

ESTABELECIMENTO DE TRAÇO ENTRE REJEITO DE CARVÃO E ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA PARA PREVENÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS

Luciana Angelita Machado ¹

Lucas Minotti Bienert ²

Rejane Maria Candiota Tubino ³

Ivo André Homrich Schneider ⁴

Resumo

Uma das tecnologias de prevenção da geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM) é o método de aditivos alcalinos. A alcalinidade impede as reações de oxidação da pirita, evitando a geração de acidez e a solubilização de metais em meio aquoso. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar o uso de escória do forno panela de aciaria elétrica como aditivo alcalino para o controle da geração de DAM. O rejeito de carvão foi obtido em uma mina de carvão do Estado do Rio Grande do Sul e a escória foi fornecida por uma usina siderúrgica semi-integrada. Inicialmente, caracterizaram-se os materiais pelo método de contabilização de ácidos e bases. Após, realizaram-se ensaios cinéticos em células úmidas pelo método ASTM D 5744-96. A qualidade da água de percolação nas células úmidas foi analisada em termos de pH, Eh e concentração de metais e sulfatos. Os resultados demonstram que a DAM pode ser evitada pela mistura do rejeito de carvão com a escória em uma proporção de 3:1. Pode-se concluir que a disposição conjunta de escória de aciaria com rejeito de carvão é uma alternativa viável para o controle da geração de DAM em minerações de carvão.

Palavras-chave: Drenagem ácida; Escórias; Aditivos.

PREVENCIÓN OF THE ACID MINE DRAINAGE (AMD) BY BLENDING COAL TAIL AND A SLAG FROM AN ELETRIC STEEL PLANT

Abstract

Alkaline additive is an effective method for controlling acid mine drainage (AMD). Alkalinity hinders pyrite oxidation reactions, avoiding acidity and metals solubilization in water. Thus, the aim of this work is to study the use of a ladle furnace slag as an alkaline additive for controlling AMD. The coal tailing was obtained from a coal mine in Rio Grande do Sul State and the slag from a minimill steel plant. Initially the materials were characterized by the acid-base accounting method. After, kinetic tests in humidity cells were carried out according to ASTM D 5744-96 method. The leaching water was evaluated in terms of pH, Eh, metals, and sulfates concentration. The results showed that AMD could be avoided by mixing the coal's tailings with slag at 3:1 proportion. It is demonstrated that ladle furnace slag is a suitable alkaline material for AMD prevention in coal tailings deposits.

Key words: Acid drainage; Slag; Additives.

1 INTRODUÇÃO

A drenagem ácida de minas (DAM) resulta da oxidação de sulfetos metálicos na presença de ar e água. Esse tipo de poluição é comum em áreas de mineração de carvão, devido aos teores de sulfeto de ferro (FeS₂) nos rejeitos. Os poluentes da drenagem

ácida de minas afetam a qualidade da água, baixando o pH, reduzindo a alcalinidade natural, aumentando a dureza total e acrescendo quantidades indesejáveis de ferro, alumínio, manganês, sulfatos e, eventualmente, outros metais pesados. Essas fontes permanecem ativas por décadas e

¹Mestre pelo PPGEM, Escola de Engenharia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 6, CP 15021, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: lucianaqpoa@gmail.com.

²Estudante de Engenharia Química, Escola de Engenharia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 6, CP 15021, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: lucasmb_3@hotmail.com.

³Professora Dra. DEMET e PPGEM, Escola de Engenharia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 6, CP 15021, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: rejane.tubino@ufrgs.br.

⁴Professor Dr. do DEMET e PPGEM, Escola de Engenharia UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, Setor 6, CP 15021, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: ivo.andre@ufrgs.br.

até mesmo por séculos após a sua produção.⁽¹⁾ A geração de acidez ocorre na mineração de carvão do Brasil, em menor escala no Estado do Rio Grande do Sul e, com especial gravidade, no Estado de Santa Catarina.⁽²⁾

Os métodos de controle da DAM podem ser classificados em métodos preventivos, de controle da migração e de remediação.⁽¹⁾ O método preventivo de aditivos alcalinos baseia-se na mistura de materiais alcalinos com rejeitos geradores de DAM. O material tradicionalmente empregado é o calcário (CaCO_3). O procedimento é simples e de baixo custo. Outros materiais também podem ser aplicados, a um custo ainda mais baixo, como escórias de siderurgia, cinzas da queima do carvão em termoelétricas e resíduos da construção civil.⁽³⁻⁵⁾

Nas usinas siderúrgicas semi-integradas são gerados dois tipos de escória, uma escória oxidante do forno elétrico a arco e uma escória redutora do forno panela.⁽⁶⁾ Ambas as escórias prestam-se para o uso como previsto no presente trabalho, porém optou-se pela escória do forno panela por ser mais alcalina e uma maior dificuldade de comercialização como co-produto da produção de aço.

Neste contexto, os ensaios estáticos e cinéticos têm por finalidade avaliar o potencial de geração da DAM de um determinado material. Os testes estáticos são rápidos e possibilitam a aplicação de critérios específicos que permitem a classificação das amostras segundo seu potencial de geração de acidez e potencial de neutralização. Ainda, permitem quantificar a relação entre resíduos alcalinos e rejeitos de mineração para que ocorra a neutralização. Os ensaios cinéticos auxiliam no entendimento da cinética da geração de DAM.⁽⁷⁾ Deve-se ressaltar que testes estáticos e cinéticos têm sido aplicados somente recentemente como ferramenta para o controle da DAM pelas mineradoras de carvão no Brasil.^(8,9)

Em estudo anterior, verificou-se que a escória de aciaria elétrica, pela sua alcalinidade e capacidade de adsorção, é um material que pode ser misturado em pilhas de rejeitos de carvão de forma a evitar a geração da DAM.⁽⁹⁾ Entretanto, a metodologia aplicada, pelo teste estático de contabilização de ácidos e bases "ABA Modificado", resultou em um traço de rejeito de carvão: escória de 4,8:1, que não foi suficiente para a completa neutralização da água de lixiviação. Assim, no presente trabalho emprega-se a metodologia de "ABA Tradicional", de forma comparativa ao "ABA Modificado", a fim de conseguir um traço para a melhor neutralização da DAM.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Rejeito de Carvão e Escória de Aciaria

A amostra de rejeito de carvão foi proveniente do beneficiamento por jigagem de um carvão da região do Baixo Jacuí, Rio Grande do Sul, Brasil. O material alcalino estudado foi uma escória do refino redutor realizado em um forno-panela de uma usina siderúrgica semi-integrada, localizada no mesmo Estado, que opera uma aciaria elétrica produzindo aços longos.

2.2 Análise no Rejeito de Carvão e na Escória de Aciaria

Analisou-se o rejeito de carvão em relação ao poder calorífico superior, teor de cinzas, matéria volátil, enxofre total, pirítico, sulfático e orgânico e composição elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio.

O poder calorífico superior foi determinado em bomba calorimétrica, seguindo a metodologia ASTM D-5865.⁽¹⁰⁾ A análise de cinzas foi realizada pela queima de 1,0 g de carvão, por 1 hora a 800°C, em mufla, conforme NBR 8289.⁽¹¹⁾ A matéria volátil foi determinada pela queima de 1,0 g de amostra, por 5 minutos a 950°C, em mufla, seguindo a norma NBR 8290.⁽¹²⁾ O enxofre total foi analisado via instrumental, pelo equipamento Leco SC 457. As formas de enxofre sulfático e pirítico foram determinadas por procedimentos titulométricos, normatizados pela ISO 157.⁽¹³⁾ A forma orgânica do enxofre foi determinada pela subtração do enxofre sulfático e pirítico do teor de enxofre total. Os valores obtidos foram corrigidos em relação ao teor de umidade, medida pela secagem de 1,0 g de amostra, por 1 hora a 110°C, conforme a norma NBR 8293.⁽¹⁴⁾

A caracterização da escória de aciaria foi realizada por fluorescência de raios x e difração de raios x.

2.3 Testes Estáticos

O teste estático empregado foi o de contabilização de ácidos e bases (ABA). Foram realizados os testes ABA tradicional e ABA modificado. Ambos têm por objetivo determinar o balanço entre a produção e o consumo de acidez pelos componentes minerais de uma amostra. Por esses testes, determina-se o potencial de produção de acidez (AP) e o potencial de neutralização (NP).⁽¹⁵⁾

A partir desses parâmetros, podem-se calcular:

- potencial de neutralização líquido (NNP) = NP – AP; E
- razão do potencial de neutralização (NPR) = NP/AP.

em que AP, NP e NNP são geralmente expressos em kg CaCO_3 /t de amostra.

A determinação do potencial de acidez (AP) pelo método ABA tradicional foi realizada pela análise de enxofre total, via instrumental no equipamento Leco CS 457. A medida do AP pelo método ABA modificado foi realizada pela análise de enxofre pirítico, via úmida. Estequiometricamente, um mol de CaCO_3 é requerido por mol de S:

$$\text{AP (kg CaCO}_3\text{/t amostra)} = (1000/32) \times \text{peso \% S.} \quad (1)$$

A determinação do potencial de neutralização (NP) pelo método ABA tradicional foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico aquecido a 90°C, por 1 hora, para consumir os minerais neutralizantes, seguido de titulação com NaOH até pH 7,0. A medida do NP pelo método ABA modificado foi realizada pelo ataque da amostra com ácido clorídrico, à temperatura ambiente, por 24 horas, seguido de titulação com NaOH até pH 8,3. O cálculo do NP foi realizado pela Equação 2:

$$\text{NP (kg CaCO}_3\text{/t amostra)} = (\text{HCl cons., g/g de amostra}) \times (50/36,5) \times 1000. \quad (2)$$

Os critérios ABA para identificação do potencial de geração de acidez dos materiais são (NNP e NPR):

- valores de NNP menores que - 20 indicam que haverá a formação de ácido;
- valores de NNP maiores que + 20 indicam que não haverá a formação de ácido;
- valores de NNP entre -20 e + 20 indicam que é difícil prever a formação ou não de ácido.
- valores do NPR menores 1:1 indicam a provável geração de DAM;
- valores de NPR entre 1:1 e 2:1 indicam a possível geração de DAM;
- valores de NPR entre 2:1 e 4:1 indicam que a DAM não é esperada; e
- valores de NPR maiores que 4:1 indicam que não será gerada a DAM.

2.4 Ensaios Cinéticos

Os estudos cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas - *Humidity Cell Test*, conforme procedimento ASTM D 5744-96.⁽¹⁶⁾ O teste consiste em colocar uma amostra de 1.000 g com granulometria inferior a 6,3 mm em um frasco fechado por onde pode ser injetado e retirado ar. Inicialmente submeteu-se o material a uma lixiviação com 1.000 mL de água (semana 0). Após, iniciou-se o procedimento de exposição das amostras por três dias ao ar seco, três dias ao ar úmido e um dia para percolação de 1.000 mL de água. Esse ciclo repetiu-se por todo o período de teste aplicado, que foi de 20 semanas.

Nos experimentos, uma célula foi preenchida com rejeito de carvão, outra com escória, outra com uma mistura dos materiais em uma proporção de 4,8:1 (para que o NNP da mistura ficasse próximo a zero, considerando o método ABA modificado) e outra em uma proporção 3:1 (para que o NNP da mistura ficasse próximo a zero, considerando o método ABA tradicional). Assim, os materiais inseridos em cada célula, e sua respectiva quantia, foram:

- 1.000 g de rejeito de carvão;
- 1.000 g de escória;
- mistura de 830 g do rejeito de carvão com 170 g de escória;
- mistura de 750 g do rejeito de carvão com 250 g de escória.

As águas lixiviadas das células úmidas foram analisadas em relação aos seguintes parâmetros de qualidade: pH, potencial redox, acidez, alcalinidade total, concentração de ferro, alumínio, manganês, zinco e sulfatos. As análises foram realizadas, semanalmente, seguindo os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.⁽¹⁷⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a análise imediata do rejeito de carvão. Pode-se observar que o rejeito apresenta 68,7 % de cinzas. O teor de enxofre total é de 4,8% e de enxofre pirítico é de 3,2%. Estes dados são representativos dos rejeitos de carvão gerados no beneficiamento por jigagem na região do baixo Jacuí do Rio Grande do Sul.⁽¹⁸⁾

Os resultados dos ensaios estáticos estão discriminados na Tabela 2. Para o rejeito de carvão, os valores de NNP e NPR obtidos pelo método ABA tradicional são - 148,8 kg CaCO₃/t e 0,008 respectivamente. Os valores obtidos pelo método ABA modificado foram - 100,0 kg CaCO₃/t e 0,0. Assim, os valores de NNP e NPR indicam que o material é gerador de DAM na presença de ar e água.

Tabela 1. Análise imediata do rejeito de carvão

Propriedade	Valores
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	1.380,0
Matéria Volátil (%)	17,9
Cinzas (%)	68,7
C (%)	14,9
H (%)	1,6
N (%)	0,3
Enxofre Total (%)	4,8
Enxofre Pirítico (%)	3,2
Enxofre Sulfático (%)	1,4
Enxofre Orgânico (%)	0,2

Tabela 2. Resultados de ensaios estáticos pelos métodos ABA tradicional e modificado para o rejeito de carvão e escória

ABA tradicional	S Total (%)	AP (kg CaCO ₃ /t)	NP (kg CaCO ₃ /t)	NNP (kg CaCO ₃ /t)	NPR
Rejeito de carvão	4,8	150,0	1,2	-148,8	0,008
Escória	0,1	3,1	447,2	444,1	144,2
ABA modificado	S Pirítico (%)	AP (kg CaCO ₃ /t)	NP (kg CaCO ₃ /t)	NNP (kg CaCO ₃ /t)	NPR
Rejeito de carvão	3,2	100,0	0,0	-100,0	0,000
Escória	0,0	0,0	484,4	484,4	-

A escória de aciaria apresenta-se como um material promissor a ser empregado como aditivo alcalino. A escória apresenta 24% de cálcio e 11% de magnésio. Os principais compostos cristalinos identificados são a Gehlinita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), a Akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), a Merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) e a Wollastonita (CaSiO_3). Em termos de alcalinidade, obteve-se um NNP de 444,1 kg CaCO_3/t pelo método ABA tradicional e um NNP de 484,4 kg CaCO_3/t pelo método ABA modificado. Os valores estão coerentes com dados apresentados por Skousen *et al.*,⁽³⁾ que descrevem que o potencial de neutralização de escórias pode variar de 400 kg a 950 kg CaCO_3/t . Baseado nestes dados, pode-se calcular a proporção entre os materiais para que a geração de acidez e alcalinidade fique equilibrada. Pelos dados de NNP obtidos no método ABA tradicional, a proporção de materiais para o equilíbrio é de aproximadamente 3:1, enquanto que, pelo método ABA modificado, esta proporção passa para 4,8:1.

As Figuras de 1 a 7 apresentam os resultados dos ensaios cinéticos. Os ensaios foram conduzidos em uma célula contendo rejeito de carvão, outra contendo escória e outras duas com mistura dos dois materiais, uma na proporção rejeito de carvão: escória de 3:1 e outra na proporção 4,8:1.

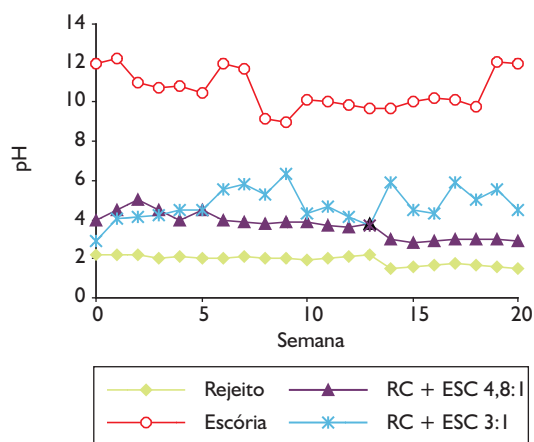


Figura 1. pH da água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” no rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

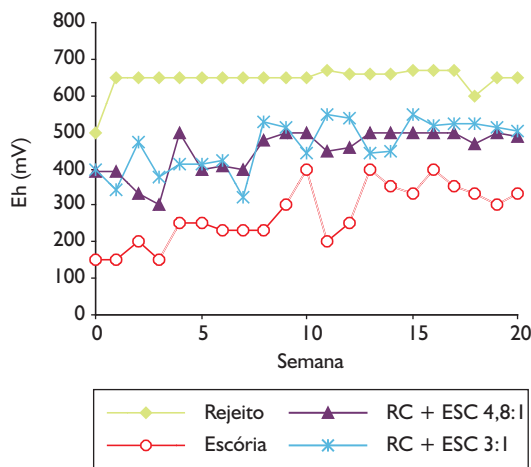


Figura 2. Potencial redox da água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” em rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

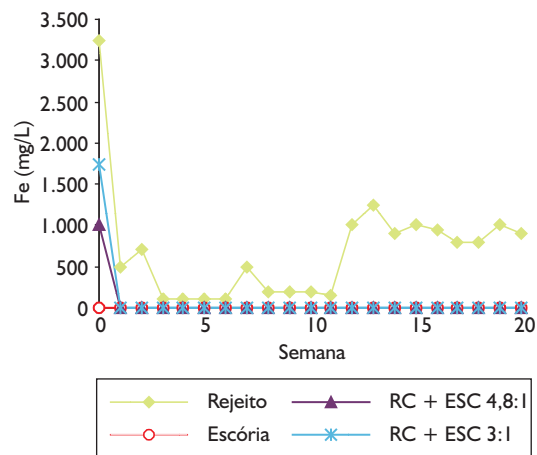


Figura 3. Concentração de ferro na água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” em rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

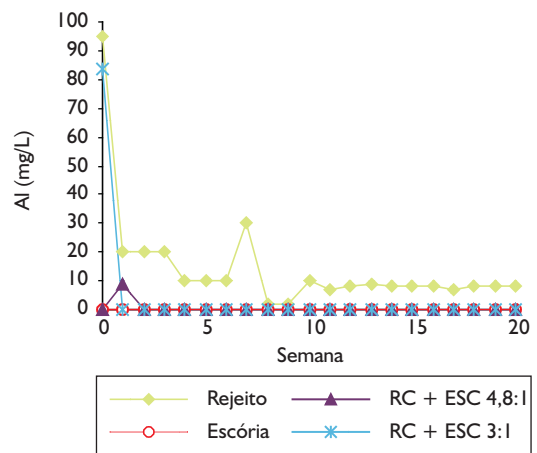


Figura 4. Concentração de alumínio na água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” em rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

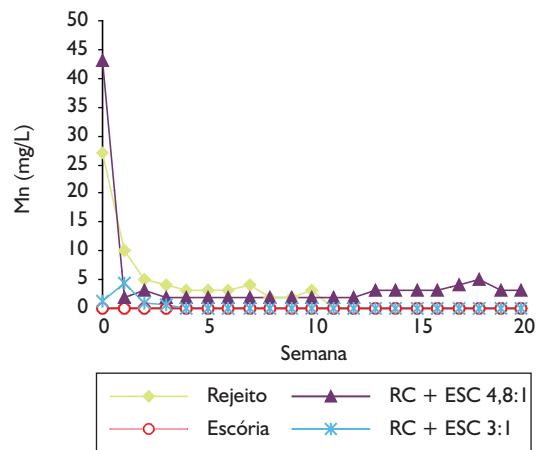


Figura 5. Concentração de manganês na água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” em rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

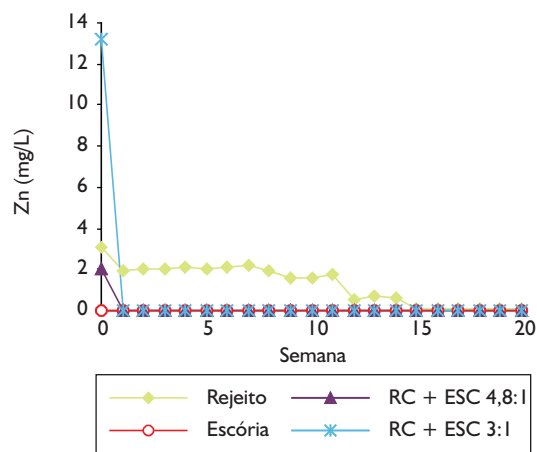


Figura 6. Concentração de zinco na água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” em rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

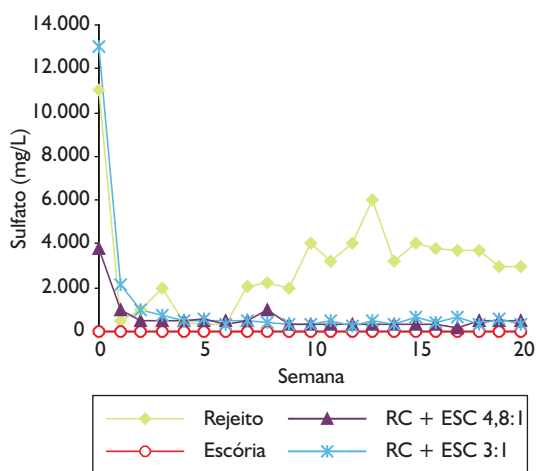


Figura 7. Concentração de sulfatos na água de lixiviação nos ensaios cinéticos em “células úmidas” em rejeito de carvão, escória e misturas de rejeito de carvão e escória.

Para o rejeito de carvão, pode-se observar que o pH da água lixiviada foi baixo no decorrer das 20 semanas, variando entre 2,6 a 1,3. O potencial redox, na semana 0 (zero), foi de 490 mV. Após estabilizou-se entre 649 e 711 mV, demonstrando uma condição altamente oxidante que favorece a degradação de sulfetos. As concentrações de ferro e sulfato, dois produtos diretos da oxidação da pirita, apresentaram um comportamento similar. Na semana 0 (zero), a concentração de ferro no lixiviado foi bem alta, mostrando que a pirita já estava parcialmente oxidada (decorrente de operações de beneficiamento, armazenamento e transporte). Entre as semanas 1 e 10, os valores mantiveram-se baixos, voltando a subir a partir da semana 11. Os demais elementos metálicos, solubilizados a partir da matéria mineral, como o alumínio, manganês e zinco, tiveram um comportamento distinto. Apresentaram valores mais altos nas primeiras lixiviações, decrescendo no decorrer das semanas. As maiores concentrações foram observadas para o alumínio, seguido do manganês e do zinco.

A água de percolação da célula contendo somente escória apresentou valores de pH iniciais em torno de 12,0, chegando no final do ensaio com valores 9,7 (com exceção das duas últimas semanas, quando o pH voltou a aumentar). O potencial redox, oxidante, é mais baixo, variando de 150 mV a 300 mV. Em relação aos metais (Fe, Al, Mn e Zn), a concentração no lixiviado em todo o experimento foi próxima a zero. A liberação de sulfatos também foi praticamente nula.

Os lixiviados coletados da mistura de rejeito de carvão e escória, tanto na proporção de 4,8:1 como 3:1, apresentaram um desempenho semelhante. A exceção foi no valor do pH do lixiviado. Na proporção de 4,8:1 o pH do meio ficou na faixa de 5,0 e 4,0 nas dez primeiras semanas, baixando para valores entre 4,0 e 3,0 nas semanas seguintes. Na proporção de 3:1 o pH oscilou entre 6,0 e 4,0 durante todo o experimento. O potencial redox, para ambas as misturas, variou entre 300 mV e 570 mV, indicando que a taxa de oxidação do rejeito foi reduzida. Estes dados indicam que a presença da escória diminui o potencial de oxidação, provavelmente reduzindo as condições de oxidação da pirita, e que estão de acordo com as conclusões de Capanema e Ciminelli,⁽¹⁹⁾ que observaram que maiores valores de potencial redox favorecem a oxidação de materiais sulfetados, com a decorrente diminuição do pH da água lixiviada. Em relação aos metais, somente a água de lixiviação na semana 0 (zero) apresentou uma concentração mais elevada. A partir de então a lixiviação dos metais foi bastante baixa para ambos os níveis de mistura. Esse fato está associado ao pH mais elevado do meio, que inibe a oxidação da pirita, reduz a solubilidade dos metais e favorece os processos de adsorção de compostos metálicos na matéria mineral.⁽²⁰⁾ Os teores de sulfato também são bastante baixos, demonstrando que a oxidação da pirita foi bastante reduzida.

Os resultados obtidos confirmam que a mistura de rejeitos de carvão com escória de aciaria reduzem a taxa de oxidação da pirita, diminuindo a concentração de poluentes na água de percolação. O método de contabilização de ácidos e bases (ABA) mostrou-se adequado para a definição do traço, podendo ser aplicado a outras situações similares. No caso especial do presente trabalho, o método ABA tradicional permitiu que o valor do pH da água de lixiviação ficasse mais próximo da neutralidade do que o método ABA modificado. Ainda, demonstra-se que a técnica de aditivos alcalinos pode ser uma tecnologia viável e de baixo custo para o controle DAM na mineração de carvão. Deve-se considerar que a escória

do forno panela é atualmente destinada a aterros no Estado do Rio Grande do Sul. Por fim, como aspecto favorável ao procedimento defendido neste trabalho, a distância entre as minas de carvão no Rio Grande do Sul e as usinas siderúrgicas é relativamente pequena, permitindo o deslocamento do material com custos reduzidos.

4 CONCLUSÕES

O rejeito de carvão, com 4,8% de enxofre total e 3,2% de enxofre pirítico, tem potencial de geração de acidez. O ensaio cinético em célula úmida demonstra que este material gera drenagem ácida, evidenciado pelo pH menor que 2,6, alta acidez e elevadas concentrações de metais (Fe, Al, Mn e Zn) e sulfato. A escória do forno panela apresenta um alto potencial de neutralização. O ensaio cinético realizado somente com a escória de aciaria propiciou um lixiviado com pH entre 9,7 e 12,0, moderada alcalinidade e concentrações baixas de metais e sulfatos. A mistura do rejeito de carvão e escória, tanto na proporção de 3:1 como 4,8:1, inibiu a geração da drenagem ácida, obtendo-se um lixiviado com baixa

acidez e concentrações reduzidas de metais (Fe, Al, Mn e Zn) e sulfatos. Entretanto, o valor de mistura obtido pelo método de contabilização de ácidos e bases tradicional (3:1) permite a obtenção de valores de pH mais próximos da neutralidade. Assim, demonstra-se que a disposição conjunta de escória de aciaria e rejeito de carvão é uma alternativa viável para minimizar a taxa de oxidação da pirita, reduzindo os efeitos da DAM nas áreas de influência das minerações de carvão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do presente trabalho. Também são gratos à Copelmi Mineração e ao Grupo Gerdau, pelo fornecimento de amostras dos materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 KONTOPOULOS, A. Acid mine drainage control. In: CASTRO, S.H.; VERGARA, F.; SÁNCHEZ, M.A. (Ed.). *Effluent treatment in the mining industry*. Concepción: University of Concepción, 1998, p. 57-118.
- 2 MONTEIRO, K.V. *Carvão: o combustível de ontem*. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra, 2004.
- 3 SKOUSEN, J.; ROSE, A.; GEIDEL, G.; FOREMAN, J.; EVANS, R.; HELLIER, W. *A handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage*. Morgantown: West Virginia University/The National Mine Land Reclamation Center, 1998.
- 4 DOYE, I.; DUCHESNE, J. Neutralization of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigations using batch-leaching tests. *Journal of Applied Geochemistry*, v. 18, n. 8, p. 1197-213, Aug. 2003.
- 5 FENG, D.; VAN DEVENTER, J. S. J.; ALDRICH, C. Removal of pollutants from acid mine wastewater using metallurgical by-products slags. *Separation and Purification Technology*, v. 56, n. 3, p. 359-68, Sept. 2004.
- 6 TUBINO GEYER, R. M. *Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto*. 2001. 171 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- 7 ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. *Acid mine drainage prediction*. Washington, D.C., 1994. (Technical document, EPA530-R-94-036)
- 8 INDÚSTRIA CARBONÍFERA RIO DESERTO. *Análise do potencial de acidificação e de neutralização em rejeitos do beneficiamento do carvão mineral da região carbonífera*. Criciúma, 2004. (Relatório técnico).
- 9 MACHADO, L. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Ensaios estáticos e cinéticos para a prevenção da geração de drenagem ácida de minas da mineração de carvão com escória de aciaria. *REM – Revista Escola de Minas*, v. 61, n. 3, p. 329-35, 2008.
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. *ASTM D 5865 - Standard test method for gross calorific value of coal and coke*. West Conshohocken, PA, 2004.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 8289 - Determinação do teor de cinza*. Rio de Janeiro, 1983.
- 12 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 8290 - Determinação do teor de matérias voláteis*. Rio de Janeiro, 1983.
- 13 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO 157: Hard coal: determination at forms of sulfur*. Genebra, 1993.
- 14 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 8293 - Determinação de umidade*. Rio de Janeiro, 1983.
- 15 SOBEK, A. A.; SCHULLER, W. A.; FREEMAN, J. R.; SMITH, R. M. *Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils*. Washington, D.C., Environmental Protection Agency – EPA, 1978. (EPA 600/2-78-054).

- 16 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. *ASTM D 5744* - Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell. West Conshohocken, PA, 1996.
- 17 AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21. Ed. Washington, D.C: APHA-AWWA-WEF, 2005.
- 18 FÉRIS, L. A.; FLORES, J. A.; SCHNEIDER, I. A.; RUBIO, J. Sorption of metals on a coal beneficiation tailing material. I: characterization and mechanisms involved. *Coal Preparation*, v. 21, p. 235-48, 2001.
- 19 CAPANEMA, L. X. L.; CIMINELLI, V. S. T. An investigation of acid rock drainage (ARD) occurrence in a gold mine located in a Southeastern Brazil region. *REM - Revista Escola de Minas*, v. 56, n. 3, p. 201-6, 2003.
- 20 SIMMONS J.; ZIEMKIEWICZ, P.; BLACK D. C. Use of steel slag leach beds for the treatment of acid mine drainage. *Mine Water and the Environment*, v. 21, n. 2, p. 91-9, June 2002.

Recebido em: 12/12/2008

Aprovado em: 31/08/2009