

COBERTURAS SECAS COM ESCÓRIA DE ACIARIA VISANDO A NEUTRALIZAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE ROCHAS: ENSAIOS DE COLUNA

Adriana Barbosa SALVIANO¹, Adilson do Lago LEITE²

- (1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, CEP 34400-000 - Ouro Preto (MG), Brasil. Endereço eletrônico: adrianasalviano@yahoo.com.br.
(2) Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, CEP 34400-000 - Ouro Preto (MG), Brasil. Endereço eletrônico: adilsonlagoleite@gmail.com; alleite@em.ufop.br.

Introdução
Materiais e métodos
Amostragem
Caracterização dos Materiais
Ensaio de Lixiviação
Análise Química do Lixiviado
Resultados e discussões
Caracterização das Amostras
Ensaio de Lixiviação
Parâmetros físico-químicos
Parâmetros químicos
Metais
Considerações finais
Agradecimentos
Bibliografia

RESUMO - A drenagem ácida de rochas (DAR) se configura hoje num grande problema ambiental, atingindo principalmente a mineração e a construção civil. O objetivo deste estudo é investigar a possibilidade de aplicação da escória de aciaria, um importante resíduo sólido da indústria metalúrgica, para a construção de coberturas secas reativas em pilhas de estéril contendo rochas ácidas. Para isto foram utilizados ensaios laboratoriais de lixiviação em colunas, tendo como material gerador ácido amostras provenientes da Mina de Urânio Osamu Utsumi, Caldas MG, pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil S/A. Quatro diferentes cenários construtivos foram testados, com diferentes proporções de escória, cal hidratada e resíduo sólido ácido. Os resultados demonstraram o grande potencial neutralizador da escória, onde sua alcalinidade superou a cal hidratada. Apesar de alguns fatores construtivos ainda necessitarem avaliação, abre-se aqui uma boa perspectiva para o uso da escória de aciaria em coberturas secas, conferindo a este resíduo uma nobre destinação.

Palavras-chave: drenagem ácida de rocha, colunas de lixiviação, coberturas secas reativas, escória de aciaria, pilhas de estéril.

ABSTRACT - Acid rock drainage (ARD) constitutes a critical environmental issue, particularly for mining and civil construction. The purpose of this research is to investigate the use of steel slag, an important solid waste from the metallurgical industry, as part of a reactive dry cover design on acidic solid waste piles. Laboratory leaching tests were performed in plastic columns, using samples from the Osamu Utsumi Uranium Mine, Caldas MG, possessed by the Indústrias Nucleares do Brasil S.A. Four different cover scenarios were applied, using different proportions of steel slag, hydrated lime and acid rock sample. The results have demonstrated the great neutralizing potential of the steel slag, which exceeded the hydrated lime. Some other constructive features should be addressed for dry cover design, however the present study opens a reasonable perspective for a noble destination of steel slag.

Keywords: acid rock drainage, leaching columns, reactive dry covers, steel slag, waste rock piles.

INTRODUÇÃO

A drenagem ácida de rochas (DAR) constitui-se hoje em um dos grandes problemas ambientais gerados por escavações em rochas sulfetadas. Ela atinge não só a mineração de carvão e metais não ferrosos, como também a construção civil (barragens, cortes para pavimentos etc).

A geração ácida se dá pela oxidação dos sulfetos presentes nas rochas, tais como a pirita (FeS_2), a pirrotita (Fe_{1-x}S) e outros, quando expostos à ação da água e do oxigênio atmosférico (O_2). O processo pode ser catalisado por bactérias acidófilas (e.g. *Thiobacillus ferrooxidans*), capazes de

oxidar o íon Fe^{2+} em íon Fe^{3+} , que passa a ser o principal agente oxidante dos minerais sulfetados (DOYE & DUCHESNE, 2003, p. 1197 – 1213). Em termos composicionais, a drenagem ácida se constitui principalmente por ácido sulfúrico (H_2SO_4), o qual lixívia os depósitos minerais pelos quais ela percola, carreando consigo grandes quantidades de metais, tais como o Cu, Ni, Cd, Zn, Pb, Cr, Fe, Hg, Mn, etc. As águas contaminadas pelos referidos metais podem alcançar corpos d'água superficiais ou subterrâneos, degradando sua qualidade (EVANGELOU, 1995; LÓPEZ et al, 2007).

O combate à DAR se inicia pela correta previsão de sua existência, pela prevenção e pela posterior remediação de sítios contaminados (EVANGELOU, 1995). A previsão do potencial ácido e da lixiviação de metais são ferramentas que auxiliam no planejamento de métodos de proteção ambiental (MEND, 2009). A prevenção busca tratar química, física ou biologicamente os sítios para minimizar a geração ácida em sua fonte. As tecnologias de remediação envolvem a contenção e/ou tratamento da água e sedimentos ácidos. Os agentes neutralizantes mais utilizados são o calcário, a cal virgem ou hidratada e o hidróxido de sódio. Quando aplicáveis, as tecnologias de prevenção são menos dispendiosas que o tratamento da DAR em curso.

Os sistemas de coberturas secas têm grande aplicação em países como Estados Unidos, Austrália e Canadá, objetivando principalmente a redução da infiltração da água pluviométrica e a redução do ingresso de oxigênio nas massas sulfetadas. Tal objetivo é alcançado por meio do controle do grau de saturação do sistema de cobertura, mantido em níveis próximos a 80%. Se por um lado o aumento da umidade nos poros diminui o ingresso de oxigênio, sua completa saturação (100%) resulta na maior infiltração da água pluviométrica.

Por outro lado, a adição de agentes alcalinizantes aos sistemas de cobertura propicia uma função a mais, na medida em que a lixiviação dos álcalis pode alcançar a massa sulfetada, reduzindo a acidez das águas em sua fonte. Como a infiltração de água é controlada pela cobertura, esta neutralização se dá de forma lenta, possuindo um caráter mais preventivo que remediativo. Os aditivos normalmente utilizados são o calcário, a cal virgem e menos frequentemente a escória de aciaria.

A escória de aciaria é um resíduo sólido industrial resultante do processo de conversão do ferro gusa líquido e da sucata em aço, realizada em conversores a oxigênio. A composição usual da escória do tipo LD é

descrita na literatura como larnita, ferrita cálcica, wustita, cal virgem, periclásio, portlandita e calcita, confirmando o seu caráter alcalino (CASCUDO & HELENE, 2000; SILVA, 2005; SIMMONS et al, 2002; SALVIANO, 2010; YAN et al, 1999). Estima-se uma geração de 70 a 170 kg de escória por tonelada de aço produzido (FERNANDES, 2009). Ao se considerar uma produção de 32,9 milhões de toneladas de aço no Brasil, a produção anual de escória no país giraria em torno de 3,29 a 4,93 milhões toneladas, as quais demandam destinação adequada (AÇO BRASIL, 2011).

São exemplos de aplicação da escória: na agricultura como fertilizante (DZIARGOWSKI et al, 1992); em obras de engenharia, principalmente na área de pavimentação (MOTZ & GEISELER, 2001); na produção de cimento portland (MONTGOMERY & WANG, 1991) e como lastro de ferrovia (PIMENTA & LIMA, 2003). MACHADO (2000) relata que atualmente no Brasil aproximadamente 40% da escória de aciaria é destinada à sub-base de rodovias e 56% é estocada, sem destinação imediata. A possível incorporação da escória na neutralização da drenagem ácida abre uma perspectiva de destinação a este resíduo industrial, promovendo um “ganho” ambiental significativo (IBIS, 2007; MACHADO, 2000).

Estudos laboratoriais e de modelagem matemática realizados por YAN et al (1999) demonstraram que a escória de aciaria apresenta potencial de neutralização ácida em curto e longo prazo. SIMMONS et al (2002) relatam a efetividade da escória em camadas de lixívia de calcário e escória para a neutralização em uma bacia de rejeitos ácidos na região da Pensilvânia, EUA. MACHADO & SCHNEIDER (2008) estudaram a disposição conjunta de escória de aciaria com rejeito de carvão; testes ABA tradicional e modificado foram aplicados, além de ensaios cinéticos pelo método de células úmidas, as quais resultaram num lixiviado com pH entre 3,0 e 5,0, baixa acidez e concentrações reduzidas de metais (Fe, Al, Mn e Zn) e SO_4^{2-} . ALMEIDA & LEITE (2011) reportam os resultados de ensaios laboratoriais em colunas de lixiviação em rejeito piritoso, relatando a redução considerável da

acidez da DAR com o uso de 33% em peso de escória de aciaria.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o potencial neutralizante da escória de aciaria em um sistema de cobertura seca, sem controle de saturação. Esta condição representaria uma falha no controle hidráulico do dispositivo, expondo a massa sulfetada à infiltração direta da pluviometria. Para isto foram realizados ensaios de lixiviação em colunas de laboratório, simulando sistemas de coberturas secas constituídas por estéril de um dos bota-foras da mina Osamu Utsumi e escória de aciaria em diferentes porções.

A mina Osamu Utsumi, localizada no município de Caldas MG, operou de 1982 até 1995, sendo a primeira produtora de urânio do Brasil, e que hoje se encontra em processo de

descomissionamento. A geração de DAR foi percebida desde os primeiros trabalhos de decapeamento da mina, ocorrendo em diversos compartimentos daquela unidade mineradora, incluindo o lago da cava, os pátios de estocagem, a barragem de rejeitos e os bota-foras (oito, no total). Desde então diversas ações de combate a DAR têm sido adotadas, incluindo principalmente seu tratamento por meio da adição de agentes neutralizantes, principalmente a cal hidratada e o cloreto de bário. Assim, as perspectivas são boas para a aplicação de coberturas secas nos bota-foras desta mina, considerando que a previsão de geração de DAR é de alguns séculos, e a opção da continuidade do tratamento reportado se tornará inviável para este grande espaço de tempo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem

As amostras de escória são oriundas da USIMINAS (Ipatinga, MG), geradas a partir do processo LD. A coleta foi feita diretamente em vagões ferroviários durante o recebimento do material utilizando-se os procedimentos indicados na norma ABNT NBR 11541, totalizando cerca de 5.000 kg.

As amostras de estéril, por sua vez, foram coletadas na Mina Osamu Utsumi, mais precisamente no bota-fora BF-4, atualmente pertencentes às Indústrias Nucleares do Brasil S/A, em Caldas MG. A coleta foi feita em três taludes distintos do referido bota-fora, há aproximadamente 30 cm abaixo da superfície do terreno, totalizando 300 kg. Após a coleta, em laboratório, as amostras foram secas à sombra, destorroadas, homogeneizadas, peneiradas em malha de 4 mm de abertura, e por fim quarteadas. Por razões operacionais, constituiu-se uma única amostra composta, chamada de estéril.

Reconhece-se de antemão a dificuldade em se obter uma amostra totalmente representativa deste bota-fora, que possui aproximadamente 12 milhões de m³. Seu expressivo volume e heterogeneidade (disposição pelo “método de ponta de aterro”) tornam muito difícil essa tarefa.

Caracterização dos Materiais

Abaixo seguem os ensaios físicos, químicos e mineralógicos aplicados para a caracterização das amostras de escória e estéril, bem como as referências utilizadas para tal. A amostra de cal hidratada utilizada para compor os sistemas de cobertura foi somente caracterizada mineralogicamente por meio de difração de raios-X.

- Espectrometria de Emissão Atômica (ICP);
- Difração de Raios-X;
- Microscopia Eletrônica de Varredura-Espectrometria de Energia Dispersiva (MEV – EDS);
- Potencial hidrogeniônico (pH) e Δ pH (CAMARGO et al 1986, p. 3);
- Condutividade Elétrica (CE) (CAMARGO et al 1986, p. 18);
- Capacidade de troca catiônica (CTC) e superfície específica (SE) (PEJON, 1992);
- Solubilização e Lixiviação (ABNT-NBR 10004 e 10005);
- Análise granulométrica conjunta (ABNT-NBR 7181).

A dosagem de metais das amostras de estéril e escória após digestão ácida foi feita em Espectrofotômetro de Emissão Óptica com

Fonte Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), marca *Spectro*, modelo *Ciros CCD*.

Para a Difração de Raios-X, as amostras foram pulverizadas em diâmetros menores que 200 mesh (0,074 mm). O equipamento utilizado foi um difratômetro da marca Rigaku, modelo D/MAX-B, com tubo de cobre, intervalo de varredura de 2 a 70° e radiação de 4° KV e 15 µA. A velocidade adotada no ensaio foi de 1,2 graus/minuto, com duração total de 70 min.

Para o MEV-EDS, as amostras também foram pulverizadas em diâmetros menores que 20 (MEV) e 200 mesh (EDS), sendo posteriormente recobertas com uma película micrométrica de ouro. O equipamento aplicado foi da marca JEOL, modelo JSM 5510.

As determinações do pH, ΔpH ($\text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) e CE foram feitas em medidor de pH e condutímetro Digicrom Analytical DM-22, da marca Digimed. Os parâmetros CTC e SE foram obtidos utilizando-se do método de adsorção de azul de metileno em papel filtro, descrito em PEJON (1992).

Ensaio de Lixiviação

A Figura 1 mostra o esquema construtivo das colunas utilizadas nos ensaios de lixiviação, as quais podem ser divididas em três partes principais: reservatório inferior, tampa superior, construídos em PVC, e a coluna de amostra, construída em acrílico. Todo o conjunto foi fixado por hastes e borboletas de latão.

Os ensaios receberam as denominações de B₁, C₁, C₂ e C₃ e suas principais características são apresentadas na Tabela 1. O item “compactação ao final do ensaio” nessa tabela se refere à redução de volume da amostra devido ao umedecimento decorrente da percolação, a qual é comumente designada de “compactação hidráulica” em geotecnia. A amostra de estéril aplicada nesses ensaios foi peneirada em malha 36 mm, para garantir que a maior partícula de estéril dentro da coluna tivesse diâmetro 4 vezes menor do que o diâmetro interno desta. Com exceção do ensaio B₁, diferentes sistemas de cobertura seca foram aplicados nos ensaios C₁, C₂ e C₃. A escória utilizada no sistema de cobertura dos ensaios C₁, C₂ e C₃ foi previamente pulverizada e peneirada em fração < 200 mesh (0,074 mm).

Entre o sistema de cobertura e a coluna de estéril foi colocado um anteparo circular de plástico PET todo perfurado entre ambos, assim como um filtro geotêxtil para se evitar a passagem de finos e a colmatação da amostra. A adição de estéril, escória e cal nas colunas foi feita com movimentos leves e circulares, de maneira a se prevenir a quebra indesejada de partículas.

A Tabela 1 mostra que o volume total de água destilada - deionizada influente foi 27,44 litros, calculado com base na área da seção transversal interna da coluna e na precipitação média anual medida na Mina Osamu Utsumi, que segundo FAGUNDES (2005, p. 84), é de 1430 mm. Considerando a duração de 40 dias de ensaio, o volume diário de água adicionado foi de 686 mL, de forma manual. A água de alimentação possuía pH muito próximo da neutralidade. O monitoramento do lixiviado foi feito para os parâmetros pH, Eh, condutividade elétrica, sulfatos e metais em frequência diária, com excessão dos finais de semana.

Análise Química do Lixiviado

Abaixo segue um resumo com os métodos aplicados para análise do lixiviado e suas respectivas referências:

- Metais: Espectrometria de Emissão Atômica (ICP);
- sulfato: turbidímetro (APHA, 1985);
- acidez: titulometria (APHA, 1992);
- potencial hidrogeniônico e ΔpH (CAMARGO *et al.* 1986, p. 3);
- condutividade Elétrica (CE) (CAMARGO *et al.* 1986, p. 18);
- potencial de Oxi-redução (Eh) (CAMARGO *et al.* 1986, p. 19).

Os metais analisados foram Al, As, Ba, Be, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Sr, Y e Zn por Espectrofotometria de Emissão Óptica com Fonte Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), marca *Spectro*, modelo *Ciros CCD*. O espectrofotômetro utilizado para as determinações de sulfato era da marca Micronal, modelo B250. As medidas de pH, CE e Eh foram realizadas em um aparelho Digicrom Analytical DM-22, da marca Digimed.

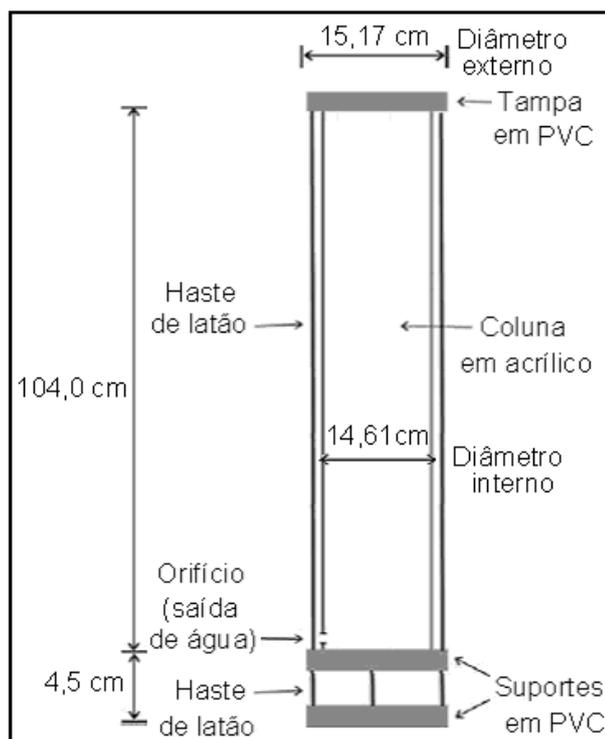


Figura 1. Esquema construtivo da coluna utilizada nos ensaios de lixiviação.

Tabela 1. Resumo das principais características dos ensaios B₁, C₁, C₂ e C₃.

Características	B₁	C₁	C₂	C₃
Massa seca de estéril (kg)	10,547	10,547	10,547	10,547
Tipo de cobertura (proporções em massa seca)	---	escória pura	escória (10%) + estéril (90%)	cal hidratada (10%) + estéril (90%)
Comprimento inicial da cobertura (cm)	---	5	17	17
Comprimento inicial da amostra (cm)	69,3	69,3	69,3	69,3
Massa seca de escória (kg)	---	1,054	0,656	-
Massa seca de cal (kg)	---	---	---	1,729
Teor de umidade gravimétrico do estéril (%)	15,7	15,7	15,7	15,7
Teor de umidade gravimétrico da escória (%)	---	0,8	0,8	---
Teor de umidade gravimétrico da cal (%)	---	---	---	0,5
Volume percolado (L)	27,4	27,4	27,4	27,4
Compactação ao final do ensaio (%)	23	18	15	20
Massa específica amostra+cobertura antes da percolação (g/cm ³)	0,91	0,93	0,94	1,01

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização das Amostras

Na Tabela 2 é apresentado um resumo da

caracterização física, físico-química e mineralógica das amostras.

Tabela 2. Características físicas, físico-químicas e mineralógicas das amostras.

Material	Estéril	Escória	Cal Hidratada
Metais presentes em maior proporção	Al (160054,7 mg/kg), K (76204,33 mg/kg), Fe (36212,67 mg/kg), Ti (4092,667 mg/kg) e Zr (1963,333 mg/kg).	Ca (294063 mg/kg), Fe (241094 mg/kg), Mg (81724 mg/kg), Mn (28315 mg/kg) e Al (17774 mg/kg).	---
Mineralogia	Ortoclásio, caulinita, flogopita, muscovita, gibsita e goetita.	Portlandita, traços de brucita, calcita e quartzo.	Calcita em grande proporção, silicato de cálcio, mervinita, magnetita, ferritadicálcica, ferrita cálcica, wustita, óxido de lítio manganês e ferro, dióxido de silício, monóxido de cálcio, gibsita e periclásio.
pH em água	4,68	12,51	12,7
Δ pH	-1,22	0,13	0,23
CE do extrato aquoso	252,37 μ S/cm	252,53 μ S/cm	-
CTC	0,9 cmol/kg	-	-
SE	6,9 m ² /g	-	-
Resíduo Sólido	-	Classe II A	-

Os valores positivos de Δ pH indicam a predominância de cargas positivas nas superfícies das amostras de escória e cal hidratada e vice-versa. Desta maneira, percebe-se que a amostra de estéril possui a predominância de cargas negativas em sua superfície, enquanto as amostras de cal e escória a predominância de cargas positivas. Os valores de CTC e SE da amostra de estéril indicam baixa reatividade.

Os resultados dos ensaios de solubilização e lixiviação mostram que a escória pode ser considerada um resíduo não corrosivo, classe II A (Não Perigoso - Não Inerte), segundo a Norma NBR 10004 da

ABNT, por apresentar teor de bário na amostra solubilizada acima do limite máximo permitido.

Ensaio de Lixiviação

Parâmetros físico-químicos

As figuras 2, 3 e 4 apresentam os parâmetros físico-químicos do lixiviado de todos os ensaios, incluindo o pH, o Eh e CE.

O ensaio B₁ (sem cobertura) apresentou valores de pH que pouco variaram ao longo do tempo, situando-se entre 4,12 e 4,68. Estes valores demonstram a acidez pré-existente da amostra de estéril, o que era esperado em função do seu estado avançado de intemperismo no local onde foi coletada.

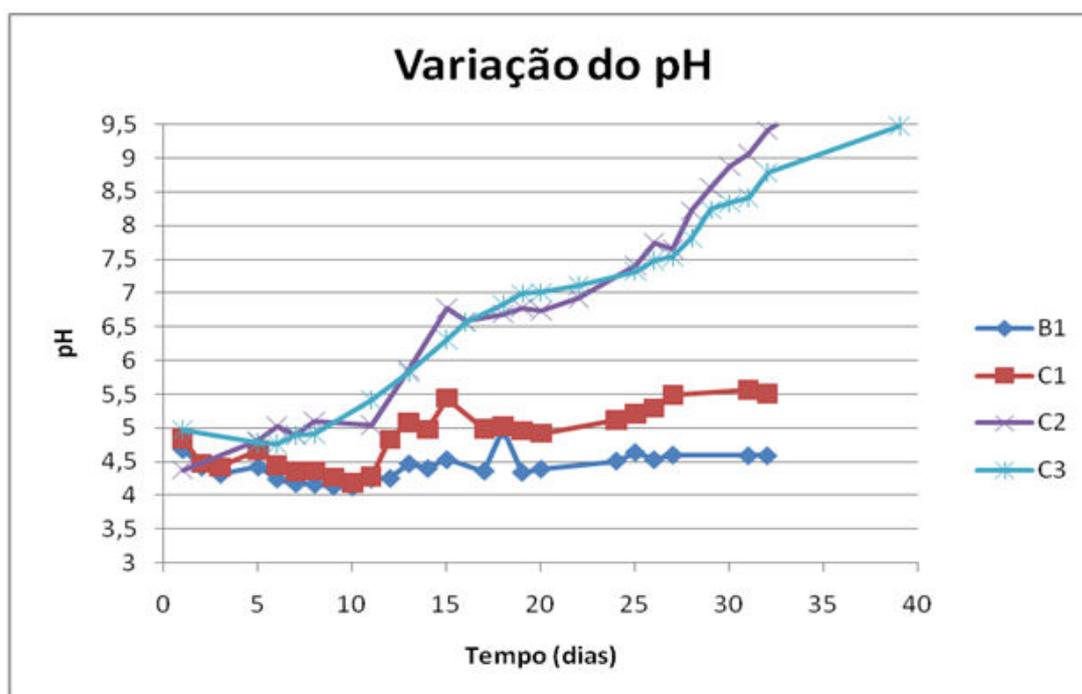


Figura 2. Evolução do pH nos ensaios B₁, C₁, C₂ e C₃.

O ensaio C₁ apresentou uma variação total de pH de 4,28 a 5,56, cerca de um ponto acima do ensaio B₁, fato que demonstra o efeito da cobertura de escória sobre o lixiviado. No entanto, não se nota tendência de aumento do pH neste ensaio.

Nos ensaios C₂, com cobertura de escória, e C₃, com cobertura de cal hidratada, foi possível se observar o aumento do pH desde o início, alcançando valores máximos da ordem de 10 ao final da lixiviação. Tais valores demonstram a eficiência dos aditivos aplicados em termos da elevação do pH. De maneira geral é possível se verificar a semelhança entre os gráficos das colunas C₂ e C₃, indicando semelhante eficiência da escória em relação à cal hidratada para aumentar o pH do lixiviado. A espessura das coberturas dos ensaios C₂ e C₃ apresentavam comprimentos maiores (cerca de 3 vezes) do que a cobertura do ensaio C₁, e talvez este fator também tenha contribuído para a maior eficiência da cobertura dos ensaios C₂ e C₃. Infere-se que maiores comprimentos das coberturas acarretam maiores tempos de trânsito do lixiviado, resultando em maior solubilização dos álcalis presentes.

É preciso salientar que os aumentos de pH relatados se referem ao tempo de ensaio aplicado, de forma que o comportamento das coberturas em maiores prazos ainda deve ser melhor investigado. Certamente em maiores

tempos haverá maior consumo dos álcalis e a eficiência das coberturas poderá ser comprometida.

A Figura 3 apresenta o monitoramento do Eh em todos os ensaios. As oscilações observadas no ensaio B₁ podem ser devidas à liberação e posterior hidrólise dos íons férricos (forte oxidante) quando da oxidação da pirita. De qualquer maneira, reconhece-se uma tendência de diminuição deste parâmetro ao longo da lixiviação.

As curvas dos ensaios B₁ e C₁ são bastante semelhantes, principalmente até o 26º dia, com uma leve tendência de diminuição do Eh com o tempo. A curva do ensaio C₁ mostra uma tendência de incremento deste parâmetro no início do ensaio, e decréscimo após o décimo quinto dia, fato que deve estar relacionado à liberação em solução dos materiais alcalinos presentes no sistema de cobertura presente neste ensaio. Estes, por sua vez, retirariam prótons (H⁺) do meio, diminuindo a oxidação da pirita e a oxidação do íon ferroso, e conseqüentemente haveria menos íons férricos oxidantes em solução, tornando o meio mais redutor.

Nos ensaios C₂ e C₃, desde o início há uma tendência de diminuição no valor de Eh. As mesmas considerações tecidas para explicar o comportamento do Eh no ensaio C₁ podem ser aplicadas aos ensaios C₂ e C₃.

A tendência geral observada de CE é de decréscimo ao longo tempo. Para o ensaio B₁ observa-se um decréscimo razoavelmente constante no início do ensaio e diminuição ao final, enquanto o ensaio C₁ mostra uma tendência de incremento o no início, e decréscimo após o terceiro dia. Esse comportamento pode estar relacionado à solubilização dos íons presentes no sistema de cobertura deste ensaio. A curva de CE para o ensaio C₁ mostra uma tendência de incremento deste parâmetro no início, e decréscimo após o terceiro dia, o que pode estar relacionado à solubilização dos íons presentes no sistema de cobertura deste ensaio (10% escória e 90% estéril).

Desde o início há uma tendência de diminuição no valor de CE nos ensaios C₂ e C₃. No entanto, a taxa de diminuição é um pouco menor no ensaio C₃ em relação ao C₂ e esse comportamento pode ser explicado pelo fato do pH inicial do ensaio C₂ ser ligeiramente maior do que o pH inicial do ensaio C₃.

De acordo com MACÊDO (2004), os valores de CE obtidos classificam os lixiviados dos ensaios B₁ e C₁ como poluídos, pois são

superiores a 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$. O lixiviado do ensaio C₃, por sua vez, é ligeiramente poluído e do ensaio C₂ não pode ser classificado como poluído.

Parâmetros químicos

As figuras 5 e 6 apresentam respectivamente a acidez e o sulfato do lixiviado em função do tempo para todos os ensaios. De maneira geral há uma tendência de diminuição da acidez ao longo do tempo em todos os ensaios, principalmente a partir do vigésimo dia. Adicionalmente, a acidez dos ensaios C₁, C₂ e C₃ é menor em relação ao ensaio B₁, o que comprova a eficiência dos sistemas de cobertura na redução deste parâmetro, com destaque para os ensaios C₂ e C₃.

As curvas do sulfato (Figura 6) do lixiviado demonstram decréscimo ao longo do tempo em todos os ensaios. Cabe destaque para a forma das curvas, que são muito semelhantes para os ensaios B₁ e C₁, e também para os ensaios C₂ e C₃, considerando as concentrações iniciais.

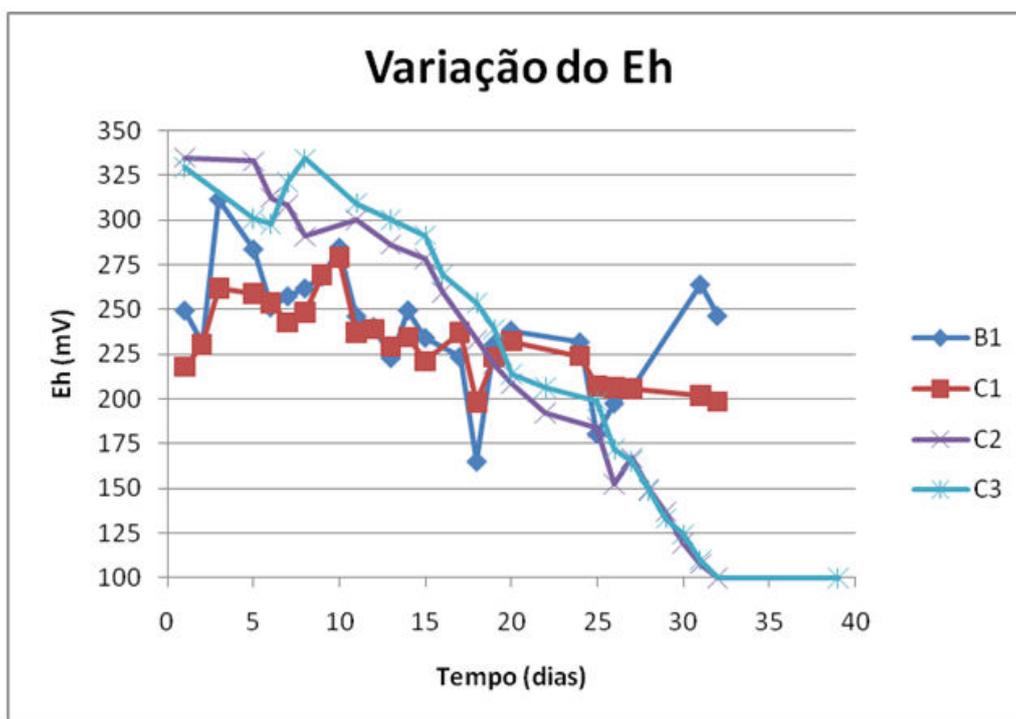


Figura 3. Eh em função do tempo nos ensaios B₁, C₁, C₂, e C₃.

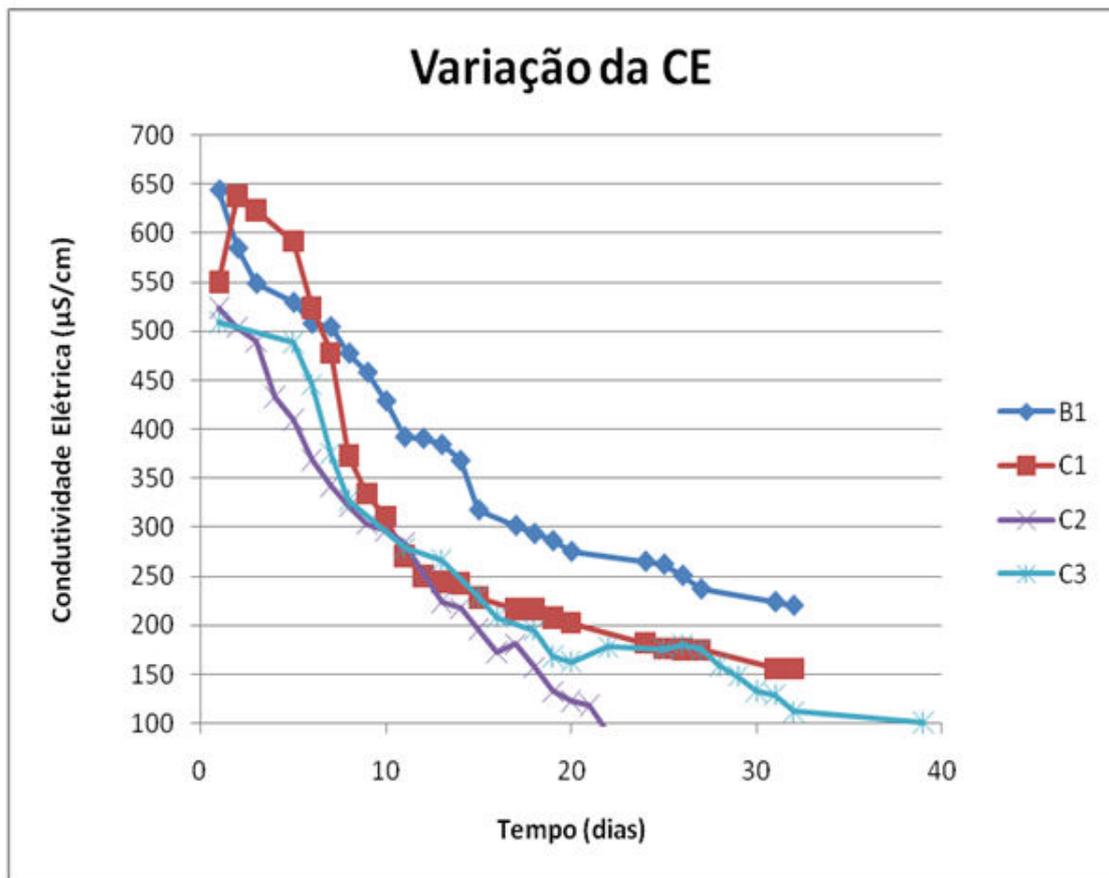


Figura 4. CE nos ensaios B₁, C₁, C₂ e C₃.

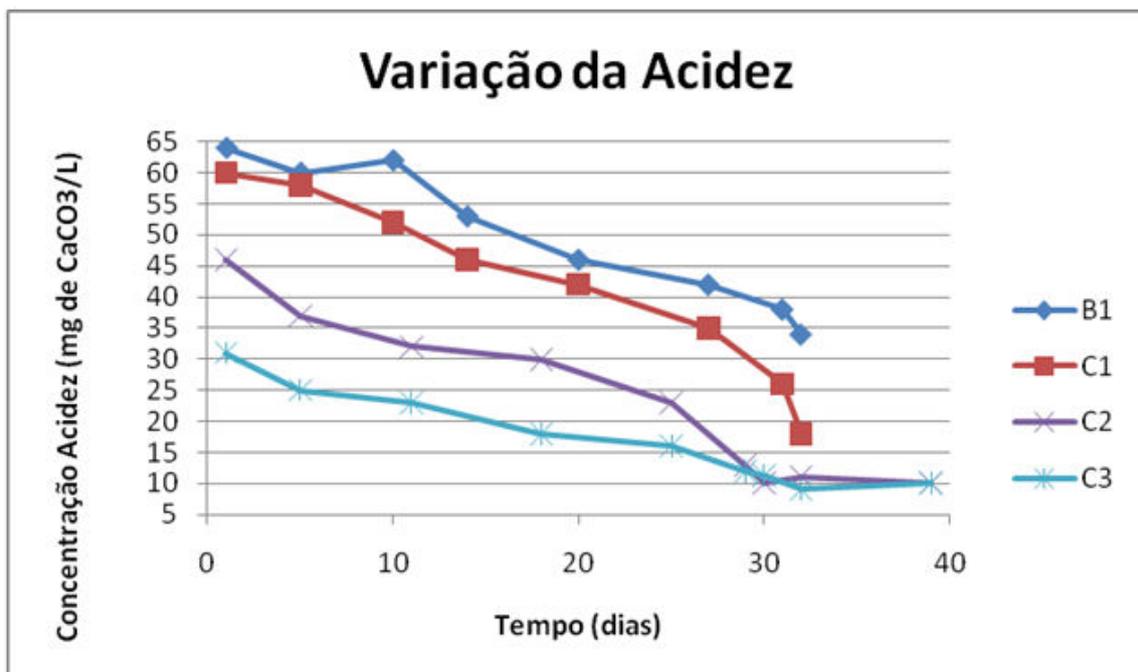


Figura 5. Acidez do lixiviado dos ensaios B₁, C₁, C₂ e C₃.

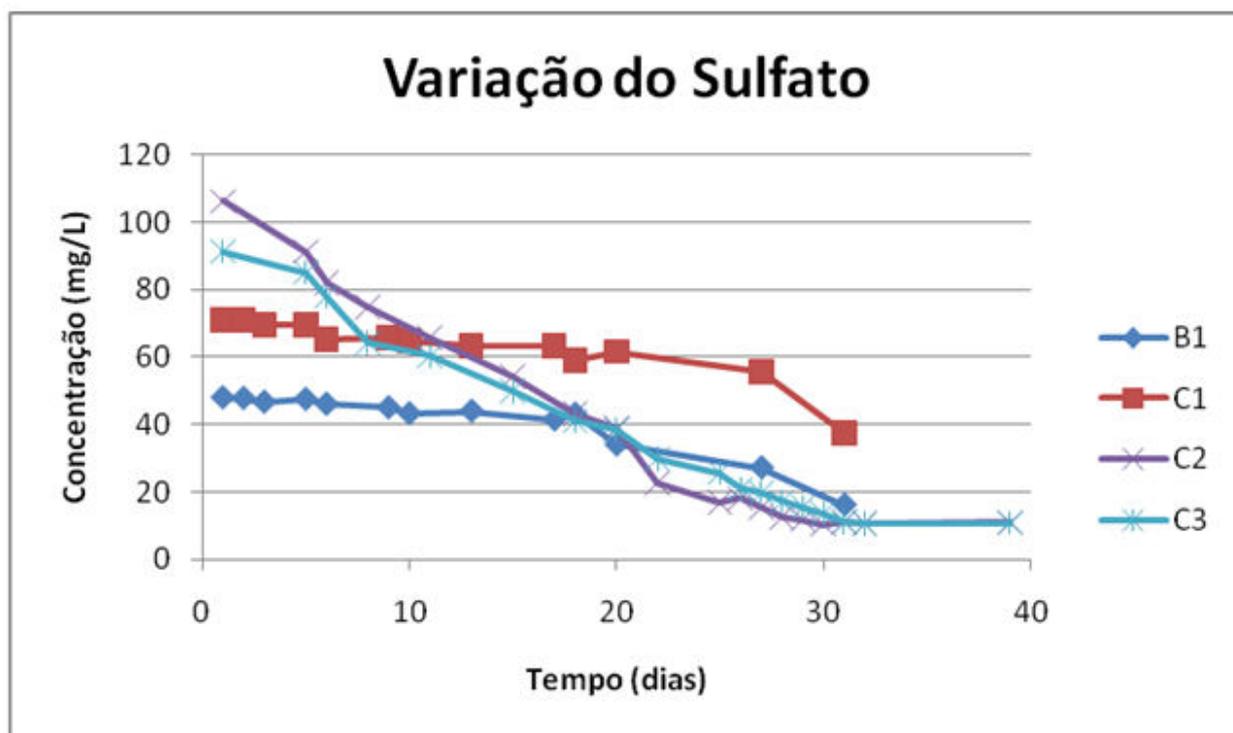


Figura 6. Concentração de SO_4^{2-} nos ensaios B₁, C₁, C₂ e C₃.

Metais

As concentrações de Al, As, Ba, Be, Co, Cu,

Fe, Li, Mn, Ni, Pb e Zn ao longo do tempo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Concentrações de metais em função do tempo.

Metais	Concentração de metais (mg/L)				Tempo de lixiviação (dias)
	Ensaio B ₁	Ensaio C ₁	Ensaio C ₂	Ensaio C ₃	
Al	17,679	15,740	24,360	12,694	1
	13,039	11,139	20,532	8,382	10
	5,662	5,666	13,115	6,691	20
	3,957	3,965	7,399	3,222	30
	-	-	2,979	2,330	40
As	0,611	0,429	1,278	0,349	1
	0,328	0,247	0,788	0,182	10
	0,097	0,122	0,424	<LD	20
	-	-	<LD	<LD	30
	-	-	<LD	<LD	40
Ba	0,070	0,074	0,104	0,076	1
	0,067	0,059	0,071	0,076	10
	0,053	0,053	0,067	0,071	20
	0,051	0,052	0,051	0,059	30
	-	-	0,016	0,051	40
Be	0,010	0,008	0,007	0,008	1
	0,007	0,007	0,006	0,007	10

	0,006	0,005	0,006	0,006	20
	0,004	0,005	0,003	0,004	30
	-	-	0,002	0,003	40
Co	0,031	0,039	0,025	0,016	1
	0,015	0,020	0,025	<LD	10
	0,015	0,015	0,016	<LD	20
	0,015	0,015	0,015	<LD	30
	-	-	<LD	<LD	40
Fe	0,024	0,179	0,024	<LD	1
	<LD	<LD	0,017	<LD	10
	<LD	<LD	0,016	<LD	20
	<LD	<LD	<LD	<LD	30
	-	-	<LD	<LD	40
Li	0,006	0,008	0,005	0,006	1
	0,005	0,005	0,005	0,005	10
	0,004	0,004	0,005	0,005	20
	0,003	0,003	0,003	0,003	30
	-	-	<LD	0,002	40
Mn	20,118	22,117	15,226	20,769	1
	8,305	6,577	12,031	12,153	10
	4,730	4,218	8,861	9,111	20
	3,571	3,339	1,932	3,215	30
	-	-	0,650	1,274	40
Ni	0,082	0,106	0,095	0,065	1
	0,036	0,041	0,053	0,052	10
	<LD	<LD	0,037	<LD	20
	<LD	<LD	<LD	<LD	30
	-	-	<LD	<LD	40
Pb	0,482	1,034	0,155	0,153	1
	0,167	0,190	<LD	<LD	10
	0,178	0,144	<LD	<LD	20
	<LD	<LD	<LD	<LD	30
	-	-	<LD	<LD	40
Zn	6,235	10,556	5,784	9,158	1
	2,850	3,436	5,447	6,729	10
	1,586	1,921	3,958	4,977	20
	1,194	1,416	1,280	1,897	30
	-	-	0,347	1,318	40

LD = abaixo do limite de detecção do ICP.

Inicialmente, o ensaio B₁ apresentou as maiores concentrações de Be e Fe, C₁ de Co, Li, Mn, Ni, Pb e Zn, C₂ de Al e As, e C₃ de Ba,

Be, Li, Mn e Zn. Quando os ensaios foram encerrados B₁ apresentava a maior concentração de Mn, C₁ apresentava as maiores

concentrações de Al e Be, C₂ apresentava a maior concentração de As e C₃ apresentava as maiores concentrações de Ba, Li e Zn.

Ao final do experimento não foi possível quantificar as concentrações dos elementos As, Cu, Fe, Ni, P, Pb, Ti e V porque essas se encontravam abaixo do limite de detecção do método.

As concentrações máximas de metais obtidas no lixiviado são apresentadas na Tabela 4. Elas foram comparadas com o padrão para o lançamento de efluentes COPAM-CERH 01/2008 (Classe I).

Para facilitar a comparação entre as concentrações, a Tabela 4 foi preenchida com

diferentes tonalidades, de modo que as mais fortes indicam maiores concentrações. Adicionalmente, os valores sublinhados estão acima do valor máximo permitido conforme o referido padrão.

Inicialmente as concentrações de Al (todos os ensaios), As (todos os ensaios), Cd (todos os ensaios), Cu (todos os ensaios), Mn (todos os ensaios), Ni (todos os ensaios) V (ensaio C₂) e Zn (todos os ensaios) se encontravam acima do permitido. Ao final da lixiviação, apenas as concentrações de Al (colunas C₂ e C₃) e Mn (coluna C₃) não se enquadravam no referido padrão.

Tabela 4. Concentrações máximas de metais nos lixiviados dos ensaios B₁, C₁, C₂ e C₃ e padrão para lançamento de efluentes COPAM-CERH 01/2008.

Metais	Concentração de metais (mg/L)				Valor máximo permitido
	Coluna B ₁	Coluna C ₁	Coluna C ₂	Coluna C ₃	
Al	<u>17,679</u>	<u>15,740</u>	<u>24,360</u>	<u>12,694</u>	0,1
As	<u>0,611</u>	<u>0,429</u>	<u>1,278</u>	<u>0,349</u>	0,01
Ba	0,070	0,074	0,104	0,076	0,7
Be	0,010	0,008	0,007	0,008	0,04
Cd	<u>0,039</u>	<u>0,051</u>	<u>0,032</u>	<u>0,051</u>	0,001
Co	0,031	0,039	0,025	0,016	0,05
Cr	<LD	<LD	<LD	<LD	0,05
Cu	<u>0,032</u>	<u>0,061</u>	<u>0,023</u>	<u>0,040</u>	0,009
Fe	0,024	0,179	0,024	<LD	0,3
Li	0,006	0,008	0,005	0,006	2,5
Mn	<u>20,118</u>	<u>22,117</u>	<u>15,226</u>	<u>20,769</u>	0,1
Ni	<u>0,082</u>	<u>0,106</u>	<u>0,095</u>	<u>0,065</u>	0,025
V	0,010	<LD	<u>0,142</u>	<LD	0,1
Zn	<u>6,235</u>	<u>10,556</u>	<u>5,784</u>	<u>9,158</u>	0,18

*<LD = abaixo do limite de detecção do ICP.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O bom funcionamento das colunas durante a execução do ensaio, sem vazamentos, bem como os resultados gerados, mostram o sucesso operacional dos equipamentos e dos métodos aplicados.

Os resultados laboratoriais demonstram o grande potencial de aplicação da escória para a aplicação em coberturas, evidenciado

principalmente pelo ensaio C₂, onde a alcalinidade superou a do ensaio C₃, que utilizava uma cobertura com cal hidratada. Isso abre um espectro para considerações práticas a respeito de possíveis soluções para o problema da drenagem ácida de rochas.

O sistema passivo de cobertura utilizando escória provavelmente terá menor

custo quando comparado com os métodos de tratamento ativo utilizando cal hidratada, além de oferecer uma destinação ambiental para tal resíduo sólido, de grande produção na indústria

metalúrgica. No entanto, outros fatores ainda necessitam ser melhor avaliados, principalmente em termos hidráulicos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Processo 471801 – MCT 02/2006), pelo apoio financeiro ao projeto; ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFOP, pelo curso de mestrado oferecido à primeira autora e às Indústrias Nucleares do Brasil S/A, pela cessão das amostras de rochas ácidas.

BIBLIOGRAFIA

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: análise granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos: classificação. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: Lixiviação de Resíduos: Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. 16 p.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11541: Amostragem de Material para Lastro para Via Férrea: Procedimentos. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.
5. ALMEIDA, R. P. ; LEITE, A. L. . Neutralização de drenagem ácida de rocha na Mina de Pirita em Ouro Preto utilizando escória de aciaria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS, 2011. 1 CD-ROM. ID286.
6. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. Standard methods for the examination of water and wastewater (16th ed.): Washington, D.C., American Public Health Association, 1985, 905 p.
7. CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Boletim técnico do Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas n.106, p. 18 – 19,1986.
8. CASCUDO, O.; HELENE, P.R. do L. Produção e Obtenção de Barras e Fios de Aço para Concreto Armado. Boletim Técnico BT/PCC/256. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, ISSN 0103-9830, p. 5, 2000.
9. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº357, p. 58 – 63, Brasília, 2005.
10. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº430, p. 90 – 96, Brasília, 2011.
11. CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE MINAS. Deliberação Normativa nº 01, Belo Horizonte, 2008.
12. DOYE, I. e DUCHESNE, J., Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using batch-leaching test. Applied Geochemistry, Amsterdam, v.18, n.8 p. 1197 – 1213, 2003.
13. DZIARMAGOWSKI, M. et al. Reduction of converter slag in electric arc furnace. Ironmaking and Steelmaking. v.19, n. 1, p. 45 - 49, 1992.
14. 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. Lexington, University of Kentucky, CRC Press Inc. 1995. 293p.
15. FAGUNDES, J.R.T. Balanço hídrico do bota-fora BF4 da Mina Osamu Utsumi, INB, como subsídio para projetos de remediação de drenagem ácida. 2005. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
16. FERNANDES, D. P. Estudo de caracterização e adequação química e ambiental da escória de aciaria LD, para aplicação como lastro ferroviário. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
17. INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). A história do Aço e a Siderurgia em Números. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br>>. Acesso em: 23 de novembro de 2007.
18. INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). Estatísticas. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp>>. Acesso em: 13 de março de 2011
19. LÓPEZ, R. P., NIETO, J.M., ALMODOVA, G.R. Utilization of fly ash to improve the quality of the acid mine drainage generated by oxidation of a sulphide-rich mining waste: column experiments. American Mineralogist. v. 92, p. 1966 - 1977. 1989.
20. MACÊDO, J.A.B. Águas e Águas. Ed. 3, CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA. Belo Horizonte: 977p. 2004.
21. MACHADO, A.T. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
22. MACHADO, L.A.; SCHNEIDER, I. A. Ensaios 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, Ouro Preto, v.61,n.3, p. 1 – 23, 2008.
23. MEND. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Report 1.20.1, CANMET, Smithers, 2009. 579 p.
24. MONTGOMERY, D.G; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. Materials Forum, n. 15, p. 374 - 382, 1991.

25. MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag na opportunity to save natural resource. *Waste Management*, v. 21, p. 285 - 293, 2001.
26. PEJON, O. J. Mapeamento geotécnico da Folha Piracicaba -SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. 1992. 244 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
27. PIMENTA, A.; LIMA E.O. O lastro ferroviário – alternativa econômica e ambiental. In.: SEMINÁRIO ESCÓRIA DE ACIARIA, 2003, Vitória. Anais...Vitória: Companhia Siderúrgica de Tubarão, 2003.
28. SALVIANO, A.B. Avaliação de escória de aciaria para a prevenção de drenagem ácida de mineração: estudo do caso das Indústrias Nucleares do Brasil (INB). 2010, 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
29. SILVA, J. G. .Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto-forno. 2005. 436 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
30. SIMMONS J.; ZIEMKIEWICZ P. and BLACK D. C. Use of slag leach beds for the treatment of acid mine drainage: the Mccarty Highwall Project. In: AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION CONFERENCE, 19th, 2002, Lexington. Proceedings... , Lexington, 2002, p. 91 - 99.
31. YAN, J., MORENO, L., NERETNIEKS, I. The Long-term Acid Neutralizing Capacity of Steel Slag. Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm,. 1999. p. 217-223.

Manuscrito recebido em: 29 de Agosto de 2013

Revisado e Aceito em: 06 de Agosto de 2014