

# USO DA ESCÓRIA DO FORNO PANELA DE ACIARIA ELÉTRICA COMO AGENTE PREVENTIVO DA GERAÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA NA MINERAÇÃO DE CARVÃO<sup>1</sup>

*Luciana Angelita Machado<sup>2</sup>*

*Luísa Venuto de Freitas<sup>3</sup>*

*Pedro Ivo Villetti<sup>3</sup>*

*Rejane Maria Candiota Tubino<sup>4</sup>*

*Ivo André Homrich Schneider<sup>5</sup>*

## Resumo

O propósito deste trabalho foi estudar o uso de escória do forno panela de aciaria elétrica para prevenir a geração de drenagem ácida de minas (DAM). Os materiais utilizados foram rejeito de carvão e escória de aciaria elétrica do forno panela. A metodologia do trabalho incluiu ensaios estáticos e cinéticos. Os ensaios estáticos foram realizados pelo método de contabilização de ácidos e bases, enquanto que os ensaios cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas. Os resultados dos ensaios estáticos demonstraram que a neutralização do sistema é alcançada quando ambos os materiais são misturados na proporção de 1:1. Os resultados dos ensaios cinéticos confirmam este dado, mostrando que água lixiviada apresenta pH neutro, baixa concentração de metais e sulfatos. Pode-se concluir que mistura destes materiais em proporção correta apresenta potencial para prevenir a geração de DAM em minerações de carvão.

**Palavras-chave:** Escória de aciaria; Drenagem ácida de minas; Mineração de carvão.

## USE OF LADLE FURNACE SLAG AS AN ALKALINE AGENT TO PREVENT ACID DRAINAGE GENERATION IN COAL MINING

### Abstract

The purpose of this study was to study the use of ladle slag of electric steelmaking to prevent the generation of acid mine drainage (AMD). The materials used were coal waste and the slag from ladle furnace. The work methodology comprised static and kinetics tests. The static tests were performed by the acid-base accounting method, while the kinetic experiments were carried out in humidity cells. The results of the static tests showed that neutralization is attained when both materials are mixed in the proportion of 1:1. The kinetic tests confirm this result and the leachate water presents neutral pH a low concentration of metals and sulphate. It is possible to conclude that blending slag with coal tailing can be a viable alternative for AMD control in coal mining.

**Key words:** Steel slag; Acid mine drainage; Coal mining.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutoranda pelo PPGE3M, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

<sup>3</sup> *Graduando em Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

<sup>4</sup> *Professora Dra., DEMET e PPGE3M, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

<sup>5</sup> *Professor Dr., DEMIN e PPGE3M, Escola de Engenharia, UFRGS, RS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a maior conscientização das questões ambientais e as políticas públicas vêm fazendo com que surjam novas propostas de reciclagem e redução da quantidade de resíduos gerados. A reciclagem de resíduos, transformando em subprodutos ou co-produtos, acarreta na redução do volume de material descartado e na preservação dos recursos minerais não renováveis, tendo benefícios tanto ambientais quanto econômicos.<sup>(1)</sup>

Neste contexto, a escória de aciaria elétrica constitui um dos principais resíduos ou subprodutos gerados pelas usinas siderúrgicas. Segundo dados do Instituto Aço Brasil.<sup>(2)</sup> durante o ano de 2010, foram produzidos 32,9 milhões de toneladas de aço bruto, resultando em 4,1 milhões de toneladas de escória de aciaria. Cerca de 30% da produção brasileira de escória de aciaria não é aproveitada, e sim destinada a aterros industriais, ocasionando custos de disposição.<sup>(2)</sup> A geração de escória de aciaria mediante a utilização de fornos elétricos é de 140 kg por tonelada de aço produzido.<sup>(3)</sup> A escória de forno panela é outro resíduo da fabricação do aço, sua geração é na ordem de 15 kg por tonelada de aço,<sup>(3)</sup> o que é um volume apreciável, por apresentar características diferentes da escória de aciaria, não deve ser misturada com a escória de aciaria, tanto por razões técnicas quanto legais.

Outra fonte de geração de grandes quantidades de resíduos/rejeitos é o setor de mineração. Na mineração de carvão de Santa Catarina, os rejeitos produzidos no processo de beneficiamento implicam em volumes da ordem de 40% a 70% do material bruto minerado. Assim, as áreas de mineração de carvão e depósitos de rejeitos apresentam uma série de alterações: físicas, por alterar as condições de habitat do ambiente físico como suporte de vida; químicas, pois expõem os seres vivos a condições e materiais tóxicos; e biológicas, pois eliminam espécies e limitam o estabelecimento de novas espécies, interferindo nas cadeias alimentares e nas relações de interdependência entre as espécies.<sup>(4)</sup>

Os rejeitos gerados na mineração de carvão, sob condições atmosféricas, expostos à presença de oxigênio, água e a possível presença de bactérias acidófilas (*Acidithiobacillus sp.*) proporcionam a oxidação primária do sulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ), formando sulfatos (fêrricos e ferrosos) e ácido sulfúrico. Com a redução do pH (acidificação) da água, ocorre a mobilização de metais contidos no material geológico, gerando a drenagem ácida de mina (DAM). A DAM causa um impacto nocivo na qualidade da água superficial ou subterrânea.<sup>(5,6)</sup> Estas fontes de geração de DAM podem permanecer ativas por décadas e até mesmo por séculos após a sua produção.<sup>(7)</sup>

Em resposta a esse tipo de situação, algumas técnicas foram desenvolvidas para a prevenção da geração da DAM. Uma delas são os ensaios preditivos utilizados para avaliar o potencial de geração de DAM de uma rocha. Através de ensaios estáticos e cinéticos pode-se prever se os materiais/rejeitos irão gerar ácidos e quantificar a magnitude dessa geração. Esses testes também podem ser utilizados para identificar o potencial de neutralização de materiais.

Desta forma, neste trabalho aplicaram-se ensaios estáticos para a determinação do potencial de geração de acidez de uma amostra de rejeito de carvão, realizando um balanço entre os minerais geradores e consumidores de acidez. Verificou-se também o potencial de neutralização de uma amostra de escória de aciaria elétrica do forno panela, etapa secundária do refino do aço na aciaria elétrica. Com base nestes dados, estabeleceu-se uma relação entre rejeitos de carvão e escória de forma a prevenir a geração da DAM. Por fim, através dos ensaios cinéticos

observou-se a qualidade da água lixiviada, simulando a ação da intempérie quando os materiais estão presentes de forma individualizada ou com um correto balanceamento da mistura.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de escória de aciaria elétrica do forno panela foram obtidas de uma usina siderúrgica semi-integrada que produz aços especiais, localizada no Estado do Rio Grande do Sul. As amostras de rejeito de carvão foram obtidas de uma Mina de Carvão, que minera a Camada Barro Branco no Estado de Santa Catarina, após o beneficiamento gravimétrico por jigagem. As amostragens do rejeito de carvão e da escória de aciaria foram realizadas visando obter uma amostra representativa, durante um turno de operação da mineradora e da siderúrgica, seguiram os procedimentos descritos na NBR 10007.<sup>(8)</sup> Após a coleta, as amostras foram transportadas para o Laboratório de Estudos Ambientais para a Metalurgia (LEAmet), no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), para realização das operações de secagem, homogeneização, quarteamento, peneiramento, cominuição, análise e realização dos experimentos.

As análises de metais do rejeito de carvão e da escória de aciaria elétrica do forno panela foram realizadas com abertura de amostra pelo método EPA 3052<sup>(9)</sup> e a leitura por espectrofotometria de absorção atômica (Equipamento Varian AA1275). A composição mineralógica das amostras foi realizada por difração de raios X (DRX). Os difratogramas foram obtidos com a utilização de um difratômetro de raios X marca Siemens, modelo D5000 - radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,406 \text{ \AA}$ ), voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. As amostras também foram analisadas em relação ao teor de cinzas, matéria volátil e carbono fixo. As análises de cinzas foram realizadas conforme a NBR 8289.<sup>(10)</sup> A matéria volátil foi determinada seguindo a norma NBR 8290.<sup>(11)</sup> Os valores obtidos foram corrigidos em relação ao teor de umidade. As análises do teor de umidade foram realizadas conforme NBR 8293.<sup>(12)</sup> A determinação do carbono fixo foi realizada por diferença, subtraindo-se de cem a soma das porcentagens de umidade, cinzas e matérias voláteis.<sup>(13)</sup>

Os ensaios estáticos foram realizados pelo método de contabilização de ácidos e bases (ABA - do inglês, *Acid Base Accounting*). A finalidade foi determinar o balanço entre a produção de acidez e o consumo de acidez (neutralização) pelos componentes minerais da amostra de rejeito de carvão e da escória.<sup>(14,15)</sup> Para a realização dos ensaios estáticos, foram realizados testes preliminares: determinação do pH da pasta, com o objetivo de identificar as condições de acidez ou alcalinidade das amostras, e o teste *Fizz*, para definir o volume e a concentração de ácido clorídrico a ser empregado na determinação do potencial de neutralizações.<sup>(14,15)</sup> A determinação do potencial de acidez (AP) foi realizada a partir da análise de enxofre total, realizada via instrumental utilizando o equipamento Leco Corporation, modelo 432-SC.<sup>(16)</sup> Para a determinação do potencial de neutralização (NP), o procedimento consistiu em submeter a amostra a uma solução ácida (conforme valores determinados pelo teste *Fizz*) seguido da titulação da solução ácida com hidróxido de sódio (com a mesma concentração do ácido) até pH 7,0. A partir dos valores determinados do AP e NP calcula-se, por diferença, o potencial de neutralização líquido (NNP), expresso em  $\text{kg CaCO}_3 \text{ t}^{-1}$  de amostra. Valores de NNP < 20 indicam que o material gera DAM, valores de NNP > 20 indicam que o material não gera a DAM, e valores de NNP entre -20 e 20 demonstram uma situação indefinida.<sup>(17,18)</sup>

Os ensaios cinéticos foram realizados pelo método de células úmidas, conforme procedimento D 5744.<sup>(19)</sup> Foram utilizadas quatro células úmidas para realização do ensaio cinético. Uma célula foi preenchida somente com rejeito de carvão e outra célula somente com escória de aciaria elétrica do forno panela. As outras duas células foram preenchidas com mistura de materiais na proporção rejeito de carvão:escória na proporção de 1:1 (para conferir um NNP igual a zero) e na proporção de 1:1,5. Na Figura 1 um esquema do experimento. A mistura dos materiais foi realizada 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 em relação aos parâmetros de qualidade de água: pH, potencial redox, sulfato e metais (Fe, Al e Cr). As análises foram realizadas semanalmente, seguindo os procedimentos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.<sup>(20)</sup> O período de ensaio, recomendado em no mínimo de 20 semanas pela norma D 5744,<sup>(19)</sup> foi de 40 semanas.

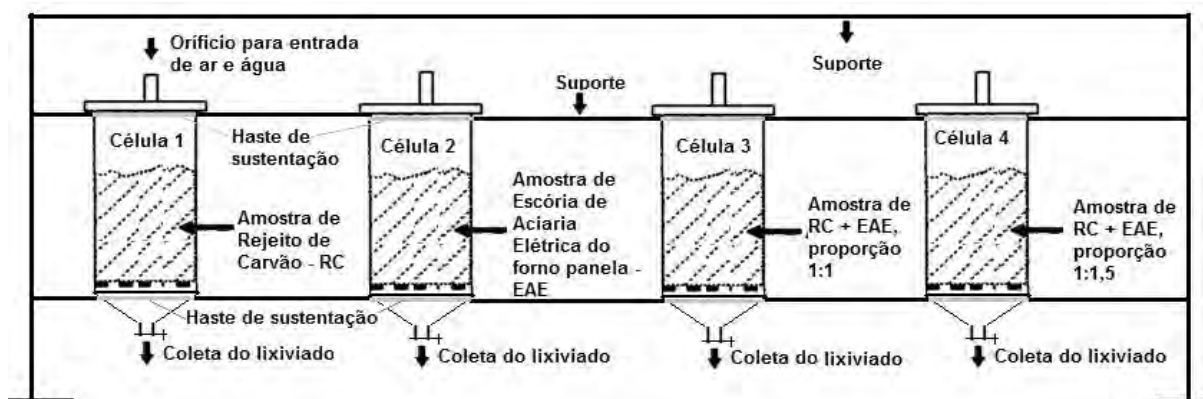


Figura 1. Esquema dos ensaios cinéticos em células úmidas para a previsão da geração da DAM.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra a análise de alguns metais presentes na escória de aciaria elétrica do forno panela e do rejeito de carvão. A análise foi realizada pelo método EPA 3052, que avalia a presença dos metais. Pode-se observar que o rejeito de carvão é rico em Fe e Al. O Al está associado aos silicatos e o Fe à pirita. Isto pode ser confirmado com a composição mineralógica do rejeito de carvão, constituído principalmente pelos seguintes compostos cristalinos: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e Ilita ( $\text{K}_{1-1,5}\text{Al}_4[\text{Si}_{7-6,5}\text{Al}_{1-1,5}\text{O}_{20}](\text{OH})_4$ ). No caso da escória, os elementos que estão em maior concentração são Al, Ca, Fe, Cr e Si. A presença de Cd, Co, Cu, Ni e Pb também foi detectada, mas em concentrações menores. Analisando as características mineralógicas da escória em estudo, os picos mais intensos são atribuídos gehlenita ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ), marwinita ( $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), wustita ( $\text{FeO}$ ) e periclásio ( $\text{MgO}$ ). Pode-se caracterizar a escória como básica, pois conforme os autores Batagin e Esper,<sup>(21)</sup> os componentes mineralógicos das escórias denominados melilitas (akermanita e gehlenita) e a marwinita são características de escórias básicas, assim como a wollastonita e a anortita são características das escórias ácidas.

**Tabela 1.** Resultado da análise da composição química da escória de aciaria elétrica do forno panela e do rejeito de carvão

Parâmetro	Al	Ca	Cd	Co	Cu	Cr	Fe	Ni	Pb	Si
	mg kg <sup>-1</sup>									
Escória de aciaria elétrica	15558	119228	14	<11	72,5	3656	88271	87,5	6,6	214000
Rejeito de Carvão	45013	7110	1,4	20,8	27,8	30,4	73050	28,3	88,7	-

A Tabela 2 apresenta a análise imediata da escória de aciaria elétrica do forno panela e do rejeito de carvão em termos de cinzas, matéria volátil, umidade, carbono fixo e enxofre total, em base seca. Pode-se observar que a escória de aciaria elétrica do forno panela apresenta 100% de cinzas, 1,7% de matéria volátil, 0% de carbono fixo e 0,0% de enxofre total. O rejeito de carvão apresenta 81,3% de cinzas, 12,3% de matéria volátil, 5,1% de carbono fixo e 10,6% de enxofre total. Os resultados obtidos para o rejeito de carvão estão concordantes com pesquisa realizada por Menezes<sup>(22)</sup> com rejeito de carvão do mesmo tipo e local. O autor encontrou teor de cinza 80,4%, 12,4% de matéria volátil, 7,1% carbono fixo e 9,7% de enxofre total.

**Tabela 2.** Resultado da análise imediata da escória de aciaria elétrica do forno panela e do rejeito de carvão

Parâmetro	Cinzas (%)	Matéria Volátil (%)	Umidade (%)	C <sub>Fixo</sub> (%)	S <sub>Total</sub> (%)
Escória de aciaria elétrica	100,0	1,7	1,5	0,0	0,0
Rejeito de carvão	81,3	12,3	1,3	5,1	10,6

O resultado do pH da pasta referente à escória de aciaria elétrica do forno panela foi de 11,7, indicando a alta alcalinidade. O pH da pasta referente ao rejeito de carvão foi de 5,3, mostrando a tendência do material em gerar ácido. O teste *Fizz*, por meio da classificação do som efervescente produzido, apresentou resultado “moderado”, para a escória e “nenhum” para o rejeito de carvão. A intensidade do som no teste *Fizz* está relacionada com a presença de minerais consumidores de ácido (carbonatos ou óxidos de cálcio e magnésio), quanto maior for o som, maior será a quantidade de minerais consumidores de ácido contidos na amostra.

Os resultados de contabilização do potencial de geração de acidez e do potencial de neutralização dos materiais estão apresentados na Tabela 3. O valor do AP e do NP da amostra de escória foi de 1,0 e 353,1 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, respectivamente. O valor do NNP foi de 352,1 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>. O NNP positivo indica que a amostra não irá gerar ácido. O rejeito de carvão apresentou um AP de 331,2 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup> e um NP de 6,8 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, o que resultou em um NNP negativo de - 324,4 kg CaCO<sub>3</sub> t<sup>-1</sup>, indicando que o material irá gerar DAM na presença de ar e água. Com base nos resultados de NNP, estabeleceu-se também a proporção de mistura. A relação obtida foi de 1 tonelada de rejeito de carvão para 1,1 tonelada da escória. Em termos práticos, esse valor de mistura foi arredondado para uma proporção de 1:1 de rejeito de carvão para escória. Além desta proporção, empregou-se também a proporção rejeito:escória de 1:1,5 para observar se o acréscimo de material alcalino, como fator de segurança de 50%, teria um resultado superior na qualidade do lixiviado.

**Tabela 3.** Resultados de ensaios estáticos para a escória de aciaria elétrica do forno panela e do rejeito de carvão

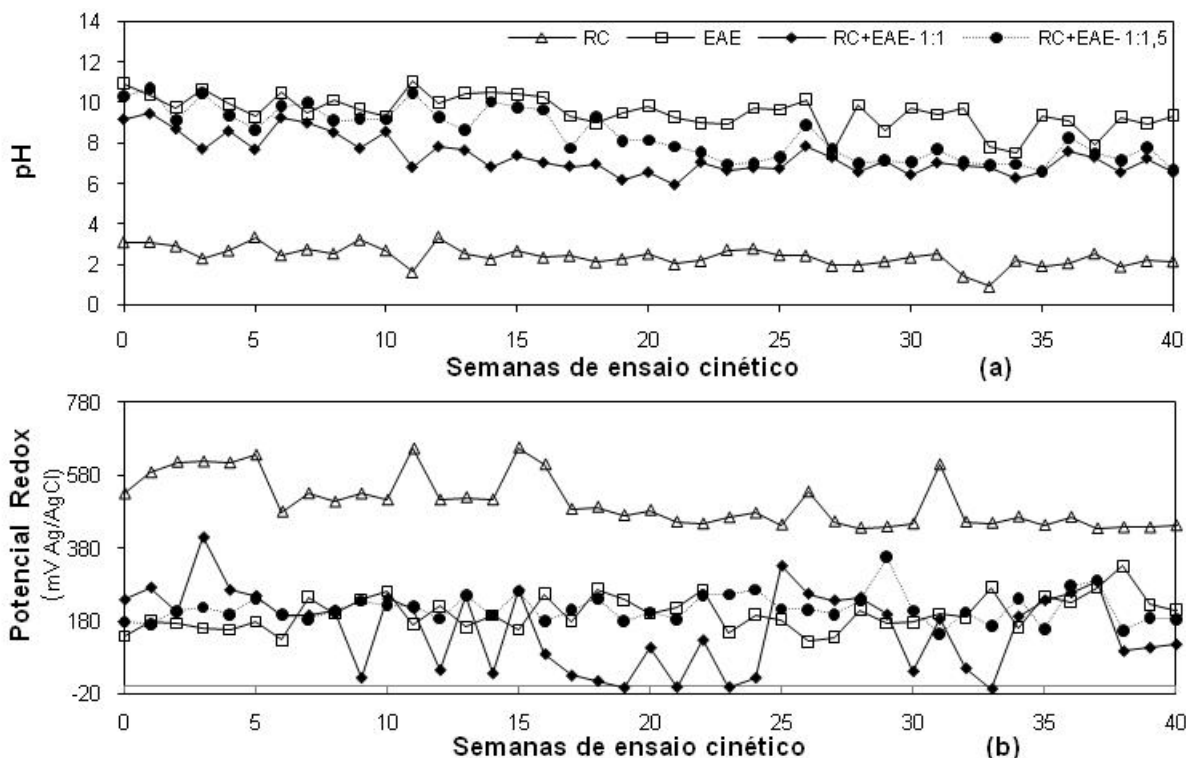
<b>Parâmetro</b>	<b>pH</b> em pasta	<b>Teste Fizz</b>	<b>AP</b>	<b>NP</b> kg CaCO <sub>3</sub> t <sup>-1</sup>	<b>NNP</b>	<b>Geração de DAM</b>
Escória de aciaria elétrica	11,7	moderado	1,0	353,1	352,1	Não
Rejeito de carvão	5,3	nenhum	331,2	6,8	- 324,4	Sim

Os ensaios cinéticos foram conduzidos para avaliar se as proporções estabelecidas nos ensaios estáticos estão adequadas para prevenir a geração de DAM. Os resultados do ensaio cinético em célula úmida realizados em 40 semanas de ensaios estão apresentados nas Figuras 2 a 3.

A Figura 2a mostra os resultados referentes ao pH da água lixiviada da célula contendo somente rejeito de carvão, contendo somente escória e com as misturas nas proporções de 1:1 e 1:1,5. O lixiviado da célula contendo somente rejeito de carvão apresenta um pH ácido em todas as análises, com valores de pH iniciais em torno de 3,1. Decresce gradualmente, estabilizando-se em torno de pH 2,0. Estudos realizados por Farfan, Barbosa Filho e Souza<sup>(23)</sup> reportam que os valores de pH abaixo de 4,0 e as elevadas concentrações de metais típicos da DAM. Ainda, de acordo com os autores, essa situação ocasiona reações de oxidação, aumentando a toxicidade no entorno e prejudicando à fauna aquática. Em relação aos valores de pH da água lixiviada da célula contendo somente escória, o pH tendeu a ficar alcalino, na faixa de 11,0 a 7,8. Na célula contendo a mistura dos materiais na proporção 1:1 de rejeito de carvão e escória, os valores ficaram inicialmente na faixa alcalina, com pH inicial em 9,2. Após, passaram para valores neutros próximos a 7,0. No lixiviado da célula com rejeito de carvão e escória na proporção 1:1,5, apesar do comportamento similar, os valores do pH foram superiores aos valores encontrados para a mistura na proporção 1:1. Desta forma, com base nos estudos em células úmidas durante as 40 semanas de ensaio cinético, observou-se que o rejeito de carvão gera DAM, pois o pH do lixiviado foi baixo em todas as análises. A escória de aciaria elétrica do forno panela produz um lixiviado alcalino. O pH dos lixiviados nas misturas empregadas (1:1 e 1:1,5) mostraram-se adequados, ficando dentro da faixa de lançamento previsto pela Resolução Conama 430<sup>(24)</sup> (pH de 5 a 9). Assim, a quantidade de material alcalino utilizada foi suficiente para elevar o pH do lixiviado aos níveis estabelecidos pela legislação durante todo o experimento.

A Figura 2b 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 441 mV Ag/AgCl, demonstrando uma condição altamente oxidante que favorece a degradação de sulfetos e a ocorrência de DAM. Os valores do potencial redox do lixiviado da célula com escória são menores que os valores do lixiviado do rejeito de carvão, variando entre 130 a 210 mV Ag/AgCl. No lixiviado da mistura de rejeito de carvão com escória na proporção 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 com valores negativos em algumas semanas (semana 19, 21, 23 e 33). Com relação à análise do lixiviado da célula do rejeito de carvão com escória de aciaria elétrica do 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 mais constante. Sabe-se que 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. Os lixiviados das células com a mistura dos materiais, na proporção de 1:1 e 1:1,5, os valores do potencial redox foram menores que no lixiviado da célula somente com rejeito de carvão, logo a quantidade de íons dissolvido no extrato lixiviado também foram menores.



**Figura 2.** Valores de pH (a) e potencial redox (b) nos lixiviados das células úmidas com rejeito de carvão (RC) e escória de aciaria elétrica do forno panela (EAE) nos ensaios cinéticos.

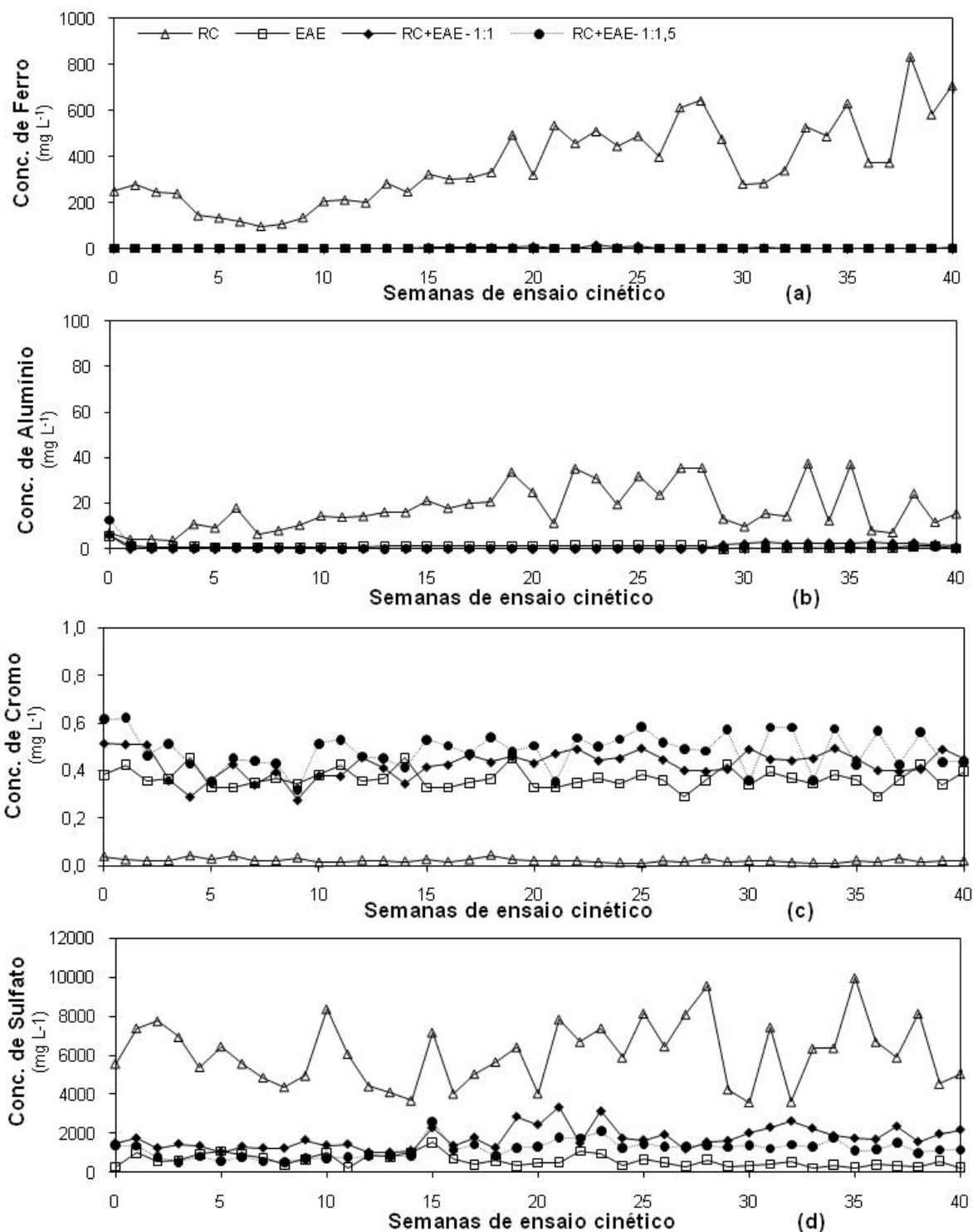
Figura 3a apresenta os resultados da lixiviação de ferro das células úmidas em função do tempo. O lixiviado referente à célula com rejeito de carvão apresentou concentrações consideráveis de ferro. A concentração inicial de Fe foi de  $249,4 \text{ mg L}^{-1}$ . Nas sete primeiras semanas houve uma diminuição gradual deste elemento, chegando a  $96,4 \text{ mg L}^{-1}$ . Após a semana 8, houve um aumento, alcançando a concentração de  $835,4 \text{ mg L}^{-1}$  na semana 38. O lixiviado da célula com somente escória apresentou concentrações de ferro na água drenada muito baixas, próximo a zero. Nas células com rejeito de carvão e escória na proporção de 1:1 e 1:1,5, as quantidades de ferro nos lixiviados também foram próximas a zero, indicando que a presença de escória inibiu a oxidação da pirita. A oxidação da pirita e a presença de ferro em suas diferentes forma na água de lixiviação dependem muito do pH no sistema. Segundo os estudos realizados por Potgieter-Vermaak et al<sup>25</sup> em drenagens ácidas, onde o valor de pH é baixo, predomina a forma iônica  $\text{Fe}^{2+}$  sobre a  $\text{Fe}^{3+}$ . O ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) é facilmente removido da DAM devido à sua baixa solubilidade e precipitação como hidróxido em valores de pH superiores 3,0. O ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), também pode ser removido da solução como hidróxido, embora em valores de pH menores que 7,5 a precipitação seja lenta e incompleta. Comparando os resultados obtidos de concentração de ferro nos lixiviados das células analisadas com os valores de lançamento de efluente,<sup>(23)</sup> que deve ser inferiores a  $15 \text{ mg L}^{-1}$ , pode-se perceber que apenas na célula com rejeito de carvão a concentração de ferro ficou acima do limite permitido pela norma.

Os resultados da concentração de alumínio presentes na água drenada das células úmidas estão apresentados na Figura 3b. As maiores concentrações de alumínio foram no lixiviado da célula com rejeito de carvão. Na célula com escória a concentração de alumínio no lixiviado foi maior nas semanas iniciais, com  $5,6 \text{ mg L}^{-1}$  na semana zero, sendo que na semana 40 a concentração de alumínio no lixiviado foi de apenas  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ . Os lixiviados das células com misturas nas proporções de 1:1 e 1:1,5, o comportamento foi similar e muito próximo a zero. A maior concentração de alumínio no lixiviado da célula contendo rejeito de carvão ocorreu devido ao pH baixo ( $< 3,0$ ). Nos lixiviados das células com escória, quanto no lixiviado das misturas 1:1 e 1:1,5, o pH estava próximo de 7,0 ou acima. Em valores de pH acima de 4,5, o Al é pouco solúvel e precipita na forma de hidróxidos.

A Figura 3c apresenta os resultados da concentração de cromo na água drenada nos ensaios cinéticos. Observou-se que na água drenada da célula com rejeito de carvão, as quantidades de cromo foram muito baixas durante todas as análises. O lixiviado das células com escória de aciaria elétrica, as quantidades ficaram entre  $0,2$  a  $0,5 \text{ mg L}^{-1}$  da semana zero a 40, respectivamente. As quantidades lixiviadas de cromo da célula com a proporção 1:1 foram maiores que as encontradas no lixiviado da célula de rejeito de carvão, sendo que os valores foram próximos do lixiviado da célula com apenas escória. A água drenada da célula na proporção de mistura de 1:1,5 foi a que apresentou as maiores concentrações de cromo na maioria das semanas. Mesmo assim, o limite ficou dentro de lançamento estipulado pela Resolução Conama 430/2011 (limite de  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ ).<sup>(24)</sup> A presença detectada de cromo, mesmo que em concentrações baixas, está relacionada com a característica da amostra da escória, gerada na produção de aços especiais, apresentando considerável concentração de cromo,  $1.178,9 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabela 1).

A Figura 3d 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  $9984,3 \text{ mg L}^{-1}$ . Os resultados obtidos da concentração de sulfato no lixiviado coletado da célula com escória de aciaria elétrica do 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 na proporção de 1:1 ficou abaixo de  $3000 \text{ mg L}^{-1}$ . As quantidades de sulfato lixiviadas da célula com proporção de 1:1,5 foram menores em todas as análises que as encontradas no lixiviado da mistura na proporção 1:1. Ao relacionar as quantidades de sulfatos do lixiviado da mistura na proporção 1:1 e 1:1,5 com as quantidades lixiviados do rejeito de carvão, as quantidades foram menores durante todo o ensaio cinético, demonstrando que a adição de escória de aciaria elétrica do forno panela inibiu a oxidação da pirita.





**Figura 3.** Concentração de ferro (a), alumínio (b), cromo (c) e sulfato (d) nos lixiviados das células úmidas com rejeito de carvão (RC) e escória de aciaria elétrica do forno panela (EAE) nos ensaios cinéticos nos ensaios cinéticos.

#### 4 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos na presente pesquisa as amostras de rejeitos de carvão têm potencial de geração de acidez, aumentando o potencial de geração de DAM. A escória de aciaria elétrica do forno panela possui potencial de neutralização, podendo ser utilizada como material alcalino para evitar a DAM.

É importante enfatizar que a utilização de uma proporção 1:1 de rejeito de carvão misturado com escória de aciaria elétrica do forno panela é suficiente para inibir a lixiviação de ferro, alumínio, cromo e sulfatos, bem como elevar o pH. Ou seja, a escória estudada é eficaz na prevenção da geração de DAM.

Portanto, misturas de rejeitos de carvão e escória do forno panela de aciaria elétrica apresentam potencial para minimizar a geração de DAM tanto em depósitos de carvão em superfície como em subsolo (procedimento conhecido na mineração com *backfill*).

## REFERÊNCIAS

- 1 MEMOLI F., BRIONI O., MAPELLI C., GUZZON M., BONETTI O. **Recycling of ladle slag in the EAF: a way to improve environmental conditions and reduce variable costs in the steel plants**. The results of stefana spa (Italy) // XXXVII steelmaking seminar – International. ABM, Porto Alegre, RS. 2006.
- 2 INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados de mercado**. 2011. Disponível em: < [www.ibs.org.br](http://www.ibs.org.br)>. Acesso em: 18 dez. de 2012.
- 3 GEYER, R. M. T. Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto. **Tese de Doutorado**. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de materiais – PPGE3M, Universidade federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2001.
- 4 LAWREY, J. D. The relative decomposition potential of habitats variously affected by surface coal mining. **Canadian Journal Botanic**, n.55, p.1544-1552, 1976.
- 5 HUTCHINSON, I.P.G.; ELLISON, R.D.E. Mine Waste Management – A Resource for Mining Industry Professionals, Regulators and Consulting Engineers, In: **Lewis Publishers**, 2 ed. 1992.
- 6 BENZAAZOUA, M.; BUSSIEÉRE, B.; DAGENAIS, M.; ARCHAMBAULT, M. Kinetic tests comparison and interpretation for prediction of the Joutel tailings acid generation potential. **Environmental Geology**, v.46, p.1086–1101, 2004.
- 7 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.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos . Rio de Janeiro, 2004.
- 9 ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **EPA SW-846**: Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Revision 3. Washington, 2004.
- 10 ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8289**: determinação do teor de cinza. Rio de Janeiro, 1983.
- 11 ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8290**: determinação do teor de matérias voláteis. Rio de Janeiro, 1983.
- 12 ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8293**: determinação de umidade. Rio de Janeiro, 1983.
- 13 ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8299** - Carvão mineral: determinação do carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983.
- 14 SOBEK, A.A.; SCHULLER, W.A.; FREEMAN, J.R.; SMITH, R.M. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Mineseils, **EPA 600/2-78-054**, 1978.
- 15 ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **EPA 530-R-94-036**: Technical Document. Acid Mine Drainage Prediction, 1994. Technical Document.
- 16 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **ASTM D 4239**. Test method for sulfur in the analysis sample of coal and coke using high temperature tube furnace combustion methods. 1983.
- 17 LAWERENCE, R. W.; WANG, Y., Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage. In: **Proceeding**... 4th International Conference on

- Acid Rock Drainage. MEND, Natural Resources Canada, Ottawa. p.449-464, 1997.
- 18 ADAM, K.; KOUTIS, A.; GAZEA, B.; KONTOPOULOS, A. **Evaluation of static tests used to predict the potential for acid drainage generation at sulfide mine sites.** Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 1997.
  - 19 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.
  - 20 AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 21th Edition. Washington D.C.: APHA-AWWA-WEF, 2005.
  - 21 BATAGIN, A. F.; ESPER. M.W. **Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento Portland de alto-forno.** São Paulo: ABCP, 1988.
  - 22 MENEZES, J. C. S. S. Produção de coagulantes férricos na mineração de carvão. **Tese de Doutorado.** Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de materiais – PPGE3M, Universidade federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2009.
  - 23 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.
  - 24 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 430.** Brasília: 2011.
  - 25 POTGIETER-VERMAAK, S. S.; POTGIETER, J. H.; MONAMA, P.; VAN GRIEKEN, R.; **Mineral Engineering**, 2006, 19, 454.