

## **MINERAÇÃO DE CARVÃO: PREVENÇÃO DA GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA COM MISTURAS DE REJEITO DE CARVÃO E ESCÓRIA DE FORNO PANELA**

**MACHADO, L.A.<sup>1</sup>, FREITAS, L.V.D., VILLETTI, P.I., TUBINO, R.M.C., SCHNEIDER, I.A.H.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. luciana.machado@erechim.ifrs.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ivo.andre@ufrgs.br

### **RESUMO**

A produção de carvão mineral no Brasil concentra-se na região Sul do país. As atividades de mineração movimentam grandes quantidades de materiais em curto espaço de tempo, gerando grandes quantidades de resíduos. O objetivo deste trabalho é prevenir a geração da drenagem ácida de mina (DAM) através do método de aditivos alcalinos, que consiste na mistura dos materiais rejeito de carvão e escória de forno panela para evitar a geração de DAM por meio de ensaios estáticos e cinéticos. A qualidade da água lixiviada das células úmidas foram monitoradas durante 50 semanas. Os resultados dos ensaios estáticos demonstram que as amostras de rejeito de carvão apresentaram potencial de geração de acidez e as amostras de escória de forno panela apresentaram um potencial de neutralização. Os ensaios cinéticos com a mistura dos materiais na proporção 1:1 e 1:1,5 pode-se verificar através das análises da água de lixiviação uma elevação significativa do pH e alcalinidade, enquanto que o potencial redox, acidez e concentração de sulfato diminuiram quando comparado com o lixiviado da célula contendo apenas rejeito de carvão. Desta forma, demonstrou-se que a disposição conjunta de rejeitos de carvão com escória de forno panela é uma alternativa para o controle da geração de DAM em minerações de carvão.

**PALAVRAS-CHAVE:** drenagem ácida de minas; rejeito de carvão; escória de forno panela.

### **ABSTRACT**

The production of coal in Brazil is concentrated in the southern region of the country. Mining activities move large amounts of material in a short period of time, generating huge amounts of waste. The objective is to prevent the generation of acid mine drainage (AMD) by the method of alkaline additives, which consists in a mixture of materials and waste coal slag ladle furnace to prevent the generation of AMD by means of static and kinetic assays. The quality of water leached from the wet cells were monitored for 50 weeks. The results of the static tests show that the samples of coal tailings showed potential for acid generation and the samples of slag ladle furnace showed a potential for neutralization. The kinetic experiments with the mixture of materials 1:1.5 and 1:1 can be verified through the analysis of the water leaching a significant increase pH and alkalinity, whereas the redox potential, acidity and sulfate concentration decreased when compared to the leach cell containing only coal tailings. Thus, it was demonstrated that the joint provision of waste from coal slag ladle furnace is an alternative for controlling the generation of AMD in coal mining.

**KEYWORDS:** acid mine drainage; waste coal; slag ladle furnace.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de carvão mineral no Brasil concentra-se na região sul do país. Segundo dados de 2010 do Departamento Nacional de Produção Mineral, o Estado do Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor de carvão mineral fóssil, com 54,8% da produção total, Santa Catarina (SC) com 43,6% e o Paraná (PR) apenas com 1,5%. No entanto, em termos de faturamento a distribuição se altera, SC possui 65,7% do valor total, RS com 32,1% e o PR 3,3%. Esta diferença está relacionada ao maior valor econômico associado ao carvão beneficiado de SC. Do total produzido, 81,0% são consumidos na geração de energia elétrica e os 18,9% restantes, como combustível industrial (ARAÚJO, 2011).

As atividades de mineração (extração, concentração do minério, processamento/refinamento e desativação após o fechamento da mina) movimentam grandes quantidades de materiais em curto espaço de tempo, gerando grandes quantidades de resíduos (estéreis de lavra e rejeitos de beneficiamento). A disposição destes materiais deve ser realizada em condições que não provoquem reflexos negativos ao ambiente. Para tanto, é necessária a observação de uma série de critérios, tais como a seleção do local adequado para disposição e preparação do terreno para evitar o escoamento superficial e infiltração dos contaminantes para evitar a formação da drenagem ácida de mina (DAM). A DAM representa um sério problema ambiental capaz de comprometer a qualidade dos recursos hídricos próximos à região onde ocorre. Anualmente no mundo, quantidades consideráveis de recursos são destinadas para a correção dos problemas ambientais decorrentes da DAM. A principal fonte de DAM é a percolação das águas pluviais pelos depósitos de rejeitos de carvão. A DAM resulta da oxidação de sulfetos metálicos na presença de ar e água. Este tipo de poluição é comum em áreas de mineração de carvão, devido aos teores de sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ) nos rejeitos. Estas fontes permanecem ativas por décadas e até mesmo por séculos após a sua produção (KONTOPOULOS, 1998).

Os métodos de controle da DAM podem ser classificados em métodos preventivos, de controle da migração e de remediação (KONTOPOULOS, 1998). O método preventivo de aditivos alcalinos baseia-se na mistura de materiais alcalinos com rejeitos geradores de DAM. Neste contexto, os ensaios estáticos e cinéticos têm por finalidade avaliar o potencial de geração da DAM por um determinado material. Os ensaios estáticos são rápidos e possibilitam a aplicação de critérios específicos que permitem a classificação das amostras segundo seu potencial de geração de acidez e seu potencial de neutralização. Ainda, permitem quantificar a relação entre resíduos alcalinos e rejeitos para que ocorra a neutralização. Os ensaios cinéticos auxiliam no entendimento da cinética da geração de DAM (EPA, 1994). Desta forma, o presente estudo visa contribuir para o estabelecimento de metodologia e caracterização de um resíduo alcalino, no caso a escória de forno panela, de forma a evitar a geração da DAM. Assim, foram conduzidos estudos, por meios de ensaios estáticos e cinéticos, com o intuito de se estabelecer uma proporção adequada entre os materiais, com o objetivo de evitar a geração da DAM por meio de mistura do rejeito de carvão com escória de forno panela em diferentes dosagens.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de rejeito de carvão foram obtidas de uma Mina de Carvão que minera a Camada Barro Branco, situada no Município de Forquilha, no Estado de Santa Catarina. A amostra de rejeito de carvão é proveniente da operação de beneficiamento do carvão ROM (do inglês, *run of mine*). As amostras de escória de forno panela foram obtidas em uma Siderúrgica do Estado do Rio Grande do Sul. As amostragens foram realizadas visando obter uma amostra representativa, durante um turno de operação, seguindo os procedimentos descritos na NBR 10007 (ABNT, 2004).

Para identificar inicialmente as condições de acidez ou alcalinidade das amostras foi determinado o potencial hidrogeniônico (pH) da pasta. Os ensaios estáticos foram realizados pelo método de contabilização de ácidos e bases - ABA, a finalidade foi determinar o balanço entre a produção de acidez e consumo de acidez (neutralização), pelos componentes minerais da amostra de rejeito de carvão e escória de forno panela (EPA, 1994). A determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada a partir da análise de enxofre total (ASTM, 1983). Para a determinação do potencial de neutralização (NP), inicialmente procedeu-se o Teste *Fizz*, para determinar o volume e a concentração de ácido clorídrico a ser empregado na análise. Finalmente, a partir dos valores determinados para o AP e NP calcula-se, por diferença, o potencial de neutralização líquido (NNP) e a razão do potencial de neutralização (NPR). O NPR é o quociente entre NP e AP. Os valores referentes ao NNP e NPR permitem estabelecer o potencial gerador de acidez das amostras em estudo.

Os ensaios cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas (do inglês, *Humidity Cell Test*), conforme procedimento D 5744 (ASTM, 1996) (Figura 1). Foram utilizadas quatro células úmidas para realização do ensaio cinético: uma célula preenchida com rejeito de carvão e outra célula com escória de forno panela, as outras duas células foram preenchidas com mistura dos materiais na proporção rejeito de carvão:escória de forno panela na proporção de 1:1 (para conferir um NNP igual a zero) e na proporção de 1:1,5. As misturas dos materiais foram feita de forma a conferir a maior homogeneidade possível entre as amostras. Os ensaios consistiram em colocar uma amostra de aproximadamente 1000 gramas com granulometria inferior a 6,3 mm em um frasco fechado, com ciclos de exposição das amostras por três dias ao ar seco, três dias ao ar úmido e um dia para lavagem com água destilada (500 mL). Após a lavagem das células, o lixiviado foi coletado e analisado. As análises dos lixiviados das células úmidas foram analisadas em relação aos seguintes parâmetros de qualidade de água: pH, acidez, alcalinidade, potencial redox e sulfato. As análises foram realizadas semanalmente, seguindo os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). O período de ensaio, conforme a norma D 5744 (ASTM, 1996) recomenda vinte semanas, mas neste experimento extrapolou-se para cinquenta semanas, para observar a qualidade do lixiviado em um período maior de tempo.



Figura 1. Células úmidas utilizadas para realização dos ensaios cinéticos de previsão da DAM.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas análises realizadas observou-se que o rejeito de carvão apresenta 10,60% de enxofre total, enquanto que a escória de forno panela 0,03% de enxofre total. O resultado do pH da pasta referente ao rejeito de carvão indica a tendência em gerar ácido, uma vez que o pH de equilíbrio foi determinado em 5,34. Em contrapartida, a escória de forno panela apresenta uma alta alcalinidade,

com pH de 11,72. O Teste *Fizz*, por meio da classificação do som efervescente produzido, apresentou resultados de “nenhum” para a amostra de rejeito de carvão. Esta ausência de som indica a baixa presença de minerais consumidores de ácido (tipo calcário). Para o caso da amostra de escória de forno panela, a constatação de um som “moderado” indica a existência de alguma quantidade presente de minerais consumidores de ácido.

Os ensaios estáticos consistiram na contabilização de minerais potencialmente geradores de acidez e dos minerais potencialmente consumidores de acidez presentes nas amostras de rejeito de carvão e de escória de forno panela. As amostras de rejeito de carvão apresentaram AP de 331,20 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup> e NP de 6,80 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, os resultados foram obtidos mediante os valores de enxofre total. Sendo que os valores de NNP e NPR para o rejeito de carvão foram de -324,40 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup> e 0,02, respectivamente. Assim, os valores de NNP foram menores que -20 e NPR menores que 1, indicando que o material é gerador de DAM na presença de ar e água.

O valor do AP e NP da amostra de escória de forno panela é de 0,97 e 353,10 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, respectivamente. O valor do NNP e NPR foi de 352,13 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup> e 364,02, nesta ordem. O NNP foi maior que 20 e a razão NPR maior que 1. Com base nestes resultados a escória de forno panela não é geradora de DAM. Assim, a proporção de mistura baseado no método ABA, para um NNP próximo de zero é de 1 tonelada de rejeito de carvão para cada 1,08 tonelada de escória. Em termos práticos, esse valor de mistura pode ser arredondado para uma proporção de 1:1 de rejeito de carvão para escória de forno panela. Os resultados dos ensaios estáticos realizados para a escória de forno panela apresentaram características promissoras para ser empregadas como aditivos alcalinos.

Os resultados do ensaio cinético em célula úmida estão apresentados nas Figuras 2 a 6. A Figura 2 mostra os resultados referentes ao pH da água lixiviada da célula contendo somente rejeito de carvão, apresentando um pH ácido em todas as análises, com valores de pH iniciais em torno de 3,1 e decrescendo chegando na semana 33 com pH 0,9, estabilizando-se nas semanas seguintes em torno de 2,0. Estudos realizados por Farfan *et al.* (2004) reportam que os valores de pH abaixo de 4,0 e as elevadas concentrações de metais, são considerados os componentes mais críticos da DAM, comportamento este que também pode ser observado nas análises do lixiviado da célula com rejeito de carvão. Ainda de acordo com os autores, estas situações ocasionam reações de oxidação aumentando a toxicidade no entorno, e atuando de forma prejudicial à fauna aquática. Em relação aos valores de pH da água lixiviada da célula contendo somente escória de forno panela, ficou na faixa de 11,0 a 7,5. Na célula contendo a mistura dos materiais na proporção 1:1 de rejeito de carvão para escória de forno panela os valores foram alcalinos com pH iniciando em 9,2 e estabilizando-se em torno 7 no final do ensaio. Com os resultado obtidos comprova-se que a proporção entre os materiais de 1:1 fornecida pelos ensaios estáticos permite a neutralização da água de percolação, na maioria das semanas dos ensaios ficando com pH neutro ou levemente alcalino. O lixiviado da célula com rejeito de carvão e escória de forno panela na proporção 1:1,5, o pH até a vigésima semana ficou acima de 8,1 com valores máximos de 10,7 (semana 1), a partir da semana 21 as variações do pH foram semelhantes a dos lixiviados da célula com proporção de 1:1. As leituras de pH do lixiviado da célula na proporção 1:1,5 mostraram que em todas as semanas do experimento os valores do pH foram superiores aos valores encontrados para a mistura na proporção 1:1, mas analisando a variação do pH durante as semanas o comportamento foi semelhante em ambas as células. Conclui-se com base nas análises do pH do lixiviado das células úmidas durante as 50 semanas de ensaio cinético, que o rejeito de carvão gera DAM, pois seu pH foi relativamente baixo em todas as análises. A escória de forno panela é alcalina, seu pH foi elevado, como esperado. Ambas as misturas de rejeito de carvão com escória de forno panela na proporção de 1:1 e 1:1,5, são efetivas na melhoria das condições de pH. Observando-se as curvas dos resultados do pH, nota-se uma elevação do pH com a utilização das proporções propostas, comprovando a eficiência técnica das mesmas. Os valores de pH encontrados para os lixiviados das células 1:1 e 1:1,5 foram comparados aos padrões de lançamento de efluentes que dispõe a

CONAMA 357 (2005). Segundo esta norma, os efluentes somente poderão ser lançados nos corpos de água se o pH estiver entre 5 e 9. Portanto, ambas as misturas propostas atendem para o lançamento do efluente com relação ao pH. A quantidade de material alcalino utilizada foi suficiente para elevar o pH do lixiviado aos níveis estabelecidos pela legislação durante todo o experimento.

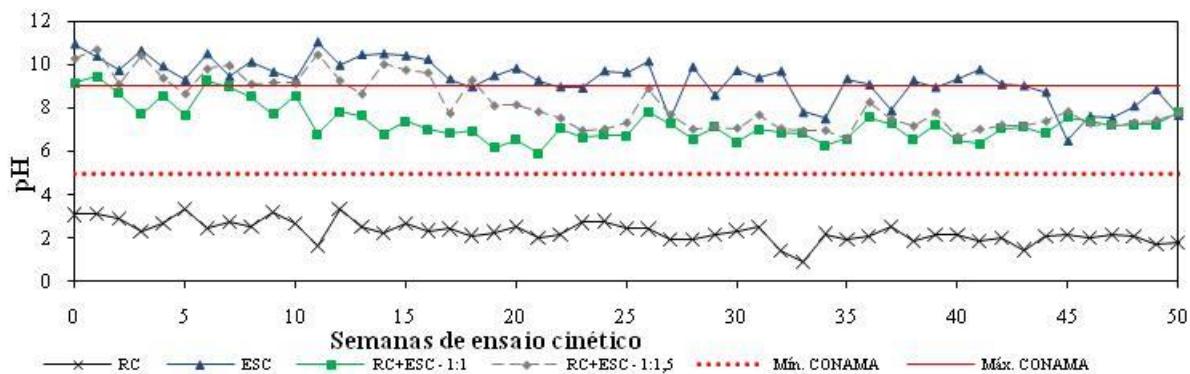


Figura 2. Valores de pH nos lixiviados das células úmidas dos ensaios cinéticos.

A Figura 3 apresenta os resultados do potencial redox para os lixiviados analisados no ensaio cinético. A análise do lixiviado proveniente da célula contendo apenas rejeito de carvão permaneceu com valores constantes durante o experimento, entre 528 a 405 mV Ag/AgCl, demonstrando uma condição altamente oxidante que favorece a degradação de sulfetos e indicam a ocorrência da DAM na água lixiviada da célula. Os valores do potencial redox do lixiviado da célula com escória de forno panela, são menores que os valores do lixiviado do rejeito de carvão, com variação na faixa de 138 a 283 mV Ag/AgCl da semana zero a semana 50. No lixiviado da mistura de rejeito de carvão com escória de forno panela 1:1 houve variações, iniciando com valores de potencial redox de 238 mV Ag/AgCl passando a 409 mV Ag/AgCl na semana 3, ficando nas demais semanas com valores em torno de 200, com algumas exceções. Com relação à análise do lixiviado da célula com rejeito de carvão com escória de forno panela na proporção 1:1,5, pode-se observar que não houve grandes variações no potencial redox durante as semanas analisadas, a oxidação ocorreu de forma constante. O potencial redox está relacionado com a capacidade de redução e oxidação e com a presença de íons dissolvidos na água de lixiviação. O lixiviado da célula com rejeito de carvão é o que apresenta os maiores valores de potencial redox, logo é a célula que apresenta maior oxidação, enquanto que o lixiviado das células com mistura dos materiais, na proporção de 1:1 e 1:1,5 os valores do potencial redox foram menores que no lixiviado da célula com rejeito, consequentemente a quantidade de íons dissolvido nestas células foram menores.

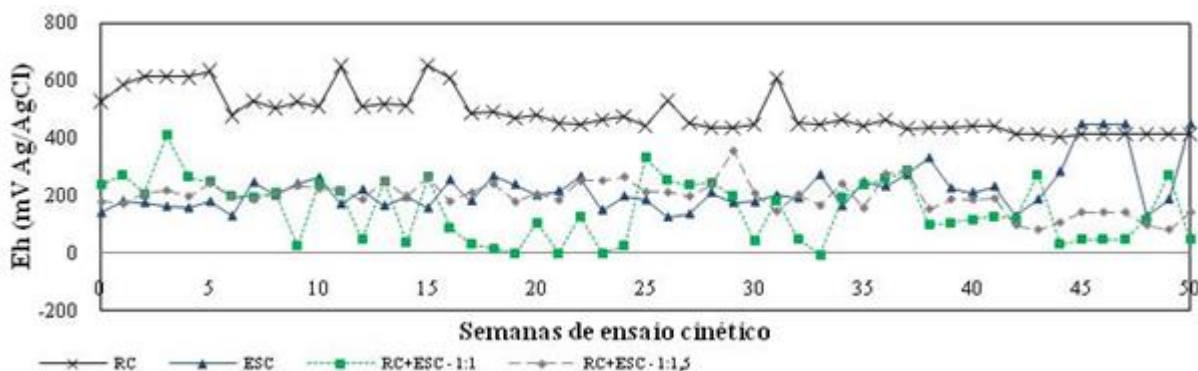


Figura 3. Valores de potencial redox nos lixiviados das células úmidas dos ensaios cinéticos.

A Figura 4 apresenta os resultados da análise da acidez dos lixiviados dos ensaios cinéticos. A acidez é um importante parâmetro no que diz respeito à produção/geração de drenagem ácida de

mineração. Analisando o gráfico da célula com rejeito de carvão (Figura 4) observa-se uma evolução da acidez do lixiviado com o decorrer do tempo de ensaio. A hipótese formulada para a origem desta acidez está relacionada às características da amostra, seu alto teor de enxofre total obtidos nas análises iniciais da amostra; que, por sua vez, poderia estar liberando íons sulfetos ou outros íons metálicos ao meio, de forma a contribuir diretamente para a geração de acidez, além dos resultados comprovados pelas análises de baixos valores de pH e elevados valores de potencial redox, tendo facilidade em sofrer redução. Tal hipótese carece de maior investigação. Os valores de leitura da água de lixiviação da célula contendo escória de forno panela foi nula em todas as leituras, o lixiviado das células com a mistura de rejeito de carvão com escória de forno panela 1:1 e 1:1,5 foram reduzidos em todas as análises realizadas. Sendo que a acidez da água de lixiviação da célula com a mistura na proporção 1:1,5 foram menores que os resultados do lixiviado da célula na proporção 1:1 até a semana 50. Os resultados da acidez do lixiviado indicam que a relação estequiométrica estabelecida entre os materiais, pelos ensaios estáticos foi eficaz, em termos de acidez.

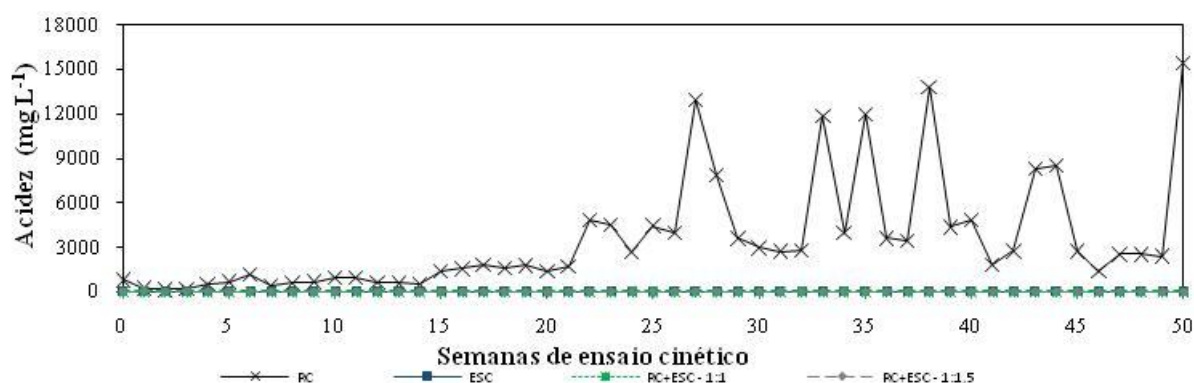


Figura 4. Valores de acidez nos lixiviados das células úmidas dos ensaios cinéticos.

A Figura 5 apresenta os resultados da alcalinidade total. A análise da alcalinidade total do lixiviado da célula contendo rejeito de carvão foi nula em todas as semanas de ensaio cinético. Enquanto o lixiviado da célula com escória de forno panela ocorreu à produção de alcalinidade total durante todas as semanas de análise, sendo que o caráter alcalino do lixiviado da escória de forno panela mostrou-se evidente pelos valores elevados de alcalinidade lixiviados durante o ensaio e pelo pH elevado. O lixiviado da célula com a mistura dos materiais na proporção 1:1 e 1:1,5 apresentaram a produção de alcalinidade durante todas as análises. Comparando-se à lixiviação de alcalinidade da escória de forno panela com a lixiviação de acidez do rejeito de carvão, conforme resultados da análise do lixiviado, a lixiviação de acidez do rejeito é superior a da alcalinidade pela escória de forno panela em todos os ciclos analisados, mas quando estes materiais foram misturados, na célula com a proporção de 1:1 e 1:1,5 a lixiviação de alcalinidade do lixiviado foi superior à lixiviação de acidez dos lixiviados das mesmas células, isto demonstra que a velocidade de reação da produção de alcalinidade da escória é superior à velocidade de produção de acidez do rejeito de carvão.



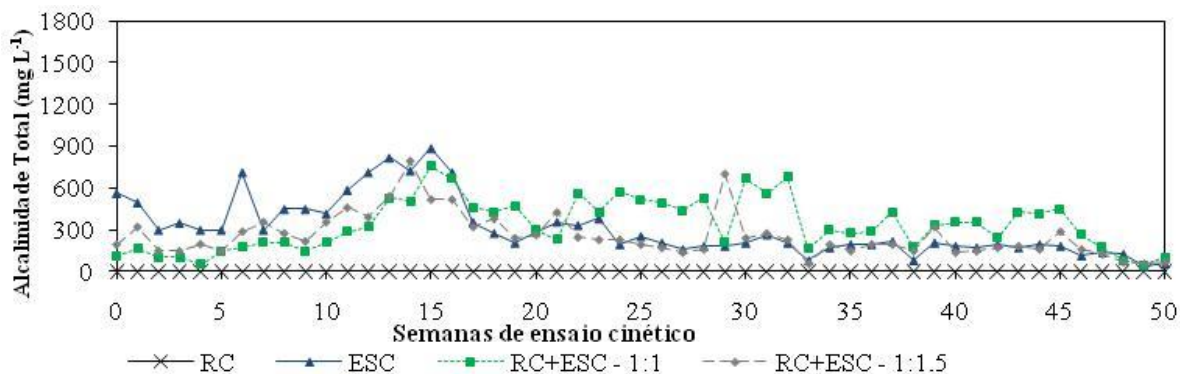


Figura 5. Valores de alcalinidade total nos lixiviados das células úmidas dos ensaios cinéticos.

A Figura 6 mostra os resultados referentes às análises de sulfato no lixiviado das células úmidas. Nas alíquotas obtidas da célula com o rejeito de carvão a concentração de sulfato ficou na faixa de 3580,0 a 8158,7 mg L<sup>-1</sup> na maioria das semanas, sendo que em algumas semanas a concentração de sulfato dissolvidos nos lixiviados em função do tempo, foi elevada com valores de 19516,3 mg L<sup>-1</sup> (semana 45). Os resultados obtidos da concentração de sulfato no lixiviado coletado da célula com escória de forno panela apresentou uma tendência decrescente com o passar do tempo de ensaio, as maiores lixiviações ocorreram até a semana 16. A concentração de sulfato presente nos lixiviados da mistura de rejeito de carvão com escória de forno panela 1:1 ficou abaixo de 3000 mg L<sup>-1</sup>. As quantidades de sulfato lixiviadas da célula com proporção de 1:1,5 de rejeito de carvão para escória de forno panela, foram menores em todas as análises que as encontradas no lixiviado da mistura de 1:1. Ao relacionar as quantidades de sulfatos do lixiviado da mistura na proporção 1:1 e 1:1,5 com as quantidades do rejeito de carvão, as quantidades foram menores, durante todo o ensaio, demonstrando que a adição de escória de forno panela inibiu a lixiviação de sulfato, podendo ser usada no controle da prevenção da DAM.

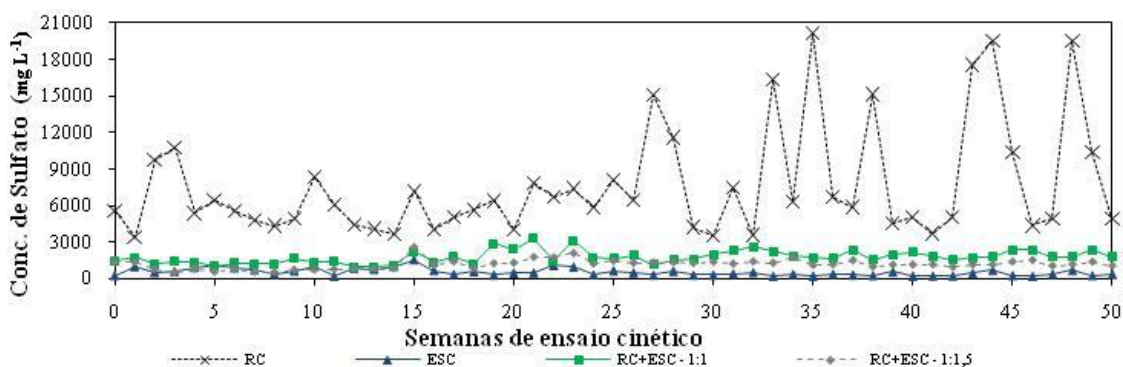


Figura 6. Concentração de sulfato nos lixiviados das células úmidas.

#### 4. CONCLUSÕES

Conclui-se, com base nos ensaios estáticos que as amostras de rejeitos de carvão têm potencial de geração de acidez, aumentando o potencial de geração de DAM. Enquanto que a escória de forno panela possui potencial de neutralização, podendo ser utilizada como material alcalino para evitar a DAM. Estes resultados foram confirmados nos ensaios cinéticos, o rejeito de carvão apresentou pH no lixiviado ácido, refletindo em uma alta acidez e potencial redox, mostrando que a pirita estava sendo oxidada durante as lixiviações, podendo ser confirmado pelos altos teores de sulfato liberado em seus lixiviados. Os ensaios cinéticos para a escória de forno panela, através das análises do lixiviado, comprovou seu alto valor de pH durante as cinquenta semanas. Em relação aos ensaios

cinéticos para o rejeito de carvão misturado com escória de forno panela na proporção 1:1 e 1:1,5, ambas as misturas foram efetivas na elevação do pH e da alcalinidade, na remoção da acidez, do potencial redox e sulfatos, quando comparados ao lixiviado da célula com somente rejeito de carvão. Com base nestes resultados, sugere-se que a mistura na proporção 1:1 de rejeito de carvão para escória de forno panela poderia ser utilizada como uma alternativa na remediação da DAM.

## 5. REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th Edition. Washington D.C.: APHA-AWWA-WEF, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. D 4239. Test method for sulfur in the analysis sample of coal and coke using high temperature tube furnace combustion methods. 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. ASTM D 5744. Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell. 1996.

ARAÚJO, L. P. O. Carvão Mineral. Informativo Mineral 2011. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Brasília, p.24-25, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. EPA 530-R-94-036: Technical Document. Acid Mine Drainage Prediction, 1994. Technical Document.

FARFAN, J. R. J. Z.; BARBOSA FILHO, O.; de SOUZA, V. P. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

KONTOPOULOS, A. Acid Mine Drainage Control. In: Effluent treatment in the mining industry. CASTRO, S.H.; VERGARA, F.; SÁNCHEZ, M.A (Eds.). University of Concepción, p. 57-118, 1998.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 357. Brasília: 2005.