

# **AValiação de Cobertura Seca de Entulho de Construção Civil PARA REMEDIAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA EM MINA**

**NATÁLIA CRISTIANE DE MORAES**

E-mail: nataliacristianem@yahoo.com.br

**JOSÉ MARGARIDA DA SILVA**

E-mail: jms@demin.ufop.br

**ADILSON CURI**

E-mail: curi@demin.ufop.br

Escola de Minas/Universidade Federal de Ouro Preto/ Brasil.

## **RESUMO**

Dentre os impactos ambientais da lavra, inclusive da modalidade subterrânea, e também na área da construção civil, está a drenagem ácida de mina (DAM). Trabalhos importantes vêm sendo realizados com a intenção de evitar a geração ou tratar a DAM nas regiões brasileiras. As principais alternativas consideradas são coberturas secas (amplamente utilizadas), aditivos alcalinos e tratamento ativo da DAM. Outra opção é a concentração/isolamento de sulfetos. Com a dessulfurização dos rejeitos de mineração preliminarmente à disposição final, o potencial de geração de acidez, e conseqüentemente a lixiviação dos metais, são consideravelmente reduzidos, obtendo-se significativos ganhos ambientais e econômicos. Em vista do exposto, o presente trabalho buscou avaliar a efetividade do sistema de cobertura seca com entulho de construção civil, em diferentes proporções, como forma de minimizar ou evitar o desencadeamento da DAM. Para tanto, foram realizados experimentos em colunas de lixiviação em laboratório, que evidenciaram uma redução de mais de 90% no potencial gerador de acidez da DAM, caracterizando uma alternativa promissora na remediação da drenagem ácida de mina.

Palavras-chave: drenagem ácida de mina, resíduos de mineração, entulho de construção civil e acidez.

## **Abstract**

Among the environmental impacts of mining, including the underground modality, and also in the area of civil construction, is the acid mine drainage (DAM). Important works have been carried out with the intention of avoiding the generation or treatment of AMD in the Brazilian regions. The main alternatives considered are dry coverings (widely used), alkaline additives and active treatment of DAM. Another option is the concentration / isolation of sulphides. With the desulfurization of the mining tailings preliminary to final disposal, the potential for acidity generation, and consequently the leaching of the metals, are considerably reduced, resulting in significant environmental and economic gains. In view of the above, the present work sought to evaluate the effectiveness of the dry cover system with civil construction rubble, in different proportions, as a way to minimize or avoid the triggering of AMD. For this purpose, experiments were carried out on laboratory leaching columns, which evidenced a reduction of more than 90% in the acid generating potential of DAM, characterizing a promising alternative in the remediation of acid mine drainage.

Keywords: Acid mine drainage, mining waste, building rubble and acidity.

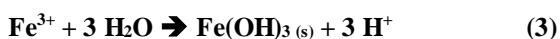
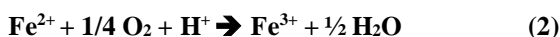
## 1. INTRODUÇÃO

A exploração mineral tornou-se uma atividade indispensável para a sociedade moderna, devido à importância que os bens minerais e seus derivados assumiram na economia mundial. Entretanto, a continuidade e expansão das atividades de mineração no Brasil e no mundo dependem de um forte compromisso com a preservação e recuperação do meio ambiente (Rebouças *et al.* 2006).

A DAR (drenagem ácida de rocha) é formada pela oxidação de minerais sulfetados, principalmente pirita ( $\text{FeS}_2$ ), expostos a ação do oxigênio atmosférico e água, com mediação bacteriana. Quando a DAR está relacionada à atividade mineradora, o processo passa a ser chamado de drenagem ácida de mina (DAM). Uma das principais conseqüências da DAR é a solubilização de metais pesados associados aos minerais sulfetados, devido ao baixo pH (< 4,5), os quais podem contaminar recursos hídricos adjacentes. A Drenagem ácida de mina é um dos fatores mais importantes na ocasião do fechamento definitivo de uma mina, seja a céu aberto ou subterrânea. Ela implica em monitoramento, correções e atitudes necessárias para que se tenha uma situação mais próxima possível do inicial ou que não traga conseqüências inadequadas ao meio ambiente.

Segundo Fergusson e Erickson (1987), citado por Pastore e Mioto (2000), o fenômeno da geração de drenagem ácida pode ser descrito por quatro reações básicas que, por sua vez, estão agrupadas em três estágios (**reações 1 a 4**), formando um ciclo. Estas reações estão envolvidas na quebra da pirita que, na presença de água e oxigênio, produzem ácido sulfúrico.

### Estágios I e II:



### Estágio III:



Trabalhos importantes vêm sendo realizados com a intenção de evitar a geração ou tratar a DAM em várias partes do mundo, como regiões carboníferas, onde o carvão ocorre associada a oxidação de pirita (Blowes *et al.* 2003), minerações de urânio, ouro, níquel, cobre e adicionalmente, na construção civil,

como o caso do aproveitamento hidrelétrico de Irapé (CEMIG), no norte de Minas Gerais (Lima, 2009).

Diversas técnicas são sugeridas na literatura para tratamento de efluentes de DAM. A escolha do processo de tratamento de águas ácidas deve ser economicamente viável, simples e eficiente, considerando que seu custo é sempre tido como extra na produção (IPAT-UNESC, 2000 e 2001). Atenção especial deve ser dada a estudos voltados a minimização e prevenção de sua ocorrência.

Embora os fatores que controlam a oxidação da pirita no campo sejam bem entendidos, a quantificação de alguns deles pode ser difícil. A taxa de difusão de oxigênio, infiltração da água, temperatura, pH, presença de materiais alcalinos, heterogeneidade vertical e horizontal, e os modos de oxidação da pirita constituem fatores de mensuração para a previsão e monitoramento da drenagem ácida (Evangelou, 1995).

Alguns tratamentos ativos e passivos têm sido implantados em áreas da mina, para evitar o aumento e contaminação do meio ambiente pelas drenagens ácidas. Os tratamentos ativos envolvem a adição de produtos alcalinos nos sistemas. Estes sistemas funcionarão enquanto houver a adição dos insumos e a manutenção dos filtros e outros componentes. Sendo assim o consumo de energia é constante durante o tempo de vida do sistema.

Os sistemas de tratamento passivo são projetados para fazer uso de processos naturais resultantes das interações entre atmosfera, hidrosfera e biosfera, como por exemplo: sedimentação, filtração, transferência gasosa, adsorção, trocas iônicas, precipitações químicas, reações de hidrólise e oxi-redução, entre outros. Sistemas passivos necessitam de pouca ou nenhuma manutenção, sendo esta uma de suas principais vantagens sobre o tratamento ativo, além de não exigirem a adição constante de produtos químicos (Trindade e Soares, 2004).

São relatados na literatura vários tipos de tratamento de acordo com as características locais de ocorrência da drenagem ácida, mas o que se observa é um grande uso do sistema de tratamento passivo, principalmente envolvendo o uso de coberturas secas, nas quais seus componentes podem ser modificados, quanto à composição, quantidade, textura, entre outros. Podem ser citados como componentes das coberturas: camada argilosa mais cinzas

pesadas (Galatto *et al.*, 2007), camada argilosa mais aditivos alcalinos (Murta, 2006), escória de aciaria (Machado e Schneider, 2008; Salviano, 2010), cinzas de carvão (Machado, 2007; Soares *et al.* 2006), entulho de construção civil (Moraes, 2010a), entre outros.

A avaliação da eficiência dos sistemas de coberturas secas para prevenção da DAM passa necessariamente por estudos experimentais, quer seja em laboratório, quer seja em campo. Na literatura muitas vezes são mencionados experimentos dessa natureza em lisímetros e colunas de lixiviação (Mello e Abrahão, 1998; Pinto e Nepomuceno, 1998; Ritcey, 1989).

As coberturas secas são uma técnica aplicada em larga escala na América do Norte e Austrália, que consiste em uma alternativa utilizada na prevenção e controle da DAM, quando da reabilitação de depósitos de resíduos de mineração geradores de acidez. Elas são colocadas sobre o depósito de material reativo e têm por objetivo principal o controle da entrada de oxigênio e água, inibindo o processo de oxidação dos sulfetos na sua origem. Além dessas funções, as coberturas secas devem ser resistentes à erosão e fornecer suporte à vegetação (Borma e Soares, 2002). Nos últimos anos, o uso de coberturas secas para prevenir a geração de Drenagem Ácida de Minas tem sido estudado no Brasil (Souza *et al.*, 2003; Galatto *et al.*, 2007).

A denominação “coberturas secas” (*dry covers*) refere-se às condições de saturação inexistente ou parcial em água e, é utilizada em contraposição às “coberturas úmidas” (*wet covers*) mantidas em condições de saturação total. Embora as coberturas secas sejam constituídas, na maioria das vezes, por camadas de solos de diferentes propriedades, o termo “cobertura de solo” não é o mais apropriado, uma vez que para sua execução podem ser utilizados outros tipos de materiais, tais como os geossintéticos ou resíduos resultantes de outras atividades, desde que apresentem as propriedades necessárias à minimização da formação da drenagem ácida de minas.

A habilidade de um sistema de cobertura seca de atuar de acordo com as premissas estabelecidas no projeto é uma função das propriedades dos materiais utilizados na cobertura, do resíduo e da resposta às condições atmosféricas atuantes.

Quando não se conhece em detalhe as características de produção de DAM do depósito ou quando tais depósitos contêm,

sabidamente, material de disposição recente e antiga, é indicado o uso de uma cobertura que tenha por objetivo reduzir simultaneamente o acesso a água e do oxigênio ao resíduo.

Uma cobertura 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 de disponibilidade de oxigênio para a reação de oxidação seria mais importante na redução da produção de DAM do que a redução do fluxo de água através do resíduo.

Sistemas de cobertura com essas características, projetados para uso em regiões úmidas com elevados índices pluviométricos consistem, tipicamente, em de uma camada de material argiloso compactada coberta por uma camada adicional, projetada para prevenir a erosão e oferecer suporte à vegetação. Esses 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. A manutenção do grau de saturação da camada argilosa garante a eficiência desse sistema de cobertura como barreira à difusão de oxigênio (Yanful, 1993; Yanful *et al.*, 1993 e Nicholson *et al.*, 1993 citados por Borma e Soares, 2002).

Também são utilizados outros tratamentos, como o uso de aditivos alcalinos (Roeser, 2006), banhados ou wetlands (Vasquez, 2007; Anjos, 2003), Flotação por Ar Dissolvido (Rubio *et al.* 2002), bombeamento dos efluentes e tratamento com aditivos alcalinos, no caso calcário (Possa e Santos, 2003; Silveira *et al.*, 2009). Outra opção é a concentração/isolamento de sulfetos. De acordo, com Benzaazoua *et al.* (2008) e Hesketh *et al.* (2010), com a dessulfurização dos rejeitos de mineração preliminarmente à disposição final, o potencial de geração de acidez, e conseqüentemente a lixiviação dos metais, são consideravelmente reduzidos, obtendo-se significativos ganhos ambientais e econômicos.

Outros estudos mostram que, por meio da concentração da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), presente em grandes quantidades no carvão catarinense, é possível produzir ácido sulfúrico (atividade que já foi desenvolvida na região entre 1982 e 1993, pela Indústria Carboquímica Catarinense - ICC, e que atualmente se encontra desativada sendo

considerada um grande prejuízo ao ciclo produtivo do carvão na região), sulfato férrico (Menezes, 2009), sulfato ferroso (Peterson, 2008; Vigânico, 2009) e pigmentos à base de óxidos de ferro (goetita, hematita e magnetita) (Madeira, 2010; Silva, 2010) com a utilização de processos térmicos e/ou hidrometalúrgicos.

Em vista do exposto, o presente trabalho buscou avaliar a efetividade de um sistema de cobertura seca, em diferentes proporções, como forma de minimizar ou evitar o desencadeamento da DAM. Para tanto, foram realizados experimentos em cinco colunas de lixiviação em laboratório. Ressalta-se que os resultados aqui apresentados são parte integrante de uma dissertação de mestrado que contou com o fomento da Fundação Gorceix e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Em Ouro Preto-MG, pirita foi extraída em uma antiga mina, denominada Jazida de Pirita (figura 1) descrita por Djalma Guimarães, durante as décadas de 30 e 60, do século passado. Lacourt (1938) relata que a produção mensal da mina era de 150 toneladas, sendo que grande parte era vendida a antiga Fábrica de Pólvora de Piquete (Fábrica Presidente Vargas) e uma pequena parte vendida a ELCHISA S.A. para a produção de ácido sulfúrico. A pirita vendida continha em média 46% de enxofre e traços de arsênio (menos de 0,05%).

Hoje a área da cava, com 89 Km<sup>2</sup> está abandonada, constitui um local de deposição ilegal de entulho de construção civil e a população praticamente mora nos arredores da mina, fazendo novos loteamentos instáveis, devido as condições geotécnicas do local. Nesta mina, foram observados pontos e uma galeria subterrânea, com água com pH inferior a 3.0 e , caracterizando a geração de drenagem ácida de mina (DAM), de considerável impacto ambiental em minas de minérios sulfetados.

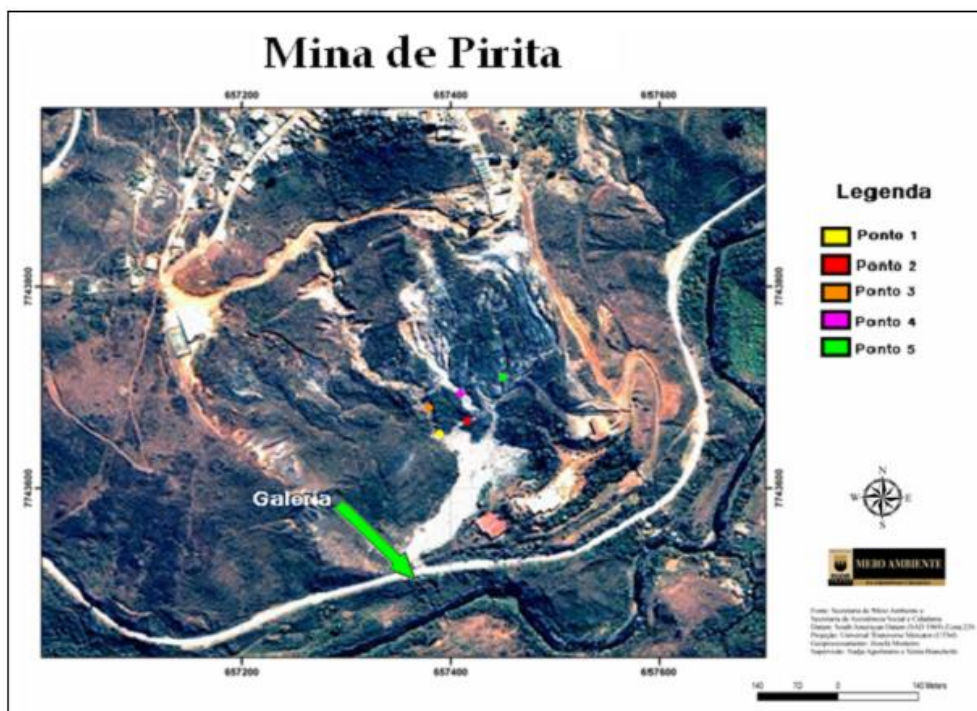


Figura 1: Mina de Pirita em Ouro Preto – MG, com a localização dos pontos de amostragem de material e a entrada de uma galeria subterrânea. Fonte: modificado de Mariano (2008).

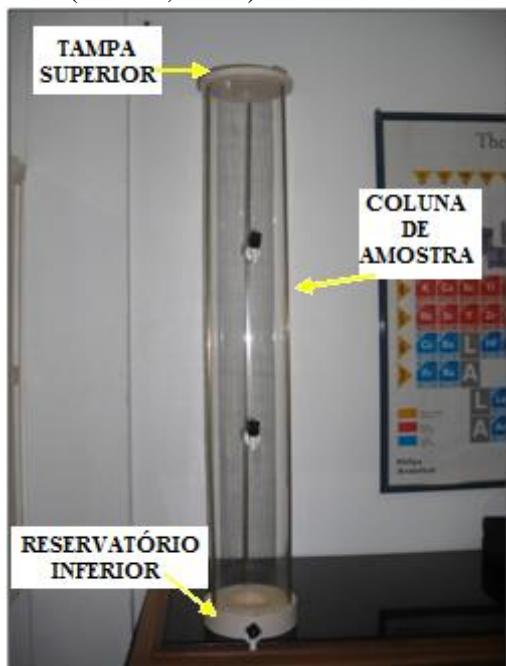
## 3. METODOLOGIA

Para avaliar processo de formação e abatimento da drenagem ácida pelo uso de coberturas secas foram montadas 5 colunas de lixiviação (tabela 1), denominadas I a V, com diferentes objetivos e dimensões. A tabela 1 mostra o resumo geral da composição das colunas de lixiviação, a quantidade de material

introduzido, a duração dos ensaios e a quantidade de água introduzida diariamente. As colunas são compostas por três partes: reservatório inferior, coluna de retenção da amostra e tampa superior, sendo que todo o conjunto é fixado por hastes e borboletas de latão, conforme figura 2. O reservatório inferior e a tampa superior são de PVC e a coluna de retenção da amostra de acrílico. Ambos os materiais constitutivos podem

ser considerados inertes quanto às soluções ácidas percolantes.

A quantidade de material introduzido nas colunas de lixiviação foi escolhida aleatoriamente, não obedecendo nenhuma metodologia de ensaio. A localização e o número de pontos de amostragem (figura 2) na Mina de Pirita foram definidos através de visitas a campo e também de acordo com as condições favoráveis à coleta (Moraes,2010b).



**Figura 2-** Coluna de lixiviação. Fonte: Leite (2009)

As amostras introduzidas nas colunas foram:

I – material da mina, composto pela homogeneização das cinco amostras coletadas (figura 3) com auxílio de pá e picareta a 30 cm de profundidade do solo;

II – entulho de construção civil (figura 4) constituído de pedaços de concreto, de tijolos de cerâmica, de argila, de concreto, de gesso e de telhas de amianto, proveniente de uma reforma do prédio DEGEO/DEMIN e que foram cominuídos no Laboratório de Processamento de Minerais, ambos da própria UFOP;

III – material da mina e entulho, na mesma proporção;

IV – foi utilizada a proporção de 1:4 com 2,0 kg de material da mina e 8 kg de entulho;

V - foi preenchida com 1,0 kg de material da mina, 0,1 kg de cal e 3,0 kg de entulho.



**Figura 3 -** Amostras coletadas na Mina de Pirita, após secagem.



**Figura 4 -** Entulho proveniente de reforma no prédio DEGEO/DEMIN da UFOP.

Os objetivos de cada coluna foram:

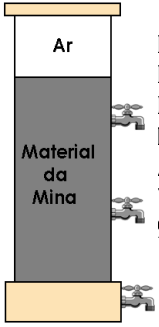


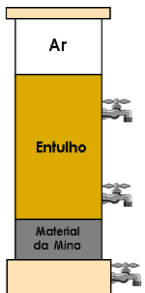
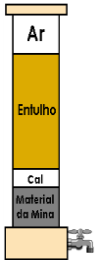
I e II - foram preparadas com a finalidade de servir como referência para os resultados obtidos com as outras colunas e identificar as características físico-químicas e o comportamento dos materiais utilizados, servindo como uma espécie de “branco” para a comparação dos resultados, sendo útil na interpretação da influência das coberturas aplicadas sobre o material da mina nos ensaios das colunas III, IV e V;

III – avaliar a qualidade do abatimento da drenagem ácida oferecida pelo sistema de cobertura de entulho e verificar se a proporção do entulho em relação ao material da mina seria satisfatória no processo;

IV – avaliar a influência da quantidade de entulho no abatimento da drenagem ácida;

V - objetivou simular a influência da camada de aditivo alcalino (cal) entre o material da mina e o entulho na proporção (1: 3). A cal foi escolhida, neste trabalho, para o abatimento de drenagem ácida, devido a seu baixo custo relativo no tratamento de drenagens com elevada acidez e alta concentração de sulfatos, e por reagir rapidamente no sistema.

**Tabela 1** : Características das Colunas de Lixiviação.

Coluna I	Coluna II
 <p>Duração do Ensaio: 30 dias            Dimensões: 14,54 x 104 cm            Material de Preenchimento: 14,30 kg de material da mina            Altura de material na coluna: 87 cm            Volume introduzido diariamente: 955mL</p>	 <p>Duração do Ensaio: 30 dias            Dimensões: 7,30 x 75 cm            Material de Preenchimento: 8,3 kg de entulho            Altura de material na coluna: 66 cm            Volume introduzido diariamente: 241 mL</p>
Coluna III	Coluna IV
 <p>Duração do Ensaio: 23 dias            Dimensões: 14,54 x 104 cm            Material de Preenchimento: 7,5 kg de material da mina e 7,5 Kg de entulho            Altura de material na coluna: 88 cm            Volume introduzido diariamente: 955 mL</p>	 <p>Duração do Ensaio: 40 dias            Dimensões: 14,54 x 104 cm            Material de Preenchimento: 2,0 kg de material da mina e 8,0 kg de entulho            Altura de material na coluna: 58 cm            Volume introduzido diariamente: 955 mL</p>
Coluna V	
 <p>Duração do Ensaio: 40 dias            Dimensões: 7,30 x 75 cm            Material de Preenchimento: 1,0 kg de material da mina, 0,1kg de cal e 3,0 kg de entulho            Altura de material na coluna: 70 cm            Volume introduzido diariamente: 241 mL</p>	

### 3.1 Operações das Colunas

Os ensaios de lixiviação consistiram em percolar diariamente água deionizada pelo material da mina e pelos sistemas de coberturas acrescentados a ele, como o entulho e a cal, introduzidos nas colunas, monitorando-se diversos parâmetros químicos e físico-químicos do lixiviado. Utilizou-se a água deionizada, em virtude de se eliminar qualquer possibilidade contaminação de íons, metais-traços da água nos ensaios.

Os ensaios de lixiviação foram realizados de modo a respeitar e representar ao máximo as condições de lixiviação em campo do material coletado, e os sistemas de coberturas adicionados a ele, simulando diferentes alternativas de

neutralização/abatimento de drenagem ácida existente.

Para isso, a quantidade de água deionizada a ser lixiviada pelas colunas I, II, III, IV e V foi calculada com base na precipitação média anual ocorrida na cidade de Ouro Preto e nas dimensões das colunas.

A quantidade de material introduzido nas colunas de lixiviação foi escolhida aleatoriamente, não obedecendo nenhuma metodologia de ensaio anterior. Após o preenchimento dos materiais nas colunas, foi colocada uma camada de geotêxtil sobre eles, para evitar que a água introduzida na coluna percorresse caminhos preferenciais não lixiviando completamente o material.

As soluções drenadas nas bases das colunas foram coletadas diariamente e analisadas para diversos parâmetros físico-químicos e elementos químicos a fim de se estudar os processos de produção e abatimento da drenagem ácida. A escolha dos métodos foi baseada no *Method 1627: Kinetic Test Method for the Prediction of Mine Drainage Quality* (EPA, 2009) e a metodologia proposta por Greenberg *et al.* (1992).

Os parâmetros, comumente, considerados importantes para serem analisados no lixiviado da DAM são: pH, Eh (potencial redox), acidez, alcalinidade, metais, condutividade elétrica (CE), sulfato e temperatura. Os métodos de análise e equipamentos utilizados estão listados na tabela a seguir.

**Tabela 2 :** Métodos de análise, equipamentos e limites de detecção.

Parâmetro	Método	Equipamento	Limite de detecção
Acidez	Titulométrico	Bureta manual	1,0 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidade Total	Titulométrico	Bureta manual	1,0 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Condutividade elétrica	Medida direta	Condutivímetro Digimed DM-32 VI.0	0,001 µS/cm
Eh	Potenciométrico	pHmetro Digimed DM-22 VI.2	0,1 mV
Metais	Espectroscópico	ICP-OES SPECTRO/Ciros CCD	Para cada metal existe um limite de detecção.
pH	Potenciométrico	pHmetro Digimed DM-22 VI.2	0,01
Sulfato	Turbidimétrico	Turbidímetro Micronal B250	0,1 mg/L
Temperatura	Medida Direta	Condutivímetro Digimed DM-32 VI.0	0,1 °C

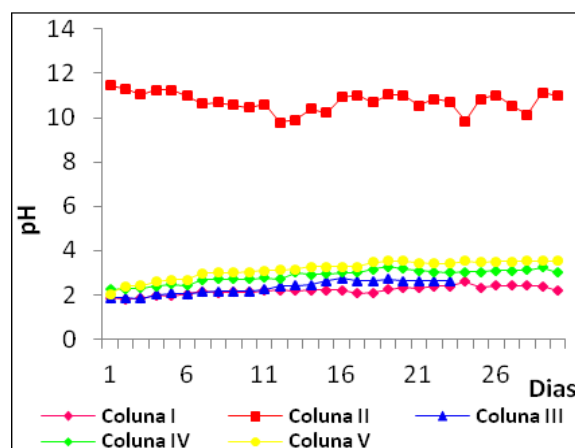
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados e as discussões das análises efetuadas com as colunas de lixiviação. Ressalta-se que todos os monitoramentos das soluções da coluna III foram impedidos no 23º dia, devido ao entupimento do dreno da coluna.

Como definição, o pH (potencial hidrogênionico) representa a concentração de íons hidrogênio (em escala anti-logarítmica), fornecendo uma indicação sobre a condição de acidez, neutralidade ou alcalinidade da água..

Os valores do pH (figura 5) das colunas I, III, IV e V, foram considerados ácidos (pH<7), devido a presença de minerais sulfetados. Ressalta-se que a elevação observada na coluna I, se deve a presença de dolomita identificada pelas análises de difratometria. Nas outras colunas (III, IV e V) além da presença da dolomita, o entulho e a cal contribuíram para a elevação do pH observado. O caráter básico (pH>7) apresentado pelas soluções lixiviadas da coluna II, se deve, em parte, pela presença do calcário que faz parte da composição do cimento utilizado na construção civil. Destaca-se a rapidez com que se processaram as reações químicas entre a cal e os componentes introduzidos na coluna V, que foram evidenciadas pelo o aumento do pH ao longo do

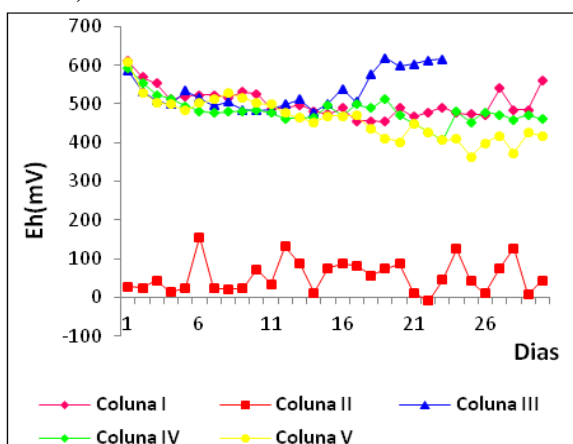
período analisado. Os resultados obtidos com a adição de cal, como reforço no sistema de cobertura se mostraram satisfatórios, e a partir do 28º dia pode-se afirmar que o pH das soluções entraram em processo de estabilização.



**Figura 5:** Variação do pH das soluções drenadas das Colunas de lixiviação.

O Eh indica a medida da transferência de elétrons (potencial elétrico) em uma reação de oxi-redução. O valor do potencial de oxi-redução informa se um meio é oxidante ou redutor. Valores mais baixos de Eh traduzem uma maior disponibilidade de elétrons, revelando um meio mais redutor. Valores elevados de Eh indicam que existem poucos elétrons disponíveis para a

redução, ou seja, o meio é oxidante. A reação de oxidação geralmente aumenta a quantidade de prótons, ou gera um meio mais ácido. A redução geralmente consome prótons, e o pH do meio se eleva (Langmuir, 1997; Dold, 1999 in Moraes, 2010a).

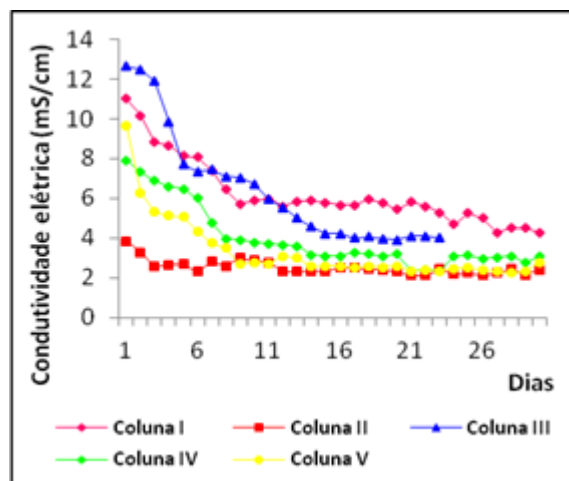


**Figura 6:** Variação do Eh das soluções drenadas das Colunas de lixiviação.

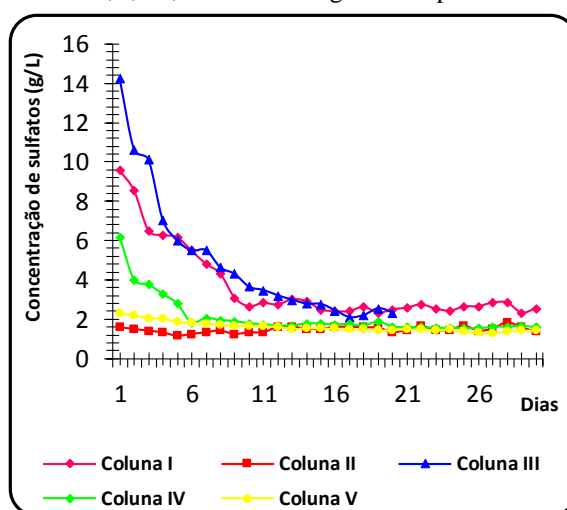
Os valores de Eh (Figura 6) encontrados para as colunas I, III, IV e V oscilaram entre 412,5 e 615,3 mV, indicando um ambiente oxidante, favorecendo a oxidação de sulfetos. Os valores de Eh obtidos, oscilaram fortemente entre -9,5 a 155,4 mV durante os 30 dias de monitoramento, indicando um ambiente redutor. Nota-se que a sua tendência, mesmo após o término do ensaio seria de forte oscilação.

O pH e o Eh são considerados as variáveis principais dos processos geoquímicos para controle da solubilização dos metais pesados. O pH controla a precipitação dos metais através da sua capacidade (concentração de  $H^+$  nas águas) para atacar os minerais das rochas, solos e sedimentos, induzindo a lixiviação e/ou solubilizando seus constituintes.

Nas colunas monitoradas, os valores de CE foram elevados (figura 7), exibindo uma forte redução nos primeiros dias de monitoramento, inclusive para a coluna II. Embora a quantidade e o material em cada coluna sejam diferentes, observa-se que os materiais utilizados possuem elevada condutividade elétrica, da ordem de mS/cm. Esse fato pode ser correlacionado com a grande quantidade de metais e sulfatos que foram lixiviados nas soluções drenadas das colunas.



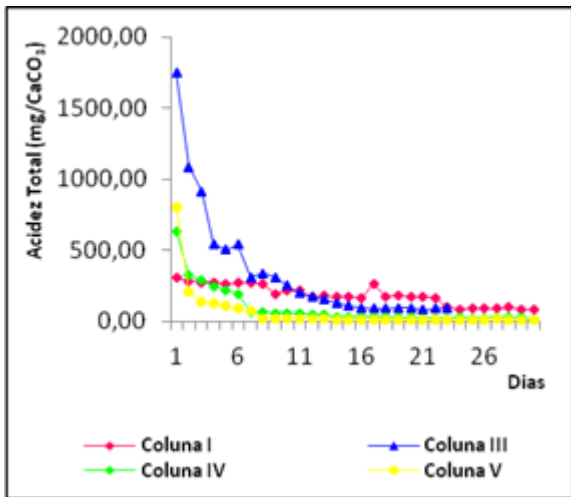
**Figura 7:** Evolução da Condutividade elétrica das colunas I,II, III, IV e V ao longo do tempo.



**Figura 8:** Evolução da quantidade de sulfato presente nas soluções drenadas das colunas I,II, III, IV e V

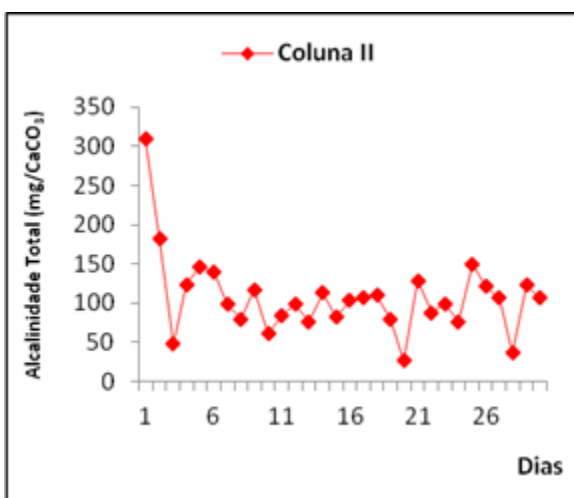
A concentração de sulfato, em todas as colunas, determinada pelo método turbidimétrico foi da ordem de g/L, sendo que em muitos trabalhos relacionados com avaliação do potencial gerador de acidez relataram mg/L. Isso se deve à grande presença de minerais sulfetados na área estudada. O sulfato é um produto direto da oxidação dos sulfetos. Nas colunas I, III, IV e V, houve uma forte queda de concentração nos primeiros dias, destacando-se a eficiência do entulho sobre as reduções e o elevado estado de alteração das amostras, em virtude das elevadas concentrações apresentadas durante os ensaios.





**Figura 9:** Evolução diária de acidez das colunas I, III, IV e V.

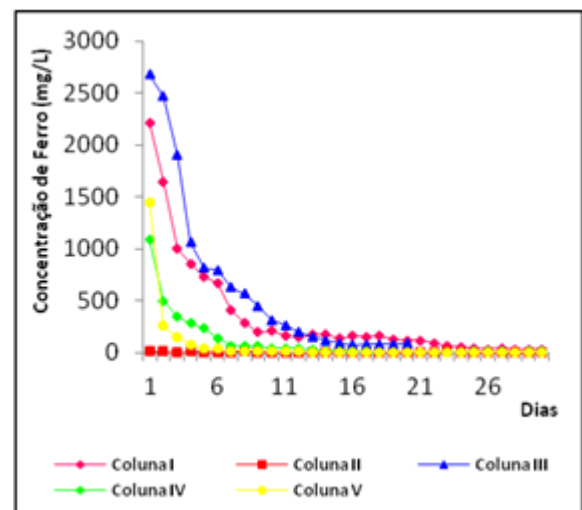
A acidez, geralmente, é o resultado da presença de ácidos fracos e pode ser definida como capacidade da água para neutralizar OH<sup>-</sup>. A utilização do entulho como sistema de cobertura foi eficiente na redução de acidez das colunas analisadas. Nota-se que para as colunas I, III, IV e V, houve um acentuado decréscimo de acidez nos primeiros dias de monitoramento. A acidez das soluções lixiviadas se deu através da elevada quantidade de sulfato presente nas amostras e também pela grande quantidade de metais lixiviados, principalmente Al, Fe e Mn, para as soluções. Esse fato pode ser confirmado pela forte coloração amarela e viscosidade das soluções analisadas, que em pH < 3,5, precipitam o íon Fe<sup>3+</sup> que possui uma coloração amarelo-alaranjado. Ressalta-se a eficiência da camada de entulho sobre o material da mina, que reduziu em mais de 90% a acidez das soluções das colunas III e IV, e que junto com a cal reduziu em 99% o valor da acidez inicial das soluções da coluna V.



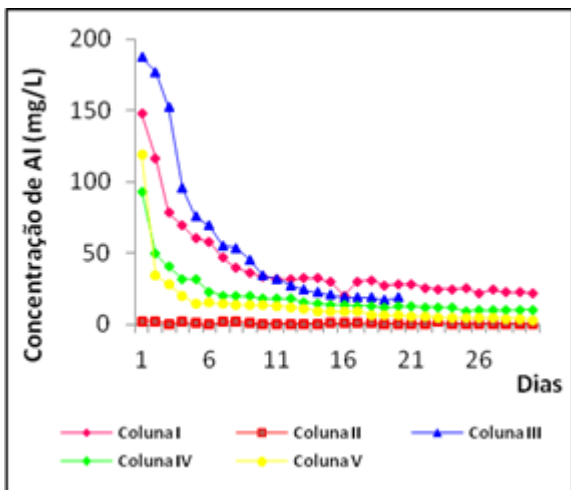
**Figura 10 :** Evolução da alcalinidade das soluções drenadas da coluna II.

A alcalinidade pode ser definida como a capacidade da água em neutralizar ácidos, sendo uma consequência direta, principalmente, da presença ou ausência dos íons hidroxila (OH<sup>-</sup>), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). A alcalinidade também pode ser influenciada pela presença de boratos (BO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) e silicatos (SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) (Guimarães, 2005). Minerais carbonatados existentes nos sedimentos podem então atuar como tampões, exercendo um papel de elevar o valor do pH. A alcalinidade do entulho da coluna II se deve principalmente à presença do calcário contido na composição do cimento, do gesso e dos silicatos detectados pela difração de raio-x (quartzo, muscovita, caulinita e albita).

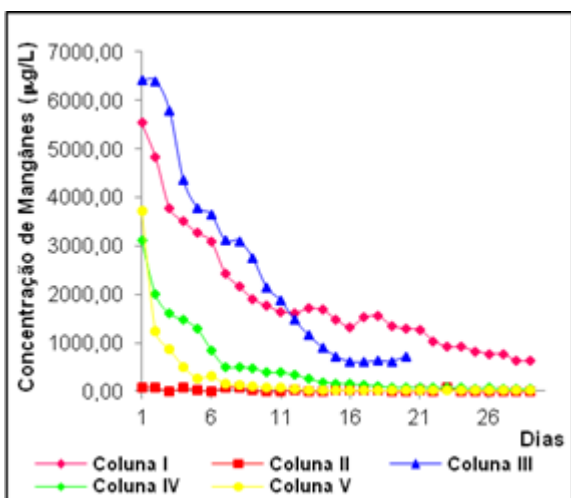
As figuras de 11 a 14 apresentam os resultados das concentrações de metais, considerados importantes no processo da DAM, lixiviados durante o período de monitoramento. Em todas as colunas monitoradas, houve uma expressiva queda da concentração dos metais Fe, Al, Mn e Zn, nas soluções lixiviadas no decorrer dos ensaios. Ressalta-se a semelhança das curvas obtidas, a alta concentração dos metais analisados na coluna III, que possuía uma quantidade inferior de material da mina que a coluna I. Supõe-se que esses altos valores estejam relacionados ao estado de alteração e a granulometria das amostras introduzidas na coluna. (Moraes, 2010b). Mesmo com a elevada lixiviação dos metais, estes se encontram foram dos padrões ambientais considerados no Brasil.



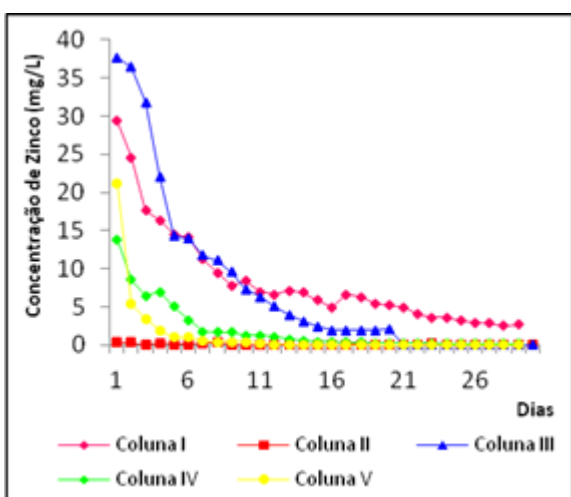
**Figura 11 –** Concentração de ferro das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.



**Figura 12** – Concentração de alumínio das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.



**Figura 13** – Concentração de manganês das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.



**Figura 14** – Concentração de zinco das soluções lixiviadas das colunas I, II, III, IV e V.

Outros metais que apresentaram concentrações significantes não foram descritos neste trabalho, pois apresentaram um certo valor de concentração inicial que no final dos experimentos não foram quantificados devido as suas concentrações serem menores que o limite de detecção dos equipamentos utilizados, são eles: As, Ba, Cd e Pb. É importante considerá-los, pois neste trabalho foram consideradas apenas pequenas quantidades de amostras, e numa quantidade elevada, estes metais podem causar problemas ambientais e também ao ser humano, pois a mina abandonada se localiza próxima a um ribeirão.

## 5. CONCLUSÕES

Frente à necessidade de se encontrar alternativas de se remediar o problema da geração de drenagem ácida, estudou-se nesse trabalho o caso de uma mina abandonada na região de Ouro Preto-MG, com o problema da drenagem ácida já instalado e que faz parte de um contexto de disposição de resíduos de construção civil.

As características locais (geologia com a presença de minerais sulfetados, clima, entre outros) associadas a uma atuação antrópica desordenada, colaboraram para a produção de drenagem ácida resultando num desequilíbrio ambiental manifestado principalmente pela poluição hídrica e contaminação do solo.

O sistema de cobertura seca com entulho de construção civil empregado nas colunas de lixiviação aponta uma alternativa interessante para a remediação da drenagem ácida de mina, uma vez que é de baixo custo para as empresas de mineração e ser uma alternativa interessante para as grandes cidades que não possuem áreas para deposição de entulho de construção.

A acidez das soluções lixiviadas se deu através da elevada quantidade de sulfato presente nas amostras e também pela grande quantidade de metais lixiviados, principalmente Al, Fe e Mn, para as soluções. Ressalta-se a eficiência da camada de entulho sobre o material da mina, que reduziu em mais de 90% a acidez das soluções das colunas III e IV, e que junto com a cal reduziu em 99% o valor da acidez inicial das soluções da coluna V.

É importante considerar outros metais que não foram descritos neste trabalho visto que eles podem causar problemas ao ser humano e ao meio ambiente.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANJOS, J. A. S. A. Avaliação da Eficiência de uma Zona Alagadiça (*Wetland*) no Controle da Poluição por Metais Pesados: o Caso da Plumbum em Santo Amaro da Purificação/BA. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 327p, 2003.
- [2] BENZAAZOUA M., BUSSIÈRE B., DEMERS I., AUBERTIN M., FRIED E., BLIER, A. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*, v.21, p. 330–340, 2008.
- [3] BLOWES, D. W.; PTACEK, C. J.; JAMBOR, J. L. WEISNER, C. G. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. *In: Holland, H. D., Turekian, K. K. (Ed.). Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier B.V., v.9, p.149-204, 2003.
- [4] BORMA, L. S.; SOARES, P. S. M. Drenagem Ácida e Gestão de Resíduos Sólidos de Mineração. *In: Extração de Ouro – Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente*, Rio de Janeiro – RJ, cap.10, p.243-266, 2002.
- [5] EVANGELOU, V. P. Pyrite oxidation and its control: Solution Chemistry, Surface Chemistry, Acid Mine Drainage (AMD), Molecular Oxidation Mechanisms, Microbial Role, Kinetics, Control, Ameliorates and Limitations, Microencapsulation. 293p, 1995.
- [6] GALATTO, S. L.; LOPES, R. P.; BACK, A. J.; BIF, D. Z.; SANTO, E. L. Emprego de coberturas secas no controle da Drenagem Ácida de Mina – Estudos em campo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.12, n.2, p. 229-236, 2007.
- [7] GREENBERG, A. E; CLESCERI, L. S.; EATON, A. D. Standard Methods for the examination or water and wastewater. Washington: American Public Health Association, 18ed. 1992.
- [8] GUIMARÃES, A. T. A. Avaliação Geoquímica Ambiental da Barragem do Ribeirão da Cachoeira, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto – MG. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG, 111p, 2005.
- [9] HESKETH A. H., BROADHURST J. L., HARRISON S. T. L. Mitigating the generation of acid mine drainage from copper sulfide tailings impoundments in perpetuity: A case study for an integrated management strategy. *Minerals Engineering*, v. 23, p. 225–229, 2010.
- [10] IPAT-UNESC - Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Pesquisa e desenvolvimento de metodologias para o controle de drenagem ácida e tratamento de efluentes da indústria carbonífera. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - IPAT. Relatório técnico, Criciúma -SC. 184p, 2000.
- [11] IPAT-UNESC - Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense Desenvolvimento de métodos de tratamento de drenagem ácida de minas de carvão. Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Relatório técnico, Criciúma – SC. 90p, 2001.
- [12] LACOURT, F. Barita e Pirita no Município de Ouro Preto – Minas Gerais. *Revista Mineração e Metalurgia*, Rio de Janeiro – RJ, v.II, n.11, p.298-301, 1938.
- [13] LEITE, A. L. Testes estáticos e cinéticos para previsão e prevenção de drenagem ácida: estudo do caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), Caldas MG. Relatório de Pesquisa. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG. 80p,2009.
- [14] LIMA, A. L. C.. Influência da Presença de sulfetos nos Tratamentos de Fundação da Barragem da UHE Irapé – Vale do Jequitinhonha – MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.Ouro Preto, 229p, 2009.
- [15] MACHADO, L. A. Ensaio Estáticos e Cinéticos para a Prevenção da Geração de Drenagem acida de Minas da Mineração de Carvão com Escoria de Aciaria. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 99p, 2007.
- [16] MACHADO, L.A.; SCHNEIDER, I.A.H. Ensaio Estáticos e Cinéticos para a Prevenção da Geração de Drenagem Ácida de Minas da Mineração de Carvão com Escória de Aciaria. *Revista da Escola de Minas*, v. 61, p. 329-335, 2008.
- [17] MADEIRA, V. S. Aproveitamento de Resíduos da Mineração de Carvão para a Fabricação de Produtos com Elevado Valor Agregado. Tese de Doutorado, Florianópolis (SC), Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.

- [18] MARIANO, T. R. B. Diagnóstico – Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos da Construção civil no Município de Ouro Preto. Monografia de Graduação. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG. 82p, 2008.
- [19] MELLO, J.W.V; ABRAHÃO, W.A.P. Geoquímica da drenagem ácida. In: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS. Viçosa: p. 45-57, 1998.
- [20] MENEZES, J. C. S. S. Produção de Coagulantes Férricos na Mineração de Carvão. Tese de Doutorado, Porto Alegre (RS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009
- [21] MORAES, N. C. Abatimento de Drenagem Ácida de Mina com Entulho de Construção Civil: uma proposta de Reabilitação de uma Antiga Mina de Pirita. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 211p, Ouro Preto - MG. 2010.
- [22] MORAES, N. C. Uso de entulho de construção civil como sistema de cobertura para abatimento de drenagem ácida de minas em antiga mina de pirita. Revista da Escola de Minas, v. 64, p. 213-218, 2011.
- [23] MURTA, F. C. Ensaio de Coluna para a Avaliação Passiva de Drenagem Ácida na Mina de Osamu Utsumi (INB), Caldas/MG. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 127p, Ouro Preto - MG. 2006
- [24] PASTORE, E.L.; MIOTO, J.A. Impactos Ambientais em Mineração com Ênfase à Drenagem Mineira Ácida e Transporte de Contaminantes. Revista Solos e Rochas, São Paulo-SP, v. 23, (1): p. 33-53, 2000.
- [25] PETERSON, M. Produção de Sulfato Ferroso a Partir da Pirita: Desenvolvimento Sustentável. Tese de Doutorado, Florianópolis (SC), Universidade Federal de Santa Catarina. (2008).
- [26] PINTO, A.C.P.; NEPOMUCENO, A.L. Testes de predição e controle do processo de drenagem ácida no rio Paracatu Mineração S.A. In: DIAS, L.E.; MELLO, J.W.V (ed.). Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, MG, p. 59-68. 1998.
- [27] POSSA, M. V.; SANTOS, M. D. C. Tratamento da Drenagem Ácida de Mina por Processo de Neutralização Controlada. Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas, Florianópolis – SC, v.1, p.233-252, 2003.
- [28] REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B., TUNDISI, J. G. Águas doces do Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação – Ecologia. Editora Escrituras, 3ª edição, p.433-460.748p, 2006.
- [29] RITCEY, G. M. Tailings management: problems and solution in the mining industry. Elsevier, Amsterdam, 970p, 1989.
- [30] ROESER, P. A. Avaliação de um Sistema Passivo de Remediação de Drenagem Ácida de Estéril de Urânio. Monografia de Graduação. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG. 78p, 2006.
- [31] RUBIO, J.; TESSELE, F.; PORCILE, P. A MARINKOVIC, E. (2002). Flotación como Processo de Remoción de Contaminantes: Avances e Aplicaciones en la Flotación por Aire Dissuelto. Minerale, Santiago do Chile.v.57,n.243, p. 21-28, 2002.
- [32] SALVIANO, A. B. Avaliação de Escória de Aciaria para o Controle e Abatimento de Drenagem Ácida de Mineração. Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Ouro Preto-MG, 187p, 2010.
- [33] SILVA, R. A. Recuperação Hidrometalúrgica de Metais da Drenagem Ácida de Minas por Precipitação Seletiva. Tese de Doutorado, Porto Alegre (RS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.
- [34] SILVEIRA, A. N.; SILVA, R.; RUBIO, J. Treatment of Acid Mine Drainage (AMD) in South Brazil: Comparative active processes and water reuse. International Journal of Mineral Processing, v.93, n.2, p. 103-109, 2009.
- [35] SOUZA, V. P.; BORMA, L. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de Coberturas Secas Para Controle da Drenagem Ácida em Depósitos Geradores de Acidez. Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas, Florianópolis-SC. v.1, p.253-271, 2003.