

# DESEMPENHO DE COBERTURA SECA EM ESCALA PILOTO PARA ABATIMENTO DE DAM GERADA POR REJEITO DE CARVÃO

Vicente P. de Souza<sup>1</sup>, Mario V. Possa<sup>1</sup>, Paulo S.M., Soares<sup>1</sup>, Anderson B. Soares<sup>1</sup>, Ana V.A.F Bertolino<sup>2</sup> & Marcia R.R. de Souza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CPMA/SETL/Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)  
Avenida Pedro Calmon, 900 - Cidade Universitária Rio de Janeiro - RJ CEP 21941-908  
Tel: (21) 3865-7288 Fax: (21) 2260-2837. E-mail: vpsouza@cetem.gov.br

<sup>2</sup>Departamento de Geografia/Laboratório de Geociências/FFP Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
Rua: Francisco Portela, 794 - Paraíso - São Gonçalo - Rio de Janeiro - CEP 24435-000  
Telefone: (21) 26043232 R 245 Fax: (21) 26043232. E-mail: anaval@uerj.br

<sup>3</sup>Carbonífera Criciúma S.A./ Unidade Mineira II - Verdinho  
Rua: Nereu Beloli, 44, bairro Verdinho, Município de Forquilha / SC - CEP 88850-00  
Telefone: (48) 34638000 R 8402 Fax: (48) 34638065. E-mail: marciaraquel@carbocri.com.br

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a concepção de um projeto de cobertura seca (Dry Cover), em escala piloto, e avaliação dos resultados obtidos nos primeiros vinte meses de monitoramento. As coberturas secas foram projetadas pelo CETEM em uma unidade protótipo instalada na Carbonífera Criciúma S/A, no município de Forquilha/SC. O sistema é composto por quatro cavidades com volume aproximado de 110m<sup>3</sup> cada, com lisímetros (6,28m<sup>3</sup>) no centro e preenchidas com rejeito oriundo da operação de beneficiamento do carvão. Três das quatro células receberam coberturas diferentes, enquanto em uma delas o rejeito encontra-se exposto diretamente às intempéries, tornando-se dessa forma o referencial que irá permitir a comparação com o comportamento das demais no que diz respeito à geração de drenagem ácida (DAM) e volume de efluente percolado. Os materiais e as espessuras das camadas utilizadas nos sistemas de cobertura (30cm), assim como a posição e as dimensões dos lisímetros foram determinadas por modelagem numérica. As condições que estão sendo estudadas são as seguintes: (a) Célula 1 - rejeito sem cobertura; (b) Célula 2 - rejeito coberto com uma mistura compactada de rejeito fino e rejeito grosso; (c) Célula 3 - rejeito coberto com argila compactada e solo orgânico; e, finalmente, (d) Célula 4 - rejeito coberto com cinza, argila e cinza compactadas e solo orgânico. Em cada camada de cobertura foram instalados sensores de temperatura, umidade e sucção. O objetivo do estudo em longo prazo é selecionar o tipo de cobertura ideal para o abatimento da DAM gerada e que poderá vir a ser aplicado para os demais rejeitos da região. Os resultados iniciais mostraram uma nítida diferença entre os tipos de cobertura, evidenciando maior eficiência de algumas na redução do volume de água da chuva percolado através dos rejeitos. O volume percolado no período em relação ao volume total precipitado foi: Célula 1= 33%; Célula 2= 14%; Célula 3 < 1% e Célula 4= 3,5%. Os efluentes percolados dos lisímetros I e II apresentam pH na faixa de 0,70 - 3 enquanto nos lisímetros III e IV os valores de pH oscilam na faixa de 6,40 - 7,30. Para as espécies dissolvidas as concentrações de Mn estão compreendidas na faixa de 50 - 600 mgL<sup>-1</sup> para os lisímetros I - II e na faixa de 4,0 - 14,0 mgL<sup>-1</sup> para os lisímetros III - IV. Já os valores das concentrações do SO<sub>4</sub> oscilam entre 90 - 215 gL<sup>-1</sup> para os lisímetros I - II e 1 - 3 gL<sup>-1</sup> para os lisímetros III - IV. Estes valores mostram que a qualidade da água percolada dos lisímetros cobertos (III e IV) está em condições melhores do que a dos lisímetros descobertos (I e II). De forma a alcançar maior consistência na análise e interpretação dos fenômenos químicos que ocorrem nas células experimentais, a próxima fase dos trabalhos na unidade protótipo compreenderá a utilização de modelos numéricos geoquímicos e de balanço hídrico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cobertura seca, carvão, piritita, percolação, drenagem ácida de mina.

## ABSTRACT

This paper presents the design of a dry cover, in pilot scale, and the evaluation of the results obtained in the first twenty months of monitoring. The dry covers were designed by CETEM in a prototype unit installed in the Carbonífera Criciúma S/A, in the city of Forquilha/SC. The system is composed of four pits of 110m<sup>3</sup> each, with lysimeters (6,28m<sup>3</sup>) filled with waste from a coal beneficiation plant. Three of the four cells received different covers, while in one of them the waste was exposed with no cover, to be the reference to compare the performance of the cover as to the acid generation and volume of the effluent. The materials and the thickness of the layers used in the cover systems (30cm), as well as the position of the lysimeters and dimensions were determined for numeric modeling. The following conditions are being studied: (a) Cell 1 - waste as is; (b) Cell 2 - waste covered with a mixture of fine and coarse wastes; (c) Cell 3 - waste covered with compacted clay and organic soil, and finally, (d) Cell 4 - waste covered with ash compacted, compacted clay, ash compacted and organic soil. In each covering layer was installed temperature, water content and suction sensors. The long-term study objective is to select the ideal type of cover

for the DAM abatement that could be applied for others similar wastes of that region. Acid waters from lysimeters II and I present pH in the range 0.70 – 3.0, while in lysimeters III and IV, pH values oscillate in the range 6.40 - 7.30. For the dissolved species, Mn concentrations are oscillating in the range 50 - 600 mgL<sup>-1</sup> for lysimeters I - II and 4.0 - 14.0 mgL<sup>-1</sup> for the lysimeters III - IV. Values for SO<sub>4</sub> concentrations oscillate between 90 - 215 gL<sup>-1</sup> for lysimeters I - II and 1 - 3 gL<sup>-1</sup> for lysimeters III - IV. Analyzing the above results it is observed that the overall quality of percolate water from the covered waste is much better than that of percolate water from uncovered. In way to reach larger consistence in the analysis and interpretation of the chemicals phenomena that are being processed in the experimental cells the next phase of the study in the Prototype Unit will apply geochemical and water balance models.

**KEY WORDS:** Dry cover, coal, pyrite, seepage, acid mine drainage (AMD).

## 1. INTRODUÇÃO

Cobertura seca é uma alternativa que pode ser utilizada na mitigação dos efeitos da drenagem ácida de mina (DAM). A DAM ocorre quando minerais sulfetados entram em contato com oxigênio e água, gerando reações químicas que resultam em um efluente ácido e com elevada concentração de metais. No presente trabalho, estão sendo estudados rejeitos, com elevado teor de pirita (FeS<sub>2</sub>), oriundos do beneficiamento do carvão mineral (camada Barro Branco) da Unidade Mineira II – (UM II) Mina Verdinho, da Carbonífera Criciúma S/A (CCSA). Esses rejeitos são dispostos a céu aberto em depósitos ou bacias de decantação. Nos depósitos, com a água da chuva que se infiltra e sob a ação do oxigênio e das bactérias, ocorrem reações químicas que geram DAM. O efluente percolado pode contaminar a água superficial e subterrânea, ocasionando sérios danos ao meio-ambiente. A poluição hídrica devido à DAM é o principal impacto ambiental na região sul de Santa Catarina (Alexandre e Krebs, 1995).

Uma cobertura seca é formada por uma ou mais camadas de material não reativo que são dispostos sobre os rejeitos com objetivo de minimizar os efeitos da DAM. Ressalta-se que o uso de uma cobertura seca é uma medida que diminui os efeitos da DAM, mas não exclui um tratamento posterior do efluente percolado. As funções das camadas que podem compor uma cobertura seca são (Daniel e Koerner, 1993): proteção, drenagem e barreira. A barreira é a camada mais importante de uma cobertura e pode ter diversas funções. A cobertura pode ser classificada em função do efeito que exerce na inibição da DAM como barreira hidráulica, barreira de transporte de oxigênio, barreira ao consumo de oxigênio, barreira capilar, barreira evapotranspirativa ou barreira de inibição de reação (Vanapalli e outros, 1996).

Em um projeto de cobertura seca procura-se utilizar materiais de baixo custo e que estão disponíveis na região da instalação (solos, materiais não reativos, etc). A primeira fase do projeto compreende uma investigação do local, programa de amostragem e caracterização dos materiais (ensaios de campo e laboratório). A segunda fase é a definição, com uso de modelagem numérica, dos tipos de cobertura mais eficientes na mitigação de efeitos da DAM, utilizando os parâmetros obtidos na primeira fase assim como da coleta de informações sobre as condições climáticas. A terceira e última fase compreende o monitoramento do desempenho das coberturas em campo (O’Kane e outros, 2002).

O projeto de cobertura seca, apresentado neste trabalho, foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e contou com o apoio financeiro da FINEP e da CCSA. Suas fases iniciais são descritas detalhadamente em Borghetti Soares entre outros (2009). O projeto resultou na construção de uma unidade protótipo localizada na Mina Verdinho da CCSA, no município de Forquilha/SC. A unidade contém células instrumentadas com sensores eletrônicos para medir temperatura, umidade e sucção e representam as coberturas secas que foram selecionadas a partir dos resultados da modelagem numérica do fluxo de água. A unidade está em operação desde 2007, sendo que os resultados de aquisição automática dos sensores começaram a ser colhidos em maio deste mesmo ano. Este trabalho apresenta alguns resultados obtidos nos primeiros vinte meses de operação (maio 2007 a dezembro 2009) que são parte de um estudo em longo prazo sobre cobertura seca. A avaliação do desempenho está sendo feita a partir de dados obtidos no monitoramento e servirão para realizar um balanço hídrico de cada tipo de cobertura. Estes dados serão comparados com um modelo numérico do fluxo de água, utilizando programas computacionais comerciais usualmente citados na literatura técnica (Vadose, Soilcover). Adicionalmente será feita a modelagem dos fenômenos geoquímicos que ocorrem nos rejeitos cobertos.

## 2. Metodologia

### 2.1. Projeto da Unidade Protótipo

A redução dos impactos ambientais causados pela DAM pode ser obtida com o uso de cobertura seca sobre os rejeitos de carvão potencialmente causadores de acidez. Entretanto, existem outras formas de mitigar os impactos da DAM que podem ser utilizadas isoladamente ou em conjunto, tais como, cobertura úmida, tratamento de efluentes, uso de tratamento passivo, etc (Borma e outros, 2002). A escolha da solução a ser adotada depende da viabilidade técnica e econômica. Antes da elaboração do projeto de cobertura seca em escala piloto, estudou-se o potencial de geração de drenagem ácida dos rejeitos, através de ensaios cinéticos e estáticos (Guevara, 2008; Mendonça, 2007). Esta é uma etapa preliminar importante que deve ser realizada antes de se iniciar um projeto de cobertura seca. Os resultados obtidos confirmaram que os rejeitos em questão são geradores de ácido.

O projeto desenvolvido na Mina Verdinho seguiu as três etapas propostas por O'Kane e outros (2002):

- (1) Avaliação da área de aplicação, amostragem e caracterização de materiais (determinação de parâmetros geotécnicos por ensaios de laboratório e de campo);
- (2) Modelagem numérica das coberturas utilizando os parâmetros obtidos na etapa 1; e
- (3) Construção em campo de uma unidade protótipo em escala piloto para o exame de três casos de coberturas secas selecionadas a partir dos resultados obtidos na etapa 2 e um caso considerando o rejeito sem cobertura.

Inicialmente foi realizada uma visita técnica à área da mina para definição dos materiais disponíveis na região e que poderiam ser utilizados no projeto. Uma vez selecionados os materiais (solos, rejeitos e materiais não reativos), amostras foram coletadas para a realização de ensaios geotécnicos em laboratório, tais como, ensaios de caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e densidade real dos grãos), ensaios de permeabilidade, ensaios de compactação, ensaios de curva característica e ensaios de adensamento. Adicionalmente foram feitos ensaios "*in situ*" para a determinação da condutividade hidráulica saturada e da densidade do rejeito. Os resultados destes ensaios serviram para alimentar programas computacionais de fluxo de água e balanço hídrico. A modelagem numérica foi feita em duas etapas: 1) modelagem unidimensional do balanço hídrico para definição das coberturas secas a serem testadas na estação (programa Soilcover); e 2) modelagem bidimensional do fluxo de água para definição das dimensões e posição do lisímetro a ser instalado no rejeito (programa Seep/Geoslope). Detalhes dessas modelagens podem ser consultados em Borghetti Soares e outros (2009).

As camadas das coberturas foram dimensionadas com uma espessura de 30cm cada e a camada de rejeito com 3m. Uma cavidade (cava) na forma de tronco de pirâmide invertido (base = 4x4m, topo = 7,5x 7,5m, altura = 3m e volume de 110m<sup>3</sup>) foi dimensionada para conter o rejeito. No interior da cava foi instalado um lisímetro (diâmetro = 2m e altura = 2m) para a coleta de uma parcela da água da chuva que percola no rejeito. No presente trabalho convencionou-se chamar de célula experimental o conjunto cava e cobertura. As células representam um modelo que reproduz a parte superior de uma pilha de rejeitos com diferentes tipos de cobertura. Os resultados das modelagens feitas com o programa Soilcover (Soilcover, 2000) conduziram ao projeto de três células que juntamente com uma célula que representa a condição do rejeito descoberto configuram os quatro casos estudados descritos como se segue:

- (1) **célula 1:** rejeito sem cobertura, sendo o referencial às demais condições. Este rejeito possui granulometria grossa (de 1 a 32mm) e convencionalmente será referido no texto como rejeito grosso;
- (2) **célula 2:** rejeito grosso coberto com uma camada compactada de uma mistura composta de rejeito grosso e rejeito fino (granulometria inferior a 1mm), que convencionalmente será referida no texto como rejeito misturado. O uso deste tipo de cobertura tem o objetivo de investigar a influência da adição desta mistura na minimização fluxo de água para dentro do rejeito grosso;
- (3) **célula 3:** rejeito grosso coberto por uma camada compactada de rejeito misturado, uma camada de argila compactada (grau de compactação de 98% e umidade em campo 1% abaixo da ótima) e uma camada de solo orgânico (superficial e de proteção). A camada de argila é utilizada presentemente nos taludes laterais dos depósitos de rejeito da empresa;
- (4) **célula 4:** rejeito grosso coberto por uma camada de rejeito misturado, uma camada de cinza compactada (grau de compactação de 90% e umidade em campo 10% abaixo da ótima), uma camada de argila compactada (grau de compactação de 100% e umidade em campo 1,7% abaixo da ótima), uma camada de cinza compactada (grau de compactação de 90% e umidade em campo 8% abaixo da ótima)

e uma camada de solo orgânico. A camada de cinza tem função de barreira capilar e a configuração “cinza+argila+cinza” corresponde a uma cobertura do tipo barreira capilar dupla. Segundo a modelagem numérica, este tipo de cobertura seca apresentou os melhores resultados na minimização do fluxo de água e oxigênio (pela saturação da camada argilosa) para o interior do rejeito. A cinza utilizada (cinza de fundo) foi obtida na Tractebel.

A etapa seguinte consistiu na construção da unidade protótipo, em escala piloto. As fases construtivas da unidade protótipo foram compostas por:

- 1) Construção de um aterro com 3 metros de altura para abrigar as células experimentais e componentes;
- 2) Edificação de um laboratório de apoio para análises físico-químicas expeditas;
- 3) Instalação de uma estação meteorológica.

Um aterro de 3 metros de altura foi construído no local da instalação da unidade protótipo para abrigar as células experimentais, devido ao fato de haver um lençol de água superficial, situado a uma profundidade de 1,5m abaixo do nível do terreno. As cavidades foram impermeabilizadas com uma geomanta e no fundo foi posicionado o lisímetro para coleta de amostras do efluente percolado da cava. Cada célula representa um modelo físico que simula uma seção superior de um depósito de rejeito. As dimensões e posição do lisímetro dentro da cava foram projetadas por modelagem numérica do fluxo de água (Borghetti Soares e outros, 2009), utilizando o programa Seep/w (Geoslope, 1998), de modo que não interferissem no fluxo de água no rejeito. O rejeito grosso foi depositado na cava sem compactação. Um controle de compactação foi feito para os materiais de cobertura (argila, cinzas e rejeito misturado). A figura 1 mostra detalhes do aterro e da célula 3:

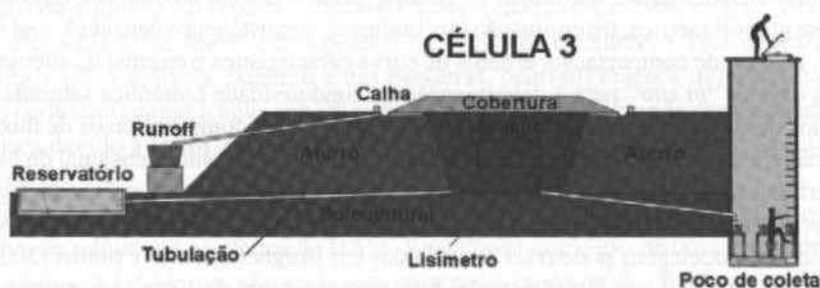


Figura 1 - Detalhes do aterro e da célula 3.

O monitoramento da estação experimental fornece dados diários de volume de água percolada no rejeito (em cada célula) e de precipitação. A cada evento de chuva é feita uma medição do volume do escoamento superficial das células. Em cada camada foram instalados sensores para a medição de dados de sucção (Granular Matrix Soil - GMS), de umidade (TDR - Time Domain Reflectometry) e de temperatura (PT100). No total foram instalados 45 sensores, conectados a um sistema de aquisição central (*datalogger*, modelo CR10X), juntamente com um pluviógrafo. Estes dados são adquiridos diariamente via internet. Os dados de aquisição automática obtidos são adquiridos a cada 10 minutos e disponibilizados via internet. A figura 2 mostra uma vista aérea da unidade protótipo concluída.



Figura 2 - Unidade protótipo.

A estação meteorológica coleta, por aquisição automática, dados climáticos, tais como, precipitação, umidade do ar, temperatura, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento. Os dados climáticos são adquiridos a cada 30 minutos em um computador instalado no laboratório da unidade protótipo.



O laboratório construído ao lado do aterro serve de apoio na obtenção dos parâmetros físico-químicos como pH, condutividade elétrica (CE), potencial de oxi-redução (Eh) e oxigênio dissolvido nas amostras líquidas coletadas nos lisímetros. Mensalmente são coletadas amostras do efluente percolado nos lisímetros para a realização de análises físico-químicas expeditas no laboratório da estação experimental. Concomitantemente, são enviadas amostras o Laboratório de Análises Químicas e Ambientais da SATC onde são realizadas as análises das espécies químicas dissolvidas ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ; sulfato, dentre outros).

### 3. Resultados e discussão

Os dados de precipitação, infiltração e escoamento superficial servirão para a construção de um banco de dados, e para a realização do balanço hídrico nas células da unidade. Além disso, permitirão determinar a eficiência das coberturas na minimização dos efeitos da DAM, no período analisado e em estações secas ou chuvosas. A seguir, são apresentados alguns resultados obtidos no monitoramento da unidade protótipo.

#### 3.1 Precipitação e volume percolado no rejeito

A figura 3 mostra dados de precipitação mensal no ano de 2008 no pluviômetro da estação meteorológica. Estes dados mostraram uma boa correlação com os dados do pluviômetro conectado ao *datalogger*. A distribuição das precipitações apresentadas na figura 3 é típica para a região (Borghetti Soares entre outros, 2009).

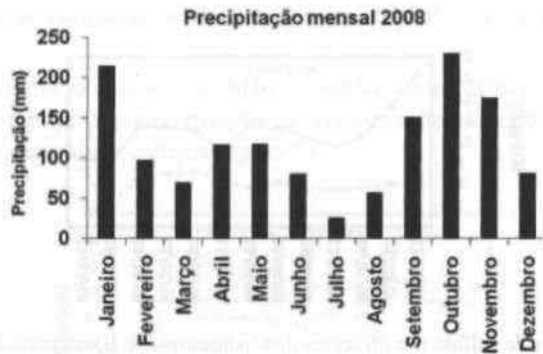


Figura 3 - Precipitação mensal para o ano de 2008 (estação meteorológica da unidade protótipo).

Durante o período analisado o volume percolado nas células em relação ao volume total precipitado foi: célula 1= 33%; célula 2= 14%; célula 3 < 1% e célula 4= 3,5%. Estes dados mostram que o uso de uma cobertura de rejeito misturado na densidade projetada (célula 2) não impede a percolação da água no rejeito mas reduz significativamente o volume do efluente percolado. As células com cobertura de solo (células 3 e 4) apresentaram uma maior eficiência pois o volume percolado no período foi menor se comparado às outras situações (célula 1 e 2).

#### 3.2. Temperatura

A figura 4 apresenta os dados de temperatura no rejeito grosso, nas quatro células, em sensores instalados no topo do lisímetro. As reações de oxidação da pirita que dão origem a DAM são exotérmicas e uma temperatura relativamente mais elevada pode indicar a ocorrência de tais reações. Observa-se que a temperatura é mais elevada na célula 1 (rejeito descoberto) e mais baixa na célula 4. A célula 2 apresentou a segunda maior temperatura, exceto nos meses de novembro e dezembro que foi superada pela temperatura da célula 3. Pode estar havendo um fluxo de oxigênio para dentro do rejeito na célula 3, pois os sensores de umidade instalados na camada argilosa não indicaram a saturação total.

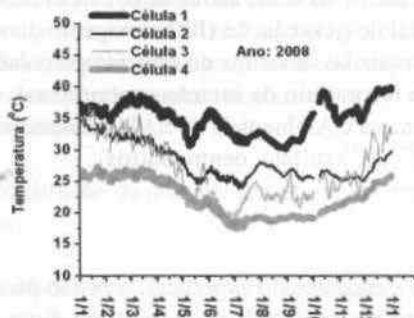


Figura 4 - Temperatura no rejeito (no topo do lisímetro), ano 2008.

### 3.3. Parâmetros químicos e físico-químicos

Os resultados das espécies químicas dissolvidas bem como dos parâmetros físico-químicos dos efluentes indicaram que as células com proteção de solo (3 e 4) tiveram um bom desempenho no abatimento da geração da DAM.

As figuras 5 e 6 apresentam os dados de solubilização do sulfato obtidos nos quatro lisímetros. Enquanto os valores das concentrações do  $SO_4$  oscilam entre 90 – 215  $gL^{-1}$  para os lisímetros I – II, para os lisímetros III - IV essas concentrações estão entre 1 – 3  $gL^{-1}$ .

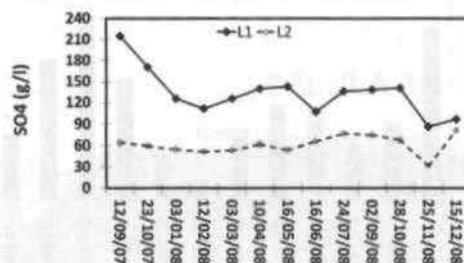


Figura 5 - Concentrações de sulfato nos efluentes dos lisímetros (I e II) no período de set /07 a dez /08.

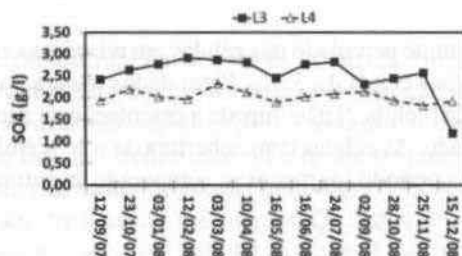


Figura 6 - Concentrações de sulfato nos efluentes dos lisímetros (III e IV) no período de set /07 a dez /08.

As figuras 7 e 8 apresentam as concentrações de manganês no efluente percolado. Neste caso, as concentrações variaram entre 50– 600  $mgL^{-1}$  para os lisímetros I - II, e 4 –14  $mgL^{-1}$  para os lisímetros III – IV.

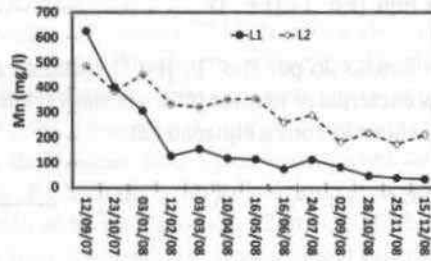


Figura 7 - Concentrações de manganês nos efluentes dos lisímetros (I e II) no período de set /07 a dez /08.

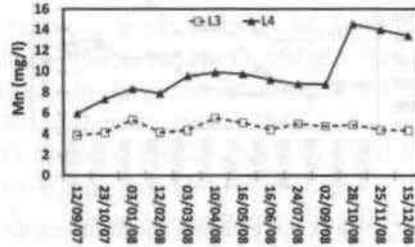


Figura 8 - Concentrações de manganês nos efluentes dos lisímetros (III e IV) no período de set /07 a dez /08.

Os gráficos das espécies químicas dissolvidas estão em perfeita consonância com os valores de pH e condutividade elétrica (CE) determinados, pois quanto maiores as concentrações de espécies dissolvidas, maiores serão as concentrações de ácido e a condutividade elétrica (figura 9).

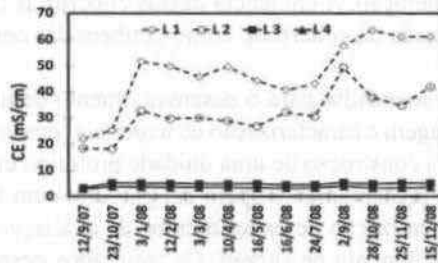


Figura 9 - Variação da condutividade elétrica nos efluentes coletados nos lisímetros no período set /07 a dez/08.

Os valores de pH estão em pleno acordo com os valores da temperatura observada (figura 10), ou seja, para os lisímetros I e II os valores de pH encontram-se na faixa 0,70 - 3, enquanto para os lisímetros III e IV esses valores estão entre 6,4 - 7,30, evidenciando que a DAM não está ocorrendo nas células com o rejeito coberto (células 3 e 4).

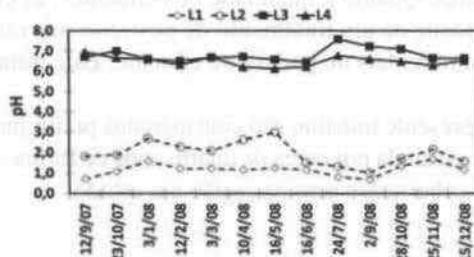


Figura 10 - Variação do pH nos efluentes dos lisímetros no período set /07 a dez /08.

Com relação ao potencial de oxi-redução (figura 11), os lisímetros I e II apresentaram uma faixa de 387mV - 658mV e 384 mV - 633mV, respectivamente, enquanto para os lisímetros III e IV esses valores foram de 200mV - 422mV e 144mV - 411mV. Pela Equação de Nernst:

$$Eh = E^{\circ}_1 + 0,0591 \times \log([Fe^{+3}] / [Fe^{+2}]) \dots \dots \dots (1),$$

sabemos que o potencial redox é uma função do par  $[Fe^{+3}] / [Fe^{+2}]$  e quanto maior o valor desse potencial, mais próximo da faixa ótima de atuação das bactérias oxidantes (650 - 800mV), bem como de predominância do  $[Fe^{+3}]$  que é um eficiente oxidante da pirita de acordo com a equação (2),

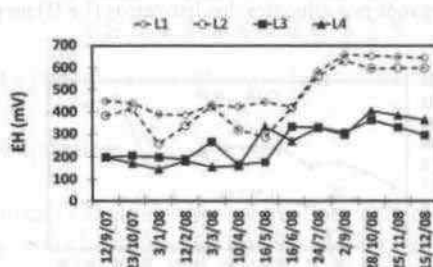
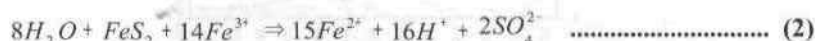


Figura 11- Variação do potencial REDOX nos efluentes dos lisímetros no período de set /07 a dez /08.

Os resultados acima indicaram que as células coberturas com solos (célula 3 e 4) apresentaram, durante o período considerado, resultados satisfatórios no que diz respeito à minimização da geração da DAM.

#### 4. CONCLUSÕES

A aplicação de coberturas secas é uma das alternativas recomendadas para a redução da geração da drenagem ácida de mina em rejeitos de mineração. A eficiência dessas coberturas depende da natureza do material a ser coberto e do material a ser empregado na cobertura, como também das condições climáticas da região onde ela será aplicada.

Três etapas fundamentais são recomendadas para o desenvolvimento de um projeto de coberturas secas: (a) avaliação da área de aplicação, amostragem e caracterização de materiais (ensaios de campo e laboratório); (b) modelagem numérica das coberturas; e (c) construção de uma unidade protótipo em escala piloto.

O CETEM projetou, implantou e presentemente opera em parceria com Carbonífera Criciúma uma unidade protótipo em escala piloto para a realização de experimentos de avaliação do desempenho e coberturas secas aplicadas sobre rejeitos do beneficiamento de carvão. Os resultados desses experimentos permitirão o desenvolvimento de critérios de engenharia para o projeto de coberturas secas adequadas à região carbonífera do estado de Santa Catarina.

Os resultados obtidos nos primeiros vinte meses de operação mostraram-se bastante promissores e indicaram uma nítida diferença na quantidade e qualidade das águas percoladas no rejeito, cobertos com diferentes tipos de coberturas secas. A quantidade de efluentes provenientes das células 3 e 4 foi menor que a das células 1 e 2. Esse resultado indica que o uso de coberturas com argila compactada e camadas drenantes (cinzas) oferecem melhores resultados no que diz respeito à quantidade de água percolada e que sem dúvida acarretam uma economia no tratamento dos efluentes. Quanto à qualidade dos efluentes, as células 3 e 4 apresentaram resultados que indicam somente a necessidade de um tratamento de posterior da concentração do sulfato e do manganês para se adequarem às normas ambientais de padrão de efluente. Este tratamento pode ser realizado empregando-se bactérias sulforredutoras.

Os resultados apresentados no presente trabalho são considerados preliminares e estima-se que a operação da unidade protótipo deve desenvolver-se ainda por cerca de quatro anos de forma a alcançar um volume de dados suficiente para o adequado projeto de coberturas secas na região em estudo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP, ao e à Carbonífera Criciúma S/A.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

Alexandre, N. Z. Krebs, A.S.J. (1995). Qualidade das Águas superficiais do município de Criciúma, SC. Relatório Final. PROGESC – Programa de Informações Básicas para Gestão-Territorial de Santa Catarina (Série Recur-



- os Hídricos, V. 6). CPRM, Porto Alegre, RS.
- Borghetti Soares A, Ubaldo MO, Souza VP, Soares PSM, Barbosa MC, Mendonça RG (2009). Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. Part 1: Material Characterization and numeric Modeling. *Journal of Mine Water and Environment*. In submission.
- Borma LS, Mendonça R, Souza VP (2002) Processo de mitigação da formação de drenagens Ácidas utilizando Coberturas Secas. Projeto Básico da Unidade Piloto e da Instrumentação - Avaliação Preliminar dos Custos de Instalação e Operação de Piloto, RT 2002-038-00; Relatório Técnico para o SIECESC (Sindicato da Indústria da Extração do Carvão do Estado de Santa Catarina), 126p., CETEM, Rio de Janeiro, Brazil.
- Daniel DE, Koerner RM, (1993) "Cover Systems". In: *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, chapter 18, London, UK, Chapman & Hall.
- GEOSLOPE INTERNACIONAL LTD. (1998) SEEP/W for finite elements seepage analysis. User's Guide. Version 4.2, Canada.
- Guevara, LRZ (2007). Predição do Potencial de Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, PUC/RJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Mendonça RG (2007) Estudo da Difusão do Oxigênio em Materiais de Cobertura. Tese de D.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 354p.
- O'Kane MA, Ayres B, Christensen D, Meiers G (2002) CANMET-CETEM Manual on cover system design for reactive mine waste. Report No. 689-01 prepared for CANMET-CETEM, June 2002.
- SOILCOVER, (2000) Unsaturated Soils Group, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Vanapalli SK, Fredlund DG, Pufahl DE, Clifton AW (1996) Model for prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotech. J.*, 33, pp. 379-392.