

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Drenagem Ácida

Aspectos Ambientais: Uma revisão

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Celso Pansera

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

Emília Maria Silva Ribeiro Curi

Secretária-Executiva

Adalberto Fazzio

Subsecretário de Coordenação das Unidades de Pesquisa

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processos Minerais

Durval Costa Reis

Coordenador de Administração

Cosme Antonio de Moraes Regly

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN - **XXXXXXX**

STA - 87

Drenagem Ácida Aspectos Ambientais: Uma revisão

Vicente Paulo de Souza

DSc. Engenharia Mineral – EPUSP/USP, Pesquisador Titular
do CETEM/MCTI.

CETEM/MCTI

2015

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Luis Gonzaga Santos Sobral

Editor

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Subeditora

CONSELHO EDITORIAL

Marisa Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos Augusto da Costa (UERJ), Fátima Maria Zanon Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

João Henrique de Castro Rocha

Programação Visual

Valéria Cristina de Souza

Editoração Eletrônica

Andrezza Milheiro

Revisão

Souza, Vicente Paulo de

Drenagem ácida – Aspectos ambientais: uma revisão/

Vicente Paulo de Souza. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015.

48p. (Série Tecnologia Ambiental, 87)

1. Mineração sustentável. 2. Drenagens. 3. Meio ambiente. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Souza, Vicente Paulo de. III. Título. IVI. Série.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Rejeitos e Estéreis	12
1.2 Composição Mineralógica dos Rejeitos	13
2 DRENAGEM ÁCIDA DE MINA DAM	14
2.1 Geração de Ácido e Lixiviação de Metais	14
2.2 Idade dos Rejeitos	25
2.3 Metais e Substâncias Importantes	26
3 GERENCIAMENTO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA	28
3.1 Uso de Coberturas	28
3.2 Efeitos Ambientais e Ecológicos da DAM	35
3.3 Estudos Biogeoquímicos	38
4 NEUTRALIZAÇÃO E REMOÇÃO DE METAIS	39
5 EFEITOS AMBIENTAIS E ECOLÓGICOS DA DAM	41
5.1 Acidentes acontecem - DAM pode ser controlada?	41
5.2 Acidez e Toxicidade Causadas por Metais	41
5.3 Sedimentação	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

RESUMO

Os minerais são essenciais para o bem-estar da humanidade. Porém, a extração desses minerais sempre está associada tanto com oportunidades quanto com desafios. Aos interesses históricos relacionados às condições de trabalho, bem como a competitividade no setor da mineração, foi adicionado um número crescente de outros interesses. Atualmente, uma meta abrangente é encontrar meios pelos quais o setor mineiro possa promover seu desenvolvimento sustentável.

Um dos efeitos nocivos que a mineração causa ao meio ambiente inclui a liberação de muitos contaminantes químicos em cursos d'água que podem causar dano ambiental e ameaçar a saúde e segurança de comunidades próximas após o fechamento da mina. Esta poluição é tão persistente que, em muitos exemplos, as condições iniciais daqueles locais contaminados podem nunca mais serem completamente restabelecidas devido à ausência de soluções disponíveis.

Projetos integrados para a recuperação ambiental de áreas mineradas vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo por diversas empresas mineradoras líderes em seus segmentos de mercado. Internacionalmente, iniciativas dessa natureza iniciaram-se, principalmente, na década de 60. Os primeiros trabalhos de recuperação no Brasil ocorreram em meados da década de 70. Desde então, e até o final da década de 80, a recuperação ambiental de áreas mineradas no País consistiu, essencialmente, de ações de recomposição topográfica e reconstituição da cobertura vegetal. A partir da década de 90, os projetos passaram a incorporar outras ações, afetando os métodos de lavra e beneficiamento, a gestão de águas e sólidos e as práticas de monitoramento do meio ambiente. Além disso, esses projetos incorporaram os interesses das

empresas mineradoras e imposições das agências ambientais em consonância com as demandas da comunidade vizinha ao empreendimento.

O *International Network for Acid Prevention* (INAP) trabalha, cooperativamente, com seus associados focalizando o assunto **das Drenagens Ácidas ARD (acid rock drainage)**. Atualmente os membros **do** INAP são as seguintes empresas: Anglo American, Antofagasta Minerals, Barrick Gold, Freeport McMoRan, Kinross, Newcrest Mining Limited, Newmont Mining Corporation, Rio Tinto e Vale. Excessão feita **às** empresas Barrick and Kinross, todas fornecem informações detalhadas em seus **Websites** sobre seus relacionamentos com o desenvolvimento sustentável. Por sua vez, as empresas Barrick e Kinross fornecem informações sobre seus padrões ambientais. O INAP desenvolveu o GARD Guide 2014 **informando como** é planejado um estado-**da**-arte com o resumo das melhores práticas e tecnologias voltadas para resolução que ajudem ao pessoal da **mineração** no enfoque dos assuntos relacionados à oxidação dos sulfetos relativos ao desenvolvimento sustentável: “O benefício econômico derivado da mineração é uma contribuição essencial para o desenvolvimento sustentável, mas as conseqüências ambientais e sociais podem compensar este benefício a menos que não administradas adequadamente.

Palavras-chave

Mineração sustentável, drenagens, água, acidez, meio ambiente.

ABSTRACT

Minerals are essential for human welfare; however, their extraction is associated with both opportunities and challenges. Historical concerns around work conditions and the competitiveness of the mining sector have been complemented by a growing number of other issues. Today, an overarching goal is to find ways by which the mining sector can promote sustainable development. The effect of mining on the environment includes the release of many chemical contaminants into water **bodies**, which can cause environmental damage and threaten the health and safety of nearby communities long after mine closure. This pollution is so persistent that, in the absence of available remedies, in many instances the contaminated sites may never be completely restored. Integrated projects for environmental recovery of mined areas have been developed all over the world by several **companies'** leaders in their market segments. Internationally, initiatives of that nature began mainly in the decade of 60. The first recovery works in Brazil happened in the middle of 70 decade. Ever since and until the end of the decade of 80, the environmental recovery of areas mined at the Country consisted, essentially, of topographical actions and rebuilding of the vegetable covering. Starting from the decade of 90, the projects **started** to incorporate other actions, affecting the plowing methods and improvement, the administration of waters and solids and the monitoring practices of the environment. Besides, those projects incorporate the interests of the companies and impositions of the environmental agencies in consonance with the demands of the neighboring **communities** to the enterprise. Formation of acid rock drainage (ARD) in **sulphide-bearing** mine **wastes** (waste rock and tailings) is the major potential long-term environmental effect of mining, and can last for hundreds or even thousands of years in a waste deposit. The International Network for Acid Prevention (INAP)

works collaboratively to address the ARD issue. INAP members presently are: Anglo American, Antofagasta Minerals, Barrick Gold, Freeport McMoRan, Kinross, Newcrest Mining Limited, Newmont Mining Corporation, Rio Tinto and Vale. All of these, except Barrick and Kinross, provide detailed information on their websites about how they relate to sustainable development. Barrick and Kinross, instead, give information about their environmental standards. INAP has developed the GARD Guide (GARD Guide, 2014), which is intended as a **state-of-the-art** summary of the best practices and technology to assist mine operators and regulators to address issues related to sulphide **minerals** oxidation. Regarding sustainable development, the GARD Guide states: "The economic benefit derived from mining is an essential contributor to sustainable development but the environmental and social consequences can offset this benefit unless managed appropriately.

Keywords

Keywords: mine, waste, environmental, acid rock, mining, pollution, tailings.

1 | INTRODUÇÃO

A instalação de um empreendimento mineral usualmente proporciona à comunidade localizada em sua área de influência o aumento da oferta de emprego e renda, da disponibilidade de bens e serviços, da arrecadação de impostos e a melhoria da qualidade de vida. Em contrapartida pode, também, significar alterações indesejáveis na paisagem e nas condições ambientais.

A superação da contradição representada pelos benefícios e custos ambientais associados à instalação de um empreendimento mineral é um dos desafios mais importantes a serem solucionados no início do século XXI. A incorporação dos princípios do desenvolvimento sustentável ao projeto, instalação, operação e desativação destes empreendimentos certamente faz parte da solução. Dentre estes princípios, devem ser privilegiados métodos de produção mais limpa, de minimização do consumo de materiais e energia e geração de efluentes, além da maximização de benefícios sociais. Alguns dos principais aspectos e impactos ambientais, decorrentes das atividades de mineração, deverão ser gerenciados no processo de incorporação de métodos de produção mais limpa. Entre estes, o impacto associado à contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos, pelas denominadas drenagens ácidas de mina (DAM), é provavelmente um dos mais significativos. A ameaça de DAM (Drenagem Ácida de Mina) para o ambiente não será resolvida a curto e médio prazo, e é provável que ainda persista durante séculos. Também não será resolvido por uma única intervenção, mas será necessária a implementação integrada de uma gama de medidas.

Os impactos ambientais causados pela mineração existem desde o início desse tipo de atividade. Sem dúvida, mesmo nos primórdios - durante as Idades do Ferro e do Bronze, a mineração já causava poluição, muito embora em escala reduzida. Durante a Idade Média, a poluição ambiental correlacionada com a mineração na Europa foi registrada por AGRICOLA (1556), sendo que da mesma forma que a escala de produção foi aumentando, o mesmo ocorreu com o grau de poluição.(Ritcey, 1989)

Os problemas ambientais gerados pelas drenagens ácidas das atividades de mineração (mina a céu aberto ou subterrânea, bacia de rejeitos, pilhas do estéril e estocagem do minério), têm-se constituído, nos últimos anos, em uma questão bastante séria e vêm requerendo a união de esforços de empreendedores, centros de pesquisas, universidades, governos, população adjacente e entidades ambientalistas em todo mundo - uma vez que esse e outros problemas ambientais não haviam merecido a devida atenção até a segunda metade do século (Ritcey, 1989) - no sentido de se administrar o problema e encontrar soluções que venham minimizar os danos causados ao meio ambiente.

Nesse particular, a disposição sem critérios de rejeitos e estéreis, resultantes das atividades da mineração, apresenta uma significativa contribuição para o problema, devido ao intemperismo natural que ocorre com esses materiais. Atualmente, para que sejam concedidas licenças para novas instalações ou mesmo permissão para expansão das unidades existentes, tornou-se um pré-requisito a demonstração da magnitude e da importância dos impactos que os resíduos sólidos poderão causar ao meio ambiente (Levinson 1980). As minerações que operam com sulfetos minerais, ou quando

estes se encontram disseminados na rocha encaixante, são os casos que merecem atenção especial, pois, sob condições apropriadas, os sulfetos podem reagir com o oxigênio e a água, na presença de micro-organismos endógenos, produzindo ácido sulfúrico, bem como a liberação de espécies iônicas em solução. A reação de oxidação é natural, e envolve fatores químicos e biológicos. O ácido sulfúrico formado cria, geralmente, condições hostis ao meio ambiente, inibindo o estabelecimento e crescimento da vegetação de cobertura, resultando na erosão e acidificação do solo e aquíferos adjacentes (Costa,Souza).

Durante as últimas décadas, uma considerável quantidade de pesquisas acadêmicas têm sido realizadas no âmbito da mineração, relacionadas com questões ambientais. Essas iniciativas têm sido realizadas dentro de uma grande rede de pesquisa como o realizado pelo Canada - MEND programme (Mine Environment Neutral Drainage) (MEND, 2014) bem como dentro de um extenso plano de pesquisa através de um considerável número de estudos isolados). Somado a isso, pesquisas envolvendo aspectos ambientais na mineração também vem sendo realizados por outras instituições como o US Geological Survey (USGS, 2014a). Em uma pesquisa prévia relacionada com os efeitos biogeoquímicos e ecológicos das atividades mineiras, tem sido estudada separadamente em uma grande extensão.

Somente um número limitado de estudos tem sido direcionado para a síntese de geoquímica inorgânica e efeitos biológicos/ecológicos nos sistemas receptores dos efluentes da mineração.

1.1 | Rejeitos e Estéreis

Um dos problemas mais sérios para a indústria de mineração é a produção dos estéreis e rejeitos que anualmente totalizam 18 bilhões de metros cúbicos. Esse volume é maior do que qualquer outro tipo de rejeito sólido que foi gerado por qualquer outra indústria (Aswathanaryana 2003) e, ainda, é esperado que este montante dobre nos próximos 20-30 anos devido ao fato de que os minérios que estão sendo trabalhados apresentam teores progressivamente mais baixos (ASWATHANARYANA 2003). Calcula-se que de todo o material escavado nas operações de mineração, mais de 70% seja estéril. A Mineração a céu aberto é o método que gera a maior quantidade de estéreis e, no início do século 21, esse método (mineração a céu aberto) contribuiu com 80% da produção global com até 99% de todo estéril gerado na mineração (Younger, Banwart & Hedin 2002). O estéril da mineração pode ser classificado como estéril ou espólio e como rejeito, também conhecido como “**finings** Waste rock”. (que termo é esse?). A diferença fundamental está no tamanho das partículas. Estéril apresenta tamanho de grãos entre 1mm - 50mm; enquanto os rejeitos podem ser caracterizados como apresentando grãos finos (< 1mm) (YOUNGER, BANWART & HEDIN 2002). Além disso os estéreis da mineração normalmente são secos enquanto os rejeitos são depositados em bacias de decantação em forma de polpa. (YOUNGER, BANWART & HEDIN 2002).

Quando os estéreis não são usados como “back-fill” ou utilizados como “bulk-fill” em projetos de construção, são estocados em pilhas de estéreis. A prática mais comum é a

re-vegetação. Mas até há bem pouco tempo, muito pouco havia sido feito com relação às drenagens no sentido de minimizar a geração de lixívias (BANWART & HEDIN 2002).

Os rejeitos eram empilhados próximos aos cursos d'água até o início do século 20 quando descobriu-se que esse não era um comportamento sustentável. A razão original por abandonar este método de administrar os rejeitos foi que os canais para que a água pudesse transportar os produtos ficavam entupidos.

1.2 | Composição Mineralógica dos Rejeitos

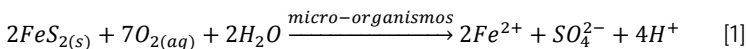
A composição mineralógica dos rejeitos está diretamente ligada à qualidade do efluente. As reações entre minerais dependem da composição mineralógica do rejeito e das propriedades químicas da água (pH, oxigênio dissolvido etc.) (Hoglund & Herbert eds. 2004). Quando sulfetos entram em contato com água, na presença de micro-organismos naturais, são oxidados e geram ácido sulfúrico abaixando o pH da água. Este fenômeno é denominado Drenagem Ácida de Mina, DMA (AKCIL & KOLDAS 2006). Os óxidos apresentam pH neutro enquanto os carbonatos apresentam uma capacidade de tamponamento (HOGLUND & HERBERT EDS, 2004) e constituem-se nos minerais mais eficientes para a neutralização da acidez formada pelo intemperismo dos sulfetos (ENVIRO MILJOTEKNIK AB, 2006). Os silicatos são degradados com o decréscimo do pH. Atuam como tampão e consomem íons hidrogênio quando o pH é baixo e podem, nesse caso, atuar em sentido oposto a uma diminuição adicional de pH (HOGLUND & HERBERT EDS. 2004).

2 | DRENAGEM ÁCIDA DE MINA (DAM)

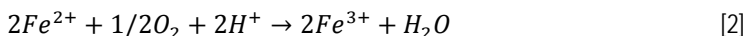
2.1. | Geração de Ácido e Lixiviação de Metais

A geração de ácido e dissolução de metais são os primeiros problemas associados com a poluição oriunda das atividades de mineração.

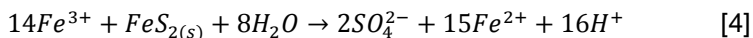
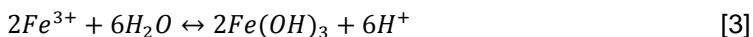
A química destes processos é bastante semelhante, mas ao mesmo tempo torna-se complicada uma vez que a geoquímica e as características físicas podem variar grandemente de local para local. Estas variáveis não serão aqui analisadas bem como seus efeitos na química do processo, será abordada uma avaliação geral mais comum observada nas minerações de carvão e pilhas de estéril envolvendo as implicações ambientais. A pirita (FeS_2) é a responsável pelo início da geração de ácido e dissolução dos metais tanto nos rejeitos do carvão como nos estéreis piritosos de outros minérios. Quando a pirita fica exposta ao oxigênio e água ela se oxida resultando na liberação dos íons hidrogênio – acidez, íons sulfatos e cátions de metais solúveis, como mostrado na equação (1). Esse processo de oxidação ocorre na rocha sã; porém, a uma baixa taxa e a água é capaz de tamponar o ácido gerado. O processamento aumenta e expõe a área superficial desses sulfetos minerais permitindo um excesso de geração de ácido além da capacidade natural de tamponamento da água.



Uma posterior oxidação do Fe^{2+} (ferro ferroso) a Fe^{3+} (ferro férrico) ocorre quando suficiente oxigênio é dissolvido na água ou quando a água fica exposta o suficiente ao oxigênio atmosférico.



Alguma acidez é consumida neste processo, o ferro férrico pode se hidrolisar, com formação de um precipitado de $Fe(OH)_3$, de coloração escura amarronzada, ou pode reagir diretamente com a pirita para produzir mais ferro ferroso e acidez.



Quando o ferro ferroso é produzido como resultado da equação 4 e suficiente oxigênio dissolvido está presente o ciclo das equações 2 e 3 perpetua-se (YOUNGER, *et al.*, 2002). Sem o oxigênio dissolvido, a equação 4 continua por completo e a água apresentará elevados níveis de ferro ferroso (YOUNGER, *et al.*, 2002).

Uma vez que as águas são suficientemente ácidas, a bactéria acidofílica – bactéria que prolifera em baixo pH – é capaz de estabelecer por si própria micro-organismos que podem desempenhar um significativo papel na aceleração das reações químicas que se processam no ambiente de drenagem de mineração. Comumente, a bactéria ***Acidithiobacillus Ferroxidans***, é a protagonista nesses casos. Essa bactéria catalisa a oxidação do ferro ferroso, e mais adiante perpetuando-se nas equações 3 e 4. Um outro micro-organismo pertencente ao reino ***Archae***, denominada

Ferroplasma Acidarmanus foi recentemente descoberta por também representar um significativo papel na produção de acidez nas águas de mina (Lauzon, 2000).



Fotos do autor - 2006

Figura 1. Drenagem Ácida - Argo Mine & Drainage Tunnel – Denver / Colorado



Fotos do autor – 2006.

Figura 2. Argo Mine & Drainage Tunnel – Denver / Colorado.

Embora não esteja mais em atividade, o Túnel da Argo continuou escoando água ácida das minas, e foi reconhecido como a principal fonte contínua de metais dissolvidos em Clear Creek. Em maio de 1980, uma onda de água fluíu da mina e transformou por uma boa distância a água a jusante de Clear Creek para uma cor alaranjada. O grande aumento temporário do fluxo da drenagem foi atribuído a um súbito colapso no teto da mina dentro do túnel que represava um grande volume de água. A Agência de Proteção Ambiental (The US Environmental Protection Agency) relacionou o túnel como parte do “Central City/Clear Creek federal Superfund site” (Superfundo federal, da cidade de Clear Creek) e construiu um sistema de tratamento na boca do túnel para neutralizar e remover os metais pesados de 700-US gallon (2,600 L) por minuto de drenagem ácida que antes escoava para a localidade de Clear Creek.^[6] O sistema de tratamento começou a operar em 1998.^[7] A estação de tratamento das drenagens localiza-se a oeste da antiga mineração.

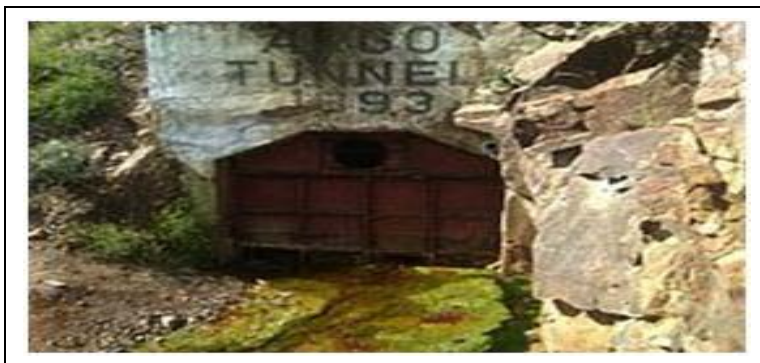
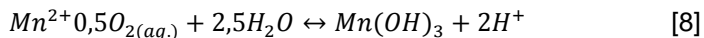
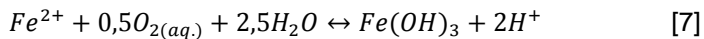
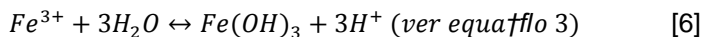
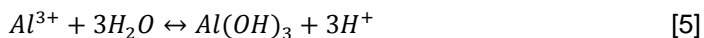


Figura 3. Algas no fluxo das drenagens do Argo Tunnel da Argo Mine / Denver Colorado.



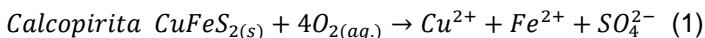
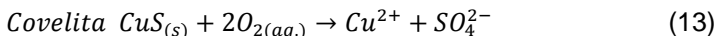
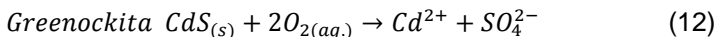
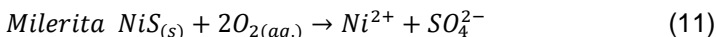
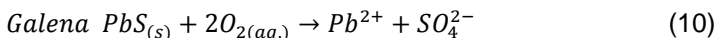
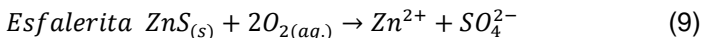
Figura 4. A estação de tratamento da Argo Tunnel remove metais e acidez antes da descarga do tunel fluir para Clear Creek. (Acesso Internet Nov.- 2015).

Embora não sendo uma fonte principal de acidez, a geração de íons de hidrogênio, quando certos metais formam precipitados , devem ser levado em conta ao considerar opções de tratamento.



Outros metais, comumente encontrados em drenagens ácidas, existem porque estão presentes nos outros minerais tal qual a pirita. Por exemplo, existe uma variedade de outros sulfetos minerais que podem liberar íons metálicos em solução, mas

não geram acidez. (Younger *et al.*, 2002) as razões para isso não estão muito claras:



De uma maneira geral o principal foco de uma pesquisa geoquímica sobre estereis de mineração tem sido sobre Drenagem Ácida de Mina (DAM) com particular ênfase na prevenção e medidas mitigadoras. Essa pesquisa tem sido publicada em livros (Lottermoser, 2003) bem como através de vários artigos de programas de pesquisas tais como Passive In-Situ Remediation of Acid Mine/Industrial Drainage (PIRAMID), Mitigation of the Environmental Impact from Mining Waste (MiMi), and Mine Environment Neutral Drainage (MEND) (PIRAMID, 2003; Höglund and Herbert, 2004; MEND, 2014). A rede internacional para prevenção da acidez (INAP) com o suporte da Aliança Global patrocinou o desenvolvimento do Global Acid Rock Drainage (GARD Guide, 2014). Esse documento além de concordar com a predição, prevenção e manuseio da drenagem produzida a partir da oxidação dos sulfetos, também enfoca o problema dos metais lixiviados devido a oxidação dos sulfetos

O GARD é planejado como um resumo do estado da arte das melhores práticas e tecnologias para auxiliar a todos que trabalham na mineração - operadores, escavadores e reguladores para se orientarem com relação aos assuntos relacionados com a oxidação dos sulfetos.

Os problemas a serem enfrentados por todos aqueles envolvidos nas questões relacionadas à reintegração, recuperação, reabilitação ou proteção do meio ambiente, deparam-se com situações bem distintas e às vezes com alto grau de complexidade. Isto se deve ao fato de que em determinados locais, a atividade mineira vem ou foi exercida por um longo período de tempo, sem que nenhuma providência fosse tomada ao longo desses anos. Embora cada local tenha gerado problemas distintos, a solução a ser encontrada tem que ser a mesma. Apesar das diversidades e complexidades dos problemas, existem alguns pontos em comum que permitem uma abordagem genérica no que diz respeito às fontes dos impactos ambientais.(1).

Especificamente, o problema das drenagens ácidas proveniente de cavas das minas/galerias subterrâneas, pilhas de estéreis ou de estoque, bacias de decantação ou rejeitos, são, em última instância, causados pelo fenômeno do intemperismo natural ao qual esses corpos ficam submetidos ao longo dos anos. Como resultado, em todos os locais, as medidas mitigadoras e de reabilitação são bastante dispendiosas para as indústrias de mineração girando em torno de milhões de dólares anuais.(2)

Segundo REICH (1950); OLLIER (1969); ROSE *et al.* (1979) *apud* RITCEY (1989)(3), o intemperismo pode ser definido como sendo "a destruição e alteração de materiais localizados na superfície da Terra, formando produtos que estão mais

proximamente em equilíbrio com a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera". O fenômeno ocorre de três maneiras: físico, químico e biológico. No processo de intemperismo físico, ocorre a desintegração ou destruição da rocha sem alterações em suas propriedades química e mineralógica. Tão logo este fenômeno tem início, novas superfícies vão se formando, propiciando e facilitando a decomposição química. Quanto à atividade biológica, esta pode contribuir para ambos os processos anteriormente mencionados, sendo que todos os fenômenos ocorrem simultaneamente. O grau e a intensidade do intemperismo sobre um corpo mineral dependem de uma série de importantes fatores tais como:

- composição mineralógica - associações com os minerais de ganga, processo de lixiviação, tamanho de partícula, tipo e natureza do sulfeto mineral; para o caso de rejeitos de processo ainda entram os fatores natureza química da polpa, pH e Eh;
- influências hidrogeológica e geológica - método de disposição do material, quantidade de água no interior e no exterior, O₂ ou outros gases dissolvidos; porosidade e permeabilidade, processos geoquímicos de sorção, desorção, precipitação e redissolução, interação química e biogeoquímica, concentração do eletrólito e formação de sais;
- reações de oxidação envolvidas na conversão dos sulfetos para ácido sulfúrico, seja por oxidação química ou bacteriológica;
- desempenho do tipo de bactéria presente, se ferro-oxidante ou sulfato-redutora, população dos micro-organismos; e

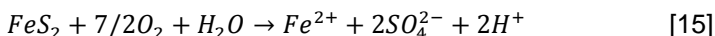
- migração das espécies dissolvidas através do corpo da pilha, que é regulada pela disponibilidade de água bem como pelo fluxo.

No passado, quando ainda não havia legislação específica, e muito menos a preocupação ou cuidados com o meio ambiente, os rejeitos e estéreis eram dispostos sem levar em consideração os graves efeitos impactantes que causariam. Por essas razões, durante muitos séculos acumularam-se milhões de toneladas de rejeitos e estéreis que foram dispostos indevidamente em diversos locais pelo mundo. Como exemplo da magnitude dessas disposições, nos últimos 25 anos, somente os rejeitos oriundos da mineração de urânio são estimados em 230 milhões de toneladas nos Estados Unidos; 140 milhões de toneladas no Canadá; 1.300 milhões de toneladas na África do Sul; 17 milhões de toneladas na Austrália e 70 milhões de toneladas em outros países(2). Em função deste quadro e devido à elevação desses números com o decorrer dos anos, no início da década de 80, justamente esses países passaram a reformular os conceitos e promoveram revisões em suas legislações, introduzindo rigorosas medidas preventivas, corretivas e de controles no que diz respeito, principalmente, ao problema das drenagens ácidas (3). Devido aos problemas ambientais hoje vivenciados por negligência no passado, para que seja permitida uma nova instalação ou mesmo expansão de um empreendimento de mineração, existe a necessidade de comprovar se os estéreis ou os rejeitos causarão ou não impactos ambientais e, em caso positivo, qual a intensidade e magnitude desses impactos. A partir dessas considerações, providências tanto com relação aos estéreis quanto aos rejeitos poderão previamente serem tomadas no que diz respeito ao manuseio e gerenciamento

durante a implantação e operação da mina, bem como medidas de controle visando a recuperação das áreas(2). Os metais pesados tais como chumbo, mercúrio, cobre, urânio e cádmio, dentre outros, nocivos às diversas formas de vida, são suscetíveis à lixiviação natural quando o rejeito do processo de beneficiamento e estéreis da mineração são descarregados e expostos à ação natural do intemperismo. As soluções oriundas desse processo usualmente apresentam um pH na faixa de 3,5 a 4,0 ou menos, e conseqüentemente são responsáveis pela contaminação das águas dos lagos e bacias hidrográficas. Tanto as águas de superfície quanto as subterrâneas são perturbadas pela lixívia ácida natural dos sulfetos minerais, que às vezes causa danos irreversíveis ao ecossistema(4). A migração dos metais pesados contidos nos estéreis e rejeitos que geram drenagens ácidas é uma séria preocupação em todos os locais que existe esse tipo de problema.

Existe uma classe de minérios portadores de minerais economicamente valiosos e quando expostos às intempéries mantém sua estabilidade como nas condições geológicas nas quais foram encontrados. Quando eles são escavados e expostos às condições atmosféricas, tornam-se menos estáveis quimicamente. Os sulfetos em presença do oxigênio atmosférico, de micro-organismos naturais e da água da chuva, reagem espontaneamente. A liberação desses contaminantes a partir desses minerais e dos estéreis contendo sulfetos minerais para os ciclos hidrogeológicos, através do intemperismo químico, torna potencialmente e tóxicos a mobilidade dos solutos. Íons metálicos e acidez são liberados devido a oxidação de diferentes espécies de sulfetos minerais (YOUNGER, BANWART & HEDIN 2002).

A pirita (FeS_2) é um dos sulfetos mais comuns que existem e é bem ilustrativo para servir como exemplo da oxidação dos sulfetos quando expostos ao ar e a água da chuva (AKCIL & KOLDAS, 2006).



O oxigênio reage com o sulfeto gerando sulfato ferroso solúvel e íons hidrogênio. Se o ácido sulfúrico resultante não reagir com algum mineral neutralizante como a calcita, ocorrerá um decréscimo no pH, enquanto o sólido total dissolvido aumentará. O Ferro ferroso pode ser oxidado a Fe férrico que é um oxidante enérgico. O íon férrico poderá oxidar o enxofre e sulfeto S^{2-} para sulfato SO_4^{2-} a partir dos sulfetos minerais e será reduzido outra vez a íon ferroso. Para que essas reações ocorram de forma eficiente, o pH deve estar baixo de 2, em caso contrário o íon férrico não permanecerá solúvel mas sim precipitado como oxyhidróxido férrico.

As drenagens ácidas causam os seguintes efeitos ao meio ambiente:

- Severas ameaças à saúde para as espécies aquáticas, ao hábitat nativo e a vida das plantas.
- Poluição das águas subterrâneas e de superfície.
- Deterioração da qualidade do solo.
- Liberação de metais pesados.
- Lençol subterrâneo e água de superfície .
- Empobrecimento da qualidade do solo.
- Liberação de metais pesados contidos no solo.

Mesmo se os sulfetos minerais constituírem-se em uma pequena fração do minério principal podem criar severas ameaças à saúde das espécies aquáticas, ao hábitat nativo e às vidas das plantas, que pode perdurar por décadas ou mesmo séculos após o fechamento da mina (YOUNGER, BANWART & HEDIN, 2002).

Diversos fatores determinam a intensidade da geração das águas ácidas em uma mineração. Esses fatores podem ser o tipo e teor do sulfeto mineral encontrado no estéril ou rejeito e tipo da pilha, disponibilidade de oxigênio, hidrogeologia do local, pH da água do sistema e finalmente a presença (ou ausência) de bactéria do gênero *acidithiobacillus*. (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE, 2007)

2.2 | Idade dos Rejeitos

Um pré-requisito para que a reação (4) descrita no parágrafo anterior, na qual os íons férricos atuam como oxidante, causando a contínua acidificação é a presença do ferro nos rejeitos. Atualmente o minério é processado de forma a ficar praticamente livre do ferro. Infelizmente esse procedimento não era adotado no passado.

Embora os antigos rejeitos pudessem ter sido cobertos para os proteger do contato com oxigênio, quantidades significantes de ferro oxidado provavelmente estariam presentes na pilha. Se o pH decresce o ferro férrico pode reagir, oxidando ainda mais os sulfetos, com a diminuição do pH.

Por outro lado se o pH for mantido alto o íon férrico não causará qualquer tipo de problema uma vez que precipitará e absorverá diversos metais tóxicos da solução, decrescendo o movimento dos mesmos. (ALLARD & HERBERT, 2006).

2.3 | Metais e Substâncias Importantes

As conseqüências do ferro em rejeitos contendo sulfetos minerais têm sido brevemente mencionadas na literatura. Outros metais e substâncias que são importantes e merecem serem consideradas, em se tratando desse assunto, são os metais pesados e o urânio e seus derivados.

2.3.1 | Metais Pesados

Conforme descrito por YOUNG, MULLIGAN AND FUKUE (2007), os metais pesados mais comuns de serem encontrados no ambiente são resultados das atividades humanas (*i.e.*, mineração). Os mais notáveis e interessantes metais que ocorrem nos sulfetos e, como consequência, nas drenagens ácidas são: As, Cd, Cu, Pb e Zn (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE, 2007). O cobre não necessita maiores comentários, porém o restante será resumidamente analisado.

O arsênio é o mais comumente encontrado em minérios de ferro e na forma de sulfeto, sendo os mais comuns dentre outros a arsenopirita (FeAsS) e realgar (AsS).

O arsênio é altamente tóxico e em muitos países foi adotado o limite de 50 µg.l⁻¹ para a água de consumo humano. A ingestão de arsênio pode levar, por exemplo, à morte por hipertensão ou doenças da pele tais como ceratose e hiperpigmentação. (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE, 2007).

O Cádmiio pode ser encontrado como greenockita (CdS) otavita (CdCO_3) e está, freqüentemente, associado com zinco, chumbo e cobre nos sulfetos (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE, 2007).

O acúmulo do cádmio no fígado e nos rins, ingerido por via oral, pode causar danos irreparáveis aqueles órgãos. O valor limite para a água de uso corrente estipulado pela EPA é de 5pb (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE 2007).

O chumbo é encontrado na natureza nas formas de sulfeto (PbS – galena, anglesita PbSO_4 e carbonato (ceruzita PbCO_3) (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE, 2007).

O sistema nervoso central, rins e o sistema reprodutor pode ser afetado pela inalação e ingestão de chumbo.

O zinco é mais freqüentemente encontrado nas formas de compostos, em combinação com óxidos, sulfetos e carbonatos, das quais a forma de sulfeto. O zinco está freqüentemente associado com o cádmio (YOUNG, MULLIGAN & FUKUE, 2007).

3 | GERENCIAMENTO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINA

3.1 | Uso de Coberturas

Algumas estratégias são utilizadas para minimização da geração e a remediação da DAM. O principal processo responsável que influencia nas alterações químicas em um depósito de estéril piritoso é a entrada do oxigênio para o interior da pilha (Moreno & Neretnieks 2006). Diminuindo-se a oxidação causada pelo oxigênio, as potenciais cargas ambientais também serão diminuídas, bem como o solo e as camadas inferiores têm uma melhor chance de proteção neutralizando os efeitos dos receptores. Isto pode ser feito ou cobrindo-se o rejeito com argila “dry cover” ou com água “wet Cover”, que são as duas técnicas que evitam o contato do estéril piritoso com o ar. As duas técnicas são consideradas a melhor opção que se tem disponível. Com relação a qual dos dois é o método mais apropriado depende das características específicas do local (Hoglund & Herbert eds. 2004).

A cobertura do rejeito ou estéril piritoso inibe a penetração do fluxo de O_2 o que inibe o intemperismo dos sulfetos. No entanto, para que se obtenha êxito com o método em questão necessário se torna que o material a ser utilizado seja de boa qualidade devido à necessidade de se manter o balanço de água por um longo período de tempo.

A cobertura do material deverá ser capaz de manter uma alta saturação de água. Por outro lado, o tamanho das partículas do solo, bem como o grau de compactação são importantes fatores, não somente para a camada selante mas adicionalmente para prevenir a penetração de raízes na

cobertura criando macro poros, facilitando a entrada do O_2 por esses poros.

O principal processo responsável que influencia nas alterações químicas em um depósito de estéril piritoso é a entrada do oxigênio para o interior da pilha (MORENO & NERETNIEKS, 2006). Diminuindo-se a oxidação causada pelo oxigênio, as potenciais cargas ambientais também serão diminuídas, bem como o solo e as camadas inferiores têm uma melhor chance de proteção neutralizando os efeitos dos receptores. Isto pode ser feito ou cobrindo-se o rejeito com argila “dry cover” ou com água “wet Cover” que são as duas técnicas que evitam o contato do estéril piritoso com o ar. As duas técnicas são consideradas a melhor opção que se tem disponível. Com relação a qual dos dois é o método mais apropriado depende das características específicas do local (HOGLUND & HERBERT eds. 2004).

A cobertura deverá ser capaz de manter uma alta saturação de água. Por outro lado, o tamanho das partículas do solo, bem como o grau de compactação são importantes fatores, não somente para a camada selante mas adicionalmente para prevenir a penetração de raízes na cobertura criando macro poros, facilitando a entrada do O_2 por esses poros.

Finalmente, a cobertura seca também deve proteger contra a erosão causada pelas tempestades e derretimento da neve (HOGLUND & HERBERT eds. 2004) (HERBERT eds. 2004). A taxa de difusão do oxigênio nos rejeitos saturados é de aproximadamente 10000 vezes mais lenta do que no ar. A segunda técnica é a cobertura úmida, que também pode ser usada para evitar a penetração do O_2 .

Considerando que a água, o oxigênio e os sulfetos são os principais reagentes que devem estar simultaneamente em contato para a geração de drenagens ácidas de mina a partir de resíduos, uma estratégia eficiente para minimização da geração consiste em limitar este contato. Os métodos usuais empregados para este fim são:

- cobertura das áreas de disposição de resíduos com uma lâmina d'água através do alagamento das áreas de disposição. O método é conhecido como cobertura úmida (“wet cover”) ou disposição sub-aquática;
- cobertura dos resíduos reduzindo a penetração do oxigênio e da água em seu interior através do uso de materiais sólidos. O método é conhecido como cobertura seca (“dry cover”), cobertura de solo ou disposição sub-aérea.

3.1.1 | Coberturas Secas

As coberturas secas, ou coberturas de solo, é uma alternativa quando os aspectos climáticos, topográficos, hidrológicos, ambientais ou econômicos não indicam a inundação da área de disposição de resíduos como solução para mitigação da geração de drenagens ácidas. Coberturas secas têm sido aplicadas em larga escala na América do Norte e Austrália.



Figura 4. Cobertura seca em pilha de estéril em Leadville, CO. Foto de. Christine Costello, In: Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies. October 2003

Esses tipos de coberturas podem ser classificados quanto à sua finalidade, e:

A) Coberturas para controle da infiltração de oxigênio.

Para que uma cobertura de solo seja eficiente na redução do fluxo de oxigênio, ela deve ser mantida saturada ou próxima a saturação com água ($S > 90\%$). Isso ocorre pelo fato de que a difusão do oxigênio na água é significativamente menor que no ar. A condição de saturação implica que os vazios do solo estejam unicamente preenchidos com água, retardando a difusão do oxigênio. As características ideais para esse tipo de cobertura são:

- baixa permeabilidade e boa capacidade de retenção de água – solos de granulometria fina são os mais indicados para esse fim;

- escoamento superficial pequeno e lento – a ausência de declive aumenta a infiltração e diminui o escoamento superficial;
- minimização da transpiração – ausência de vegetação.

B) Coberturas para minimização do fluxo de água

O principal objetivo dessa cobertura é limitar a infiltração, reduzindo, assim, o volume de percolado que atravessa a zona oxidada do interior da pilha de resíduo podendo alcançar as águas subterrâneas. Projetada com este objetivo, a cobertura deve otimizar a evapotranspiração, o escoamento superficial e a capacidade de armazenamento de água. As características ideais desse tipo de cobertura são:

- baixa permeabilidade à água ($K = 10^{-4}$ a 10^{-6} cm/s);
- elevada capacidade de armazenamento de água: obtida com o uso de solo com grau de saturação residual elevado (solos siltsos são melhores que solos argilosos ou compactados);
- uso de camadas espessas (1 metro no mínimo);
- escoamento máximo – construção de declive;
- transpiração elevada. Esse tipo de cobertura é muito similar àquelas utilizadas em aterros de resíduos sólidos urbanos. Ela pode consistir de uma camada de argila compactada, coberta com material granular e uma camada para suporte da vegetação. Uma camada arenosa sob a camada de argila pode ser usada como uma barreira capilar ou filtro. Alternativamente à camada de argila compactada pode ser utilizada uma geomembrana ou “liner” geossintético.

O uso de coberturas para controle do fluxo de água seria mais adequado em depósitos de resíduos de disposição antiga e já extensivamente oxidados, onde usualmente é encontrada grande quantidade dos produtos de reações de oxidação e ácidos. Neste caso, o objetivo é diminuir ou interromper o transporte do material solúvel já oxidado.

Uma barreira para minimização do fluxo de oxigênio, por sua vez, seria mais adequada para aplicação em depósitos de resíduos de disposição recente, pouco oxidados, e em áreas de reduzida precipitação de chuvas, onde o controle da disponibilidade de oxigênio para reação de oxidação seria mais importante na redução da geração de drenagem ácida do que a redução do fluxo de água através do resíduo.

C) Coberturas para minimização do fluxo de oxigênio e água

Quando não se conhece em detalhe as características de geração de drenagem ácida do depósito ou quando tais depósitos contém, sabidamente, material de disposição recente e antiga, é indicado o uso de uma cobertura que tenha por objetivo reduzir simultaneamente o acesso da água e do oxigênio ao resíduo.

Sistemas de cobertura com estas características, projetados para uso em regiões úmidas com elevados índices pluviométricos consistem, tipicamente, de uma camada de material argiloso compactado coberta por uma camada adicional, projetada para prevenir a erosão e oferecer suporte à vegetação. Estes sistemas usualmente incorporam, abaixo da camada argilosa, uma camada de material permeável, em geral arenoso, formando uma barreira capilar que auxilia na retenção de água no interior da camada argilosa, reduzindo as perdas

por evaporação (Figura 4). A manutenção do grau de saturação da camada argilosa garante a eficiência desse sistema de cobertura como barreira à difusão do oxigênio (YANFUL, 1993; YANFUL *et al.*, 1993 e NICHOLSON *et al.*, 1989).

3.1.2 | Coberturas Úmidas

A estratégia de uso de coberturas úmidas para a minimização da geração de DAM consiste na inundação controlada de áreas de disposição de resíduos ou na elevação do nível d'água dentro delas. Uma vez que o coeficiente de difusão do oxigênio na água é cerca de 4 ordens de grandeza menor que seu coeficiente de difusão no ar, a disposição sub-aquática de materiais geradores de acidez pode evitar a oxidação por meio do bloqueio da entrada de oxigênio no sistema. Para o emprego deste tipo de disposição são fundamentais os estudos sobre a geoquímica dos resíduos, atividade biológica e o transporte dos contaminantes (MEND/CANMET, 1994).

A utilização de coberturas úmidas é atraente, sobretudo, em locais onde o nível do lençol freático pode ser restabelecido ou elevado de forma a submergir os rejeitos geradores de acidez (BORMA E SOARES,2002).

A utilização de lagos naturais para disposição sub-aquática não é recomendável, uma vez que além de acarretar assoreamento, pode aumentar a acidez das águas de cobertura comprometendo o ecossistema lacustre. O aumento de acidez ocorre como conseqüência das reações de oxidação dos resíduos de disposição recente sob água. Estas reações podem continuar ocorrendo por um algum tempo, antes que finalmente cessem por deficiência de oxigênio.

O uso de cavas e antigas bacias de rejeito reduz o investimento necessário para a disposição sub-aquática segura dos resíduos, uma vez que podem ser aproveitadas as estruturas de contenção construídas anteriormente para retenção de sólidos e água. Considerando que receberão nova destinação, tais estruturas necessitam de avaliação prévia quanto à capacidade de reter água e contaminantes a curto e longo prazos. Quando a disposição sub-aquática exige a construção ou alteamento de barragens, por outro lado, pode tornar-se economicamente inviável.

3.2 | Efeitos Ambientais e Ecológicos da DAM

3.2.1 | Acidez e Toxicidade por Metais

A alta acidez das drenagens ácidas de mina e grande quantidade de metais pesados dissolvidos (tais como cobre e zinco) geralmente tornam as águas ácidas extremamente tóxicas para muitos organismos (Pentreath, 1994). Muitos fluxos a jusante, derivados de drenagem ácida de mina são largamente destituídos de vida por um longo período.

As águas ácidas normalmente são classificadas de acordo com o pH, dentro das seguintes quatro classes de águas:

- Extremamente ácida;
- Ácida;
- Neutra para alcalina;
- Salina (Morin e Hutt, 1997).

Classes (i) extremamente ácida e (ii) ácida, são consideradas juntas devido à semelhança geral destas duas águas (baixo pH e metais em altas concentrações).

3.2.2 | Águas Extremamente ácidas e ácidas (DAM)

Independentemente do tipo de efluente estudado, uma recomendação geral é que um conjunto de análises interlaboratoriais deveriam ser executadas dentro da fase inicial de um estudo que contribuiriam para caracterizar a relação mineração - emissões. Em uma análise desse tipo, todos os elementos que tecnicamente pudessem ser determinados com um método analítico específico, seriam incluídos na análise. Um método analítico multielementar pela técnica de plasma induzido, permite a determinação de até 70 elementos em uma única varredura. Isto habilita a descoberta de elementos menos perigosos até elementos potencialmente perigosos que podem estar presente nos efluentes.

3.2.3 | Modelos Preditivos das Condições Biogeoquímicas me Lagos

A utilização de Modelos preditivos das condições biogeoquímicas em lagos tem sido realizada relativamente em pouco lagos existentes e modelos preditivos *hidrodinâmicos acoplados* do tipo hidrodinâmico - físico limnológico – geoquímico - ecológico para futuros estudos em lagos geralmente ainda estão faltando.

A lacuna marcante no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável dos lagos é a falta de dados de longos períodos requeridos para comparar e validar os modelos de predição.

3.2.4 | Águas Neutras para Alcalinas

Partindo da premissa de que concentrações de poluentes tóxicos para a biota são baixas para moderadamente altas (Niyogi *et al.*, 2002), as águas naturais receptoras de nutrientes das águas de mina podem ser sensíveis a eutrofização (processo através do qual um corpo de água adquire níveis altos de nutrientes, especialmente fosfatos e nitratos, provocando o posterior acúmulo de matéria orgânica em decomposição; eutroficação).

A ausência dos seguintes dados de entrada para os modelos biogeoquímico e ecológico é identificada em relação ao tipo de efluente de mina.

A composição isotópica do nitrogênio das fontes (principalmente do nitrato de amônia, matéria prima dos explosivos, e cianeto de sódio) deveria ser determinada.

Isso tornaria possível o uso dos isótopos do nitrogênio em reações de transformação do nitrogênio nos efluentes da mina.

3.2.5 | Águas Salinas

Estudos prévios dos efluentes de mina focalizaram, normalmente, nos traços de metais tóxicos. Para uma maior abertura, visando ao principal conhecimento relativo à salinidade dos efluentes da mineração, é que os efeitos potenciais na biota das águas doces de superfície, devido ao aumento das concentrações e/ou a variação, devem ser

conhecidos. Muito embora todos esses problemas sejam sérios, o principal objetivo deve ser voltado para as águas poluidoras resultantes da drenagem das minas. Na realidade, com exceção de uns poucos novos métodos de revegetação, a maioria das tecnologias inovadoras na literatura remetem para o tratamento da água ácida, das proporções relativas dos íons normalmente considerados como não sendo tóxicos (por exemplo Ca^{2+} e SO_4^{2-}) é muito pouco.

3.3 | Estudos Biogeoquímicos

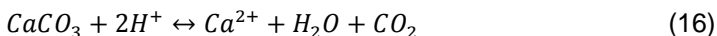
O termo " biogeoquímico" pode ser definido como as reações envolvendo fluxo de elementos químicos e compostos entre os organismos vivos e o ambiente físico. O termo inclui, dessa forma, a absorção biológica de elementos nutricionais, como o fósforo e o nitrogênio, e reações redox intermediadas pelas bactérias, como p.ex: precipitação dos hidróxidos de ferro, catalisadas pelas bactérias. O termo não inclui os tópicos ecológicos de distribuição, abundância e interação dos organismos vivos.

4 | NEUTRALIZAÇÃO E REMOÇÃO DE METAIS

As metodologias pelas quais a precipitação dos metais podem ocorrer apresentam possibilidades aparentemente infinitas mas nem sempre são bem entendidas. Sem dúvida a aplicação mais comum para reduzir acidez é acrescentar a cal. Há muitos modos para tratar drenagem ácida por processos naturais que formam a base para tratamentos passivos. Há muitos processos aeróbicos e anaeróbicos que conduzem à precipitação de metais que é comumente praticada. Embora não sejam completas as informações que se seguem deveriam prover alguma utilidade sobre as tecnologias que serão discutidas brevemente.

É muito importante controlar o pH da drenagem porque o pH influencia, principalmente, na solubilidade dos metais e as cinéticas da oxidação e processos de hidrólise e, além disso, a relação entre pH e processos de remoção dos metais varia entre metais e também entre os processos bióticos e abióticos (EPA, Vol. 4).

O Calcário (carbonato de cálcio), rico em calcita, aumenta o pH da água consumindo íons hidrogênio e acrescenta alcalinidade através dos íons bicarbonato (Younger *et al.*, 2002).



Uma vez que o pH da água ácida foi elevado, os metais precipitam para formar hidróxidos e oxyhydroxidos mais facilmente, em alguns casos, e somente o pH, mudará o íon metálico para uma forma insolúvel, isto se verifica para o caso do alumínio.

Outros agentes alcalinos geralmente usados são a cal hidratada (hidróxido de cálcio), barrilha (carbonato de sódio), soda cáustica (hidróxido de sódio) e, em alguns casos, hidróxido de amônia (U.S. Dept. of the Interior, 2002b)

5 | EFEITOS AMBIENTAIS E ECOLÓGICOS DA DAM

5.1 | Acidentes acontecem - DAM pode ser controlada?

Embora AMD, até certo ponto, pode ser tratada na mina, por exemplo por neutralização com calcário, deposição de rejeitos em barragens de decantação ou *wetlands*; contudo, esses processos nunca são completamente eficientes. Além disso, acidentes com o sistema de tratamento são inevitáveis. Terremotos, tempestades tropicais e tufões podem acontecer na área. Estes poderiam romper represas, ou causar inundações, lançando a jusante grandes volumes de material, não somente águas ácidas como também polpa, precipitados que poderia ter efeitos devastadores na vida marinha. Realmente, acidentes semelhantes aconteceram, ambos nas Filipinas e em outros locais. Uma represa de rejeito de uma mina de zinco no sul da Espanha rompeu-se e causou o maior acidente de poluição ambiental já registrado na história espanhola.

5.2 | Acidez e Toxicidade Causadas por metais

A alta acidez das drenagens ácidas de mina e grande quantidade de metais pesados dissolvidos (tais como cobre e zinco) geralmente tornam as águas ácidas extremamente tóxicas para muitos organismos (Pentreath, 1994). Muitos fluxos a jusante derivados de drenagens ácidas de minas são largamente destituídos de vida por um longo período.



Figura 5 – “Yellow boy” em um córrego receptor de drenagem ácida de uma mina de carvão a céu aberto.

5.3 | Sedimentação

Inicialmente, a drenagem ácida de mina é clara mas assume uma forte coloração amarela alaranjada (conhecido como "yellow boy") após a neutralização. Essa coloração é devida a precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro . Este precipitado ocre cobre o leito do rio com uma fina camada. Em função disso, pequenos animais aquáticos que se alimentavam do lodo do fundo do rio deixam de fazê-lo e, dessa forma, o rio deixa de ter vida porque estes animais estão no início da cadeia alimentícia da fauna aquática, causando grandes impactos na cadeia alimentar dos peixes. Dessa forma , mesmo após neutralização da acidez e precipitação dos metais pesados, os problemas ambientais oriundos da DAM continuam a existir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acid Mine Drainage: Innovative Treatment Technologies, October,2003

Prepared by Christine Costello National Network of Environmental Management Studies Fellow for U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office Washington, DC www.clu-in.org

Borma,L.S.; Soares,P.S.M. - Resíduos Sólidos de mineração e drenagens ácidas,In:TRINDADE,R.B.E.;BARBOSA FILHO,O. Extração de ouro :princípio, tecnologia e meio ambiente. CETEM/MCT, Rio de Janeiro,2002.334 p..

CSIR - Acid Mine Drainage in South Africa Briefing Note 2009/02 August 2009

Department of the Interior (2002b) : Office of Surface Mining. Acid Mine Drainage Treatment Techniques and Costs. Available at : <http://www.osmre.gov/amdtcst.htm> **Environmental Aspects of Mining**

ANDERS WIDERLUND AND BJÖRN ÖHLANDER, LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY,FRAUKE ECKE, SWEDISH UNIVERSITY OF AGRICULTURAL .Published by Luleå University of Technology, 2014.

GARD Guide, 2014. Global Acid Rock Drainage Guide.

http://www.gardguide.com/index.php/Main_Page (Accessed 2014-04-16) GTK, 2014. Finland's Mineral Strategy. <http://projects.gtk.fi/mineraalistrategia/>

GREENPEACE - Defending Our Oceans Acid Mine Drainage: devastating to aquatic life (Acesso Internet / Out. 2015).

MEND/CANMET - Technical Report Evaluation of Alternative dry covers for the inhibition of acid mine drainage from tailings. Mining Environmental Neural Drainage(MEND PROGRAM, ed. by Canada Centre for Mineral and Energy Technology - CANMET, OTTAWA, CANADA,1994.),

Mining and its environmental impact. Issues in Environmental Science and Technology no. 1. Royal Society of Chemistry, Herts, UK. Pp. 121-132. (Pentreat 1994; Jenkins et al., 2000.)

Morin, K. A., Hutt, N. M., 1997. Environmental geochemistry of mine site drainage. MDAG Publication, Vancouver.

Penreath, R.J. The discharge of waters from active and abandoned mines. In: Hester, R.E. & Harrison, R.M. (eds.)

Ritcey,G.M. Tailings management: problems and solutions in the mining industry, Amsterdam: ELSEVIER, 1969. Process Metallurgy, V. 6.

YANFUL, E.K. - Oxygen diffusion through soil covers on sulfide mill tailings, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, 119(8), p.1207-28,1993.

YANFUL, E.K; BELL, A. V. WOYSHNER, M.R. Design of a composition soil covers for an experimental waste rock pile near Newcastle, New Brunswick, Canada, Canadian Geotechnical Journal, 30: p. 578-587,1993

Younger, Paul, Banwart, Steven A, Hedin, Robert, S. (2002) Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. The Netherlands: Kluwer Academic Press.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2014, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 280 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA- 86 – **Avaliação de Risco à Saúde Humana da Aplicação de Resíduos Gerados na Lavra e Beneficiamento do Mármore Bege Bahia como Carga no Setor Polimérico.** Roberto Carlos da C. Ribeiro, Cristiane A. de Lima e Tatiana da C. Reis Moreira, 2015.

STA- 85 – **Extração de Ouro a partir de Placas de Circuito Impresso por Cianetação Intensiva.** Ana Luiza A. M. Santos, Naiara Soares Bello, Luiz Gonzaga Sobral e Débora Monteiro de Oliveira, 2015.

STA- 84 – **Bioliviação de Urânio Proveniente de Minérios com Baixo Teor (fontes não convencionais).** André Luiz Ventura Fernandes, Tatiane Franco Machado e Débora

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.