponibilidade de oxigênio nos poros do material é afetada pelo seu consumo nas reações biogeoquímicas de oxidação. Como estas reações se dão de forma diferente em locais diferentes da pilha, gradientes de concentração de oxigênio tenderão a se

estabelecer em seu interior, favorecendo mecanismos de difusão gasosa. Também devido ao fato de que as reações de oxidação consomem oxigênio, a concentração deste gás nos poros do resíduo tende a ser menor que na atmosfera, ocasionando um fluxo difusivo do exterior para o interior da pilha.

Os mecanismos difusivos em pilhas de resíduos são usualmente afetados pelo preenchimento dos poros por ar e/ou água. Em materiais saturados há um decréscimo no valor do coeficiente de difusão do oxigênio uma vez que os poros encontram-se bloqueados pelas moléculas de água e o coeficiente de difusão efetivo do oxigênio é altamente dependente do grau de saturação dos poros, decrescendo cerca de duas ordens de grandeza quando esta atinge 75% a 95% (Yanful, 1990).

b) Advecção

O transporte advectivo de um gás em pilhas de resíduos (rejeito/estéril) é provocado por gradientes de pressão.

Três são os mecanismos principais que ocasionam gradientes de pressão no interior de uma pilha de resíduos: alterações nas pressões atmosféricas, correntes de vento e efeitos termais (Yanful, 1990).

As alterações nas pressões atmosféricas tendem a gerar fluxos advectivos de oxigênio pouco significativos em pilhas de resíduos ao contrário das correntes de vento e dos efeitos termais.

Enquanto as correntes de vento fazem com que o oxigênio entre em pilhas de forma turbulenta, oxigenando o sistema, os efeitos termais surgem a partir do calor gerado pela reação exotérmica de oxidação dos sulfetos. O calor gerado pela reação tende a alterar a densidade dos gases, fazendo com que eles se movimentem. Os gases menos quentes da superfície se movem para a zona aquecida dentro do sistema, e os gases aquecidos se movem para fora.

Transporte de água

A disponibilidade de água como reagente para geração de drenagens ácidas associa-se essencialmente ao regime hídrico do local onde se localiza o depósito de resíduos. A troca de umidade com a atmosfera tem papel secundário na geração de drenagens ácidas quando comparada ao escoamento superficial e à percolação. Desta forma a distribuição de chuvas, os riscos de inundação e a permeabilidade dos resíduos à água são alguns dos principais aspectos a serem analisados quando do diagnóstico do potencial gerador.

ALGUMAS MEDIDAS MITIGADORAS DE DRENAGENS ÁCIDAS

Quando da avaliação dos impactos ambientais causados pela geração de drenagem ácida, dois aspectos devem ser particularmente destacados. Primeiramente o fato de que eles não são usualmente restritos à área minerada, podendo influenciar, através da contaminação dos cursos d'água superficiais e subterrâneos, áreas significativamente distantes do empreendimento. Além disto, as reações químicas envolvidas no processo são lentas o que implica que o fenômeno pode ocorrer durante anos, mesmo depois de esgotado o depósito mineral. Alia-se a esses, o fato de que a acidez e contaminação da água com metais dissolvidos inviabiliza seu uso para fins recreativos, agrícolas e de consumo (CETEM, 2000).

A recuperação das áreas impactadas envolve geralmente a aplicação de um conjunto de técnicas que tem como objetivo a intervenção na origem do problema através da limitação do contato da água e do oxigênio com os sulfetos, o tratamento das águas ácidas geradas ou uma combinação destas alternativas.

Algumas destas técnicas são:

- ✓ alagamento das áreas de deposição de resíduos ou elevação do nível d'água dentro delas - coberturas úmidas;
- ✓ coberturas secas de resíduos;
- ✓ sistemas de drenagens e contenção;
- ✓ selagem de minas subterrâneas inativas;
- ✓ sistemas de tratamento de efluentes ácidos;

a) Alagamento de áreas de deposição ou elevação do nível d'água dentro delas - coberturas úmidas

A deposição subaquosa de materiais geradores de acidez pode prevenir a oxidação. A deposição subaquosa é definida como a colocação de resíduos (rejeitos/estéreis) potencialmente geradores de ácido sob a água antes que eles se oxidem. Para este tipo de deposição é necessário um estudo do impacto geoquímico destes resíduos sobre a água, bem como o estudo da atividade biológica e a mobilização potencial destes contaminantes neste sistema (MEND/CANMET, 1994).

Esta opção somente é viável em locais onde o nível do lençol freático possa ser restabelecido ou elevado de forma a submergir os rejeitos geradores de acidez. A utilização de lagos naturais para a deposição não é

recomendável, mas o aproveitamento de cavas e antigas bacias de rejeitos devem ser avaliadas.

A utilização de antigas bacias de rejeitos pode ser interessante devido a existência de estruturas já construídas para a retenção de sólidos e de água. Sua aplicação pode tornar-se economicamente inviável quando a construção de barragens artificiais é requerida.

Esta alternativa tem sido utilizada com sucesso para minimizar a drenagem ácida em algumas minas da América do Norte.

Rejeitos já em processo de oxidação podem também ser depositados sob água como alternativa para redução e paralisação da geração de ácido. Neste caso é necessário um cuidadoso modelamento físico-químico das condições de deposição, oxidação e mobilização dos constituintes do resíduo sob água.

Materiais de baixa permeabilidade ou ainda não oxidados podem também ser usados para cobertura do material gerador de ácido antes de sua inundação, com o objetivo de dificultar ou impedir o acesso de oxigênio.

b) Coberturas secas de resíduos

As coberturas secas são projetadas para desviar ou retardar o fluxo de água e de oxigênio para o interior de pilhas ou depósitos de materiais geradores de drenagem ácida. São usuais para esta finalidade as argilas ou outros materiais de baixa permeabilidade disponíveis na área para aplicação sob a forma de coberturas de solo simples ou compostas (solos e geomembranas).

Quando estes materiais não estão disponíveis, é recomendável avaliar o uso de materiais alternativos tais como estéreis (sem sulfetos), restos de madeira, resíduos de material da indústria de papel e celulose etc. (MEND/CANMET, 1994). Uma criteriosa avaliação destas coberturas quanto a sua tendência a trincamento, expansão, bem como a criação de caminhos preferenciais de infiltração devido a penetração de raízes é parte importante de um projeto bem sucedido.

c) Sistemas de drenagens e contenção

Compreendem alternativas desenvolvidas com o propósito de desviar ou retirar a água rapidamente de uma, área evitando seu contato com o resíduo gerador de ácido.

Algumas destas alternativas são:

- ✓ perfuração e instalação de poços de bombeamento nos rejeitos/estéreis;

- ✓ desenvolvimento de drenos verticais e horizontais de materiais permeáveis e/ou neutralizantes para captação da água ácida;
- ✓ instalação de drenos de fundo e laterais para escoamento da água para fora do material gerador de acidez;
- ✓ canais e diques de desvio;
- ✓ canais e diques de coleta.
- ✓ lagoas de captação da água superficial (para evitar o contato com o estéril/rejeito);

d) Selagem de minas subterrâneas

A selagem de minas subterrâneas é realizada para evitar o transporte da água ácida para fora das galerias e garantir a segurança de pessoas e animais através da limitação de seu acesso a áreas desativadas (CETEM, 2000).

Além do fechamento da boca da mina subterrânea em instalações desativadas outras medidas podem ser tomadas para minimizar a geração de ácido em instalações em operação tais como a vedação trincas e fissuras nas paredes das galerias e a utilização de barreiras e cortinas de desvio para o isolamento de materiais geradores do contato com as águas.

e) Sistemas de tratamento de efluentes ácidos

Sistemas de tratamento de efluentes são geralmente empregados em associação com as alternativas de mitigação da geração de drenagens ácidas já comentados.

As alternativas mais comuns de tratamento envolvem a neutralização das drenagens e a conseqüente precipitação dos metais em solução para posterior descarte. Os agentes neutralizantes mais largamente usados são o calcário (calcítico e dolomítico), cal virgem ou hidratada e a soda cáustica. A principal desvantagem do método reside no fato de que a lama resultante da precipitação tem alto teor de metais e com o passar do tempo ela pode reagir se dissolvendo remobilizando os metais anteriormente precipitados.

Os denominados sistemas passivos são também empregados no tratamento de drenagens ácidas. São sistemas de tratamento passivo aqueles caracterizados pelo favorecimento de reações químicas e/ou bioquímicas naturais, que em ambiente controlado, auxiliam o tratamento da drenagem ácida. São classificados em:

e.1) sistemas bióticos

- ✓ áreas inundadas aeróbias - São caracterizadas por grandes superfícies e pequena lâmina d'água. A pequena profundidade faz com que a oxidação promova a precipitação de metais na forma de hidróxidos, reduzindo sua concentração na água. É recomendada quando o pH da drenagem é fracamente ácido;
- ✓ áreas inundadas anaeróbias - São caracterizadas por grandes superfícies com substrato orgânico recoberto com uma lâmina d'água de profundidade superior à das áreas aeróbias. O substrato redutor favorece os processos químicos e microbiológicos que geram alcalinidade e elevam o pH; removem o oxigênio do sistema; reduzem a quantidade de sulfato; aumentam a dissolução do carbonato de cálcio; e evitam que os metais se oxidem. A presença de vegetação ajuda a estabilizar o substrato e fornece matéria orgânica adicional, perpetuando as reações de neutralização.

e.2) sistemas abióticos

Estes sistemas dispensam manutenção freqüente, e são geralmente mais simples que os sistemas bióticos. Neles a neutralização é promovida através da passagem dos efluentes líquidos através de dispositivos estacionários, (poços, canais, drenos) onde são colocados os agentes neutralizantes.

COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

No Brasil, projetos minerais que contemplem a previsão e mitigação dos problemas ambientais ocasionados pela drenagem ácida de rochas não são ainda comuns. Desta forma, quando minerais sulfetados estão presentes, o gerenciamento inadequado dos resíduos sólidos e líquidos da mina podem afetar a qualidade das águas refletindo-se muitas vezes na deterioração da qualidade de corpos hídricos superficiais e/ou subterrâneos a nível de micro bacia/bacia hidrográfica.

Práticas adequadas de gestão de águas e resíduos sólidos em todas as fases do empreendimento mineiro desde o projeto, através do ciclo de vida da mina e na etapa de desativação podem minimizar significativamente os problemas de geração de drenagens ácidas e reduzir substancialmente os custos associados ao tratamento de efluentes fora das especificações para descarte.

Para a escolha e acompanhamento do desempenho das soluções adotadas é requerido conhecimento específico sobre a área alvo que inclui sua topografia, geologia, pedologia, características físico-químicas dos sólidos e líquidos manuseados, balanço hídrico, hidrogeologia entre outros (CETEM, 2000).

Não existem projetos de engenharia para a mitigação dos impactos causados pelas drenagens ácidas, aplicáveis a qualquer caso. As soluções são sempre particulares para cada área e é normalmente necessário o emprego de uma combinação de alternativas entre as comentadas anteriormente, além do desenvolvimento de outras, particulares para o caso em questão.

REFERÊNCIAS

- Córdoba Elcy, M. T. Minas de carbon abandonadas: Una fuente latente de contaminación ambiental en Colombia. In: Cierre de Minas: experiencias en iberoamerica, Rio de Janeiro: CYTED/IMAAC/UNIDO (2000).
- Evaluation of alternate dry covers for the inhibition of acid mine drainage from tailings. Canada, MEND/CANMET (1994).
- Projeto Conceitual de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense. Relatório Técnico CETEM (2000).
- Revised Research Plan. Canada, MEND/CANMET (1994).
- Review of Canadian and United States Legislation relevant to decommissioning acid mine drainage sites. Canada, MEND/CANMET (1993).
- Yanful, E.K. An investigation of engineered soil cover technology for health steele waste piles. Canada MEND/CANMET (1990).