

# **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Construção e Operação da Estação Experimental  
Juliano Peres Barbosa: Estudo em escala piloto para  
avaliação do desempenho de coberturas secas na  
mitigação da drenagem ácida de mina – DAM**

**PROVISÓRIA**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Dilma Vana Rousseff**

Presidente

**Michel Miguel Elias Temer Lulia**

Vice-Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**Clelio Campolina Diniz**

Ministro da Ciência, Tecnologia e Informação

**Alvaro Toubes Prata**

Secretário-Executivo

**Kayo Julio Cesar Pereira**

Coordenação-Geral das Unidades de Pesquisa

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Fernando Antonio Freitas Lins**

Diretor

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais

**Claudio Luiz Schneider**

Coordenador de Processos Minerais

**Cosme Antônio de Moraes Regly**

Coordenador de Administração

**Francisco Wilson Hollanda Vidal**

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

**Jackson de Figueiredo Neto**

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

**Ronaldo Luiz Correa dos Santos**

**COORDENADOR DE PROCESSOS METALÚRGICOS E AMBIENTAIS**

# SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-8261-019-0

STA - 76

## **Construção e Operação da Estação Experimental Juliano Peres Barbosa: Estudo em escala piloto para avaliação do desempenho de coberturas secas na mitigação da drenagem ácida de mina – DAM**

### **Mario Valente Possa**

DSc. Engenharia Mineral/EPUSP (USP), Pesquisador do CETEM/MCTI

### **Anderson Borghetti Soares**

DSc. Geotecnia / COPPE (UFRJ)

### **Vicente Paulo de Souza**

DSc. Engenharia Mineral/EPUSP (USP), Pesquisador do CETEM/MCTI

### **Paulo Sérgio Moreira Soares**

DSc. Escola de Química (UFRJ)

**CETEM/MCTI**

2014

## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Luis Gonzaga Santos Sobral**

Editor

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Subeditora

### **CONSELHO EDITORIAL**

Mariza Bezerra de M. Monte (CETEM), Paulo Sergio M. Soares (CETEM), Saulo Rodrigues P. Filho (CETEM), Sílvia Gonçalves Egler (CETEM), Vicente Paulo de Souza (CETEM), Antonio Carlos A. da Costa (UERJ), Fátima Maria Z. Zotin (UERJ), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (PETROBRÁS), Luis Enrique Sánches (EPUSP) e Virginia S. Ciminelli (UFMG).

A Série Tecnologia Ambiental divulga trabalhos relacionados ao setor minerometalúrgico, nas áreas de tratamento e recuperação ambiental, que tenham sido desenvolvidos, ao menos em parte, no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

**Valéria Cristina de Souza**

Coordenação Editorial

**Valéria Cristina de Souza**

Editoração Eletrônica

**Andrezza Milheiro**

Revisão

---

Possa, Mario Valente

Construção e operação da estação experimental Juliano Peres Barbosa: Estudo em escala piloto para avaliação do desempenho de coberturas secas na mitigação da drenagem ácida de mina - DAM / Possa, Mario Valente [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

00p. (Série Tecnologia Ambiental, 76)

1. Carvão. 2. Drenagem ácida de mina. 3. Rejeito de carvão. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Possa, Mario Valente. III. Soares, Anderson Borghetti. IV. Souza, Vicente Paulo de. V. Soares, Paulo Sérgio Moares. VI. Título. VII. Série.

CDD – 628.16832

---

## SUMÁRIO

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| RESUMO                            | 7  |
| ABSTRACT                          | 8  |
| 1   INTRODUÇÃO                    | 9  |
| 2   PROJETO E CONSTRUÇÃO DA EEJPB | 13 |
| 2.1   Projeto                     | 13 |
| 2.2   Construção                  | 17 |
| 3   OPERAÇÃO                      | 33 |
| 4   CONCLUSÕES                    | 41 |
| 5   AGRADECIMENTOS                | 43 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS        | 44 |



## RESUMO

Esta publicação apresenta um breve histórico que engloba as fases de construção e operação da Estação Experimental Juliano Peres Barbosa. O experimento em escala piloto, para avaliação do desempenho de coberturas secas no abatimento de drenagem ácida de mina realizado nesta Estação, iniciou-se em outubro de 2007 e foi encerrado em dezembro de 2012. Para a avaliação deste desempenho foram projetados quatro modelos físicos, sendo que dois destes representaram coberturas secas (modelos rejeito-cobertura) definidas a partir de materiais disponíveis na região de estudo e baseados em critérios de engenharia. Os outros dois modelos, contendo somente rejeitos, serviram como referencial aos resultados obtidos nos modelos do tipo rejeito-cobertura. Os resultados obtidos nos cinco anos de monitoramento mostraram um ótimo desempenho das coberturas secas na mitigação dos efeitos da drenagem ácida de mina. Os fluxos de água percolados nos rejeitos dos modelos projetados com cobertura tiveram uma redução de 85 a 99% em relação ao rejeito exposto sem qualquer cobertura. Na maior parte do tempo do monitoramento, a qualidade da água percolada nos modelos com coberturas secas foi boa e apresentou concentrações de espécies químicas dentro dos padrões do CONAMA. Os resultados obtidos no experimento englobaram dados meteorológicos, de balanço hídrico, físico-químicos e geoquímicos dos efluentes, além de dados de aquisição automática de sensores instalados nas camadas de rejeito e cobertura. A situação representada em campo é de fluxo de água unidimensional, não saturado, sem contribuição de fluxo lateral de água e oxigênio, representando o topo central de um depósito de rejeitos. O experimento gerou um banco de dados que poderá servir de base para projetos futuros. Os resultados conseguidos indicaram a necessidade de estudos posteriores para melhor entender o complexo comportamento do fenômeno

da drenagem ácida de mina. A experiência ganha no projeto permitirá o desenvolvimento de novas pesquisas, cujos resultados permitirão o desenvolvimento de projetos de remediação de áreas contaminadas por rejeitos de carvão mineral na região sul do Brasil.

### **Palavras-chave**

carvão; drenagem ácida de mina; rejeito de carvão; cobertura seca.



## **ABSTRACT**

This technical contribution presents a brief history of the Estação Experimental Juliano Peres Barbosa, encompassing the its construction and operation phases. The pilot-scale experiment for assessing the performance of dry covers to mitigate acid rock drainage began in October 2007 and was completed in December 2012. Four physical models were designed. Two of them simulating dry covers (waste-cover models) using materials available in the region of study and based on engineering criteria. Two other models, were designed with tailings only, as benchmarks. The results obtained in five years of monitoring showed the performance of dry covers on mitigating the effects of acid rock drainage. The water percolated in the models designed with cover wastes was reduced in the range of 85% to 99% as compared to tailings exposed without any coverage. Most of the time, the quality of the percolated water in the models with dry covers was good and presented concentrations of chemical species within the standards of CONAMA. The results obtained in the experiment encompassed meteorological data, water balance, physico-chemical and geochemical analysis of effluents, in addition to automatic data acquisition from sensors installed in the cover layers. The field model represented a one-dimensional water flow, unsaturated, with no contribution of lateral water flow and oxygen, which represents the top central portion of a waste deposit. The experiment generated a database that is the ground for future projects. The results indicated also the need for further studies to better understanding the complex behavior of the acid rock drainage phenomenon. The experience gained in such project will guide future research, and the development of remediation solutions for areas contaminated by coal wastes in the southern part of Brazil.

### **Keywords**

coal; acid mine drainage; waste; dry cover.



## 1. INTRODUÇÃO

O uso de cobertura seca em rejeitos de carvão é uma alternativa de mitigação dos efeitos da drenagem ácida de mina (DAM). Na região sul do Brasil, principalmente nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, onde há mineração de carvão, os rejeitos e estéréis produzidos nos processos de extração e beneficiamento são potencialmente geradores de ácido passível de ser lixiviado para cursos d'água. Na busca de alternativas para prevenção/controle e remediação de áreas contaminadas pela DAM, o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), entre os anos de 2000 e 2007, desenvolveu um estudo sobre o desempenho de cobertura seca na mitigação dos efeitos da DAM (CETEM, 2001). Este estudo foi uma das metas físicas do projeto global intitulado "Otimização do processo de geração de energia elétrica a partir do carvão e recuperação ambiental das áreas degradadas pela mineração" (Souza *et al.*, 2007), com apoio financeiro da FINEP/MCTI e da Carbonífera Criciúma S.A. (CCSA). Como resultado de uma das metas do referido projeto, foi construída a Estação Experimental Juliano Peres Barbosa (EEJPB), um experimento em escala piloto projetado para monitorar dados de balanço hídrico e da qualidade dos efluentes gerados em modelos experimentais do tipo rejeito-cobertura.

A EEJPB foi inaugurada em outubro de 2007 e operou por aproximadamente cinco anos, encerrando as suas atividades em dezembro de 2012. Os modelos experimentais foram projetados com base em sólidos critérios de engenharia, que englobaram: a caracterização tecnológica dos materiais de cobertura disponíveis na região de estudo e dos rejeitos gerados no beneficiamento do carvão; modelagens numéricas preliminares do fluxo de água e de balanço hídrico.

Os resultados obtidos ao longo do monitoramento confirmaram os resultados iniciais obtidos nas modelagens e foram acrescidos de dados sobre a qualidade dos efluentes percolados nos rejeitos (físico-químicos e geoquímicos). Os resultados geraram um banco de dados sobre o desempenho das coberturas secas, que poderá ser utilizado em pesquisas e projetos futuros de prevenção, controle e remediação de áreas contaminadas pela DAM.

## 2. PROJETO E CONSTRUÇÃO DA EEJPB

### 2.1 | Projeto

As etapas do projeto e construção da EEJPB foram desenvolvidas segundo a proposta descrita por O'Kane *et al.* (2002) para um experimento cujo objetivo era a avaliação do desempenho da utilização de uma cobertura seca aplicada nos rejeitos de mineração:

**fase 1:** definição dos materiais disponíveis na região de aplicação da cobertura, amostragem e ensaios laboratoriais, ensaios de campo e obtenção de dados das condições climáticas desta região (índices de precipitação, de evaporação etc.);

**fase 2:** modelagem numérica preliminar dos diversos tipos de cobertura e seleção das coberturas mais eficientes na mitigação da DAM para serem estudadas em escala piloto; e

**fase 3:** construção e monitoramento da unidade piloto.

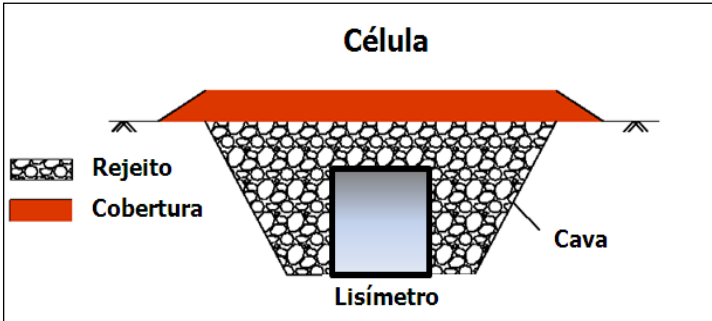
Na **fase 1** foram coletados os rejeitos de mineração de carvão gerados no processo de beneficiamento da CCSA (rejeito grosso, fino e misturado), solos disponíveis na região de instalação da empresa (identificados neste trabalho como argila Picollo, argila empresa e solo vegetal), areia e resíduos não reativos (cinzas de fundo resultantes da queima de carvão mineral) da operação da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo - SC. Foram realizados ensaios laboratoriais geotécnicos (caracterização, compactação, permeabilidade e curva de retenção), de campo (densidade e permeabilidade), físico-químicos (lixiviação, solubilização, teor de enxofre e teor de matéria orgânica) e

mineralógicos (DRX - difração de raios-X, MEV – microscopia eletrônica de varredura) e de verificação do potencial de geração de ácido (balanço ácido-base e capacidade de tampão). Descrições completas dos ensaios e dos resultados obtidos podem ser consultadas em publicações anteriores (Borghetti Soares *et alii.*, 2009; Ubaldo, 2006; Mendonça, 2007, Borghetti Soares, 2012). Os dados meteorológicos utilizados nas modelagens preliminares foram coletados na estação meteorológica de Urussanga-SC, no período entre os anos de 2000 a 2004.

Na **fase 2** foram realizadas simulações numéricas unidimensionais com diversas configurações de materiais de cobertura (Borghetti Soares *et alii.*, 2009, Ubaldo, 2006). As análises numéricas unidimensionais do fluxo de água e do balanço hídrico foram realizadas com o *software* Soilcover (GeoAnalysis, 2000). Os resultados das simulações indicaram duas coberturas mais eficientes na mitigação dos efeitos da DAM, avaliadas pela redução do volume de água percolado no rejeito e pela manutenção de elevados graus de saturação na camada argilosa (que implicam na redução da entrada de oxigênio na pilha de rejeito) e, conseqüente, redução da ocorrência de reações associadas à geração de DAM. Essas duas coberturas foram selecionadas para estudos de campo na escala piloto. Adicionalmente, para comparação, foram simuladas configurações apenas com rejeitos.

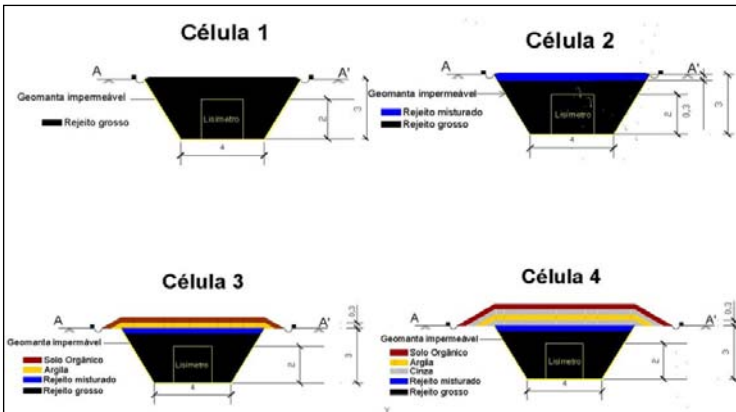
Na **fase 3** quatro modelos experimentais (células) foram dimensionados e construídos na forma de escavações contendo rejeitos, aos quais se aplicou diferentes tipos de cobertura, conforme é representado nos desenhos esquemáticos das Figuras 1 e 2. A Estação foi construída na área da Mina do Verdinho (CCSA) localizada no município de

Forquilha – SC. A escolha do local de construção exigiu obras preparatórias de aterro uma vez que o lençol freático encontrava-se a cerca de 1,5 m de profundidade.



Fonte: modificado de Borghetti Soares *et alli.*, 2009.

**Figura 1.** Configuração das células experimentais da EEJPB.



Fonte: modificado de Borghetti Soares *et alli.*, 2009.

**Figura 2.** Configurações das quatro células experimentais da EEJPB.

As configurações das quatro células experimentais foram:

**célula 1**: preenchida somente com rejeito grosso e com 3m de espessura. Foi referencial para as demais configurações;

**célula 2**: preenchida com rejeito grosso com espessura de 2,7m coberto por uma camada de rejeito misturado (fino e grosso) com espessura de 30cm. Esses rejeitos são regularmente produzidos no processo de beneficiamento do carvão mineral na Mina Verdinho (CCSA). O emprego da mistura de rejeitos objetivou verificar sua eficácia na minimização da infiltração da água no rejeito grosso colocado no fundo da célula;

**célula 3**: idêntica à célula 2, quanto ao uso da camada de rejeito misturado. Cobrindo esta camada foram dispostas duas outras como se segue: (a) uma camada de 30cm de argila compactada (com o objetivo de minimizar a infiltração da água da chuva nos rejeitos grossos); e (b) uma camada de 30cm de solo vegetal não compactado (visando minimizar a perda de água por evaporação e também a erosão da camada argilosa). A função da camada de solo vegetal foi de prevenir a possível formação de trincas na argila em períodos mais secos, e a indesejável formação de caminhos preferenciais de percolação da água da chuva; e

**célula 4**: composta por uma camada de rejeito grosso (2,7m), uma camada de rejeito misturado (30cm), seguida de um conjunto de três camadas compactadas projetadas para atuar como uma barreira capilar dupla: cinzas de fundo (30cm) + argila (30cm) + cinzas de fundo (30cm). A camada de cinzas mais profunda foi projetada para atuar como barreira capilar devido ao provável contraste de condutividade hidráulica entre a argila e as cinzas, em condições não saturadas. A camada de



cinzas mais superficial tem dupla função: em períodos de seca, minimiza a perda de água por evaporação da camada argilosa, e em períodos mais úmidos, funciona como dreno. Sobre as camadas compactadas foi colocada uma camada de solo vegetal com a mesma função já descrita na célula 3.

As camadas de argila e de cinzas foram compactadas em campo, com densidade obtida em laboratório, com energia Proctor Normal (Ubaldo, 2005). O rejeito misturado também foi compactado; porém, sem controle de compactação em campo, pois na fase de projeto não foi determinada a curva de compactação desse material. Posteriormente à fase de projeto foi feito um ensaio de compactação do rejeito misturado. Os resultados deste ensaio indicaram que o rejeito misturado não apresenta uma densidade aparente seca máxima associada a um valor de umidade ótima (Borghetti Soares, 2012), o que impossibilita um controle de compactação em campo. O solo vegetal e o rejeito grosso foram dispostos sem compactação, reproduzindo as condições em que são aplicados em depósitos de rejeitos de carvão da região em estudo.

## **2.2 | Construção**

A construção da Estação Experimental Juliano Peres Barbosa (EEJPB) iniciou-se no ano de 2006 e foi concluída em outubro de 2007. De outubro de 2007 ao final de 2012 foram obtidos dados de monitoramento que permitiram interpretar o desempenho de cada configuração de cobertura seca.

A EEJPB é composta por três unidades (Souza *et al.*, 2009): um aterro para abrigar as células experimentais; uma estação meteorológica e um laboratório destinado para a realização de

análises físico-químicas expeditas e para a aquisição de dados. Um aterro de três metros de altura (acima da superfície do terreno) foi construído para abrigar os quatro modelos experimentais (células). As cavidades das células foram preenchidas inicialmente com rejeito grosso oriundo do processo de beneficiamento do carvão da Mina Verdinho. No interior das cavas foi instalado um lisímetro para coleta de parte do efluente percolado no rejeito. A opção de construção de um aterro deveu-se, como já mencionado, ao fato do lençol freático se encontrar a uma pequena profundidade no local do experimento.

Para a construção da EEJPB foi inicialmente realizada a limpeza do terreno e, a seguir, instalada as drenagens no fundo das células experimentais. Foi então escavado um poço de coleta central, revestido de concreto, de forma a permitir o acesso aos pontos de coleta do efluente percolado no lisímetro de cada célula. Detalhes construtivos da instalação da drenagem são apresentados na Figura 3. No fundo da célula foram instaladas duas drenagens: uma (drenagem interna) para conduzir o efluente do lisímetro para o poço de coleta e outra (drenagem externa) para conduzir o efluente gerado na célula e externo ao lisímetro, para um reservatório junto ao aterro. Dessa forma, foi possível medir o volume percolado de água da chuva em cada célula.



**Figura 3.** Drenagens das células e lisímetro.

As superfícies laterais e fundo das células foram revestidas com uma geomembrana de PVC (Vinimanta, tipo VMP55 ML), de 1mm de espessura, com o objetivo de impedir o vazamento

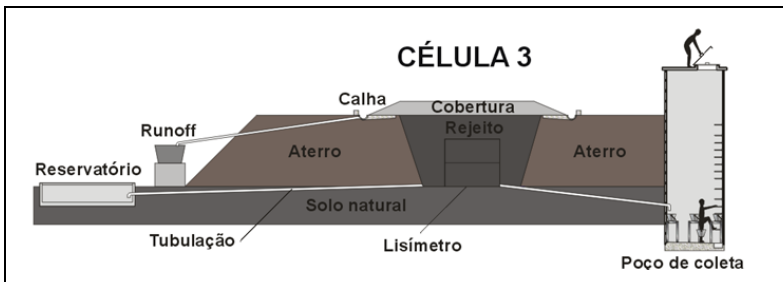
de DAM para o solo. A regularização da geometria da célula para a instalação da geomembrana foi executada com retroescavadeira (Figura 4). Após a aplicação da geomembrana, foram instalados lisímetros de polipropileno, em formato cilíndrico, com raio de 2m e altura de 2m (Figura 4), no centro de cada célula, sendo estas dimensões e posição determinadas por modelagem numérica bidimensional do fluxo de água (Borghetti Soares *et alii.*, 2009; Ubaldo, 2006), utilizando o *software* Seep (Geoslope, 1998). A parcela da água da chuva que percolava o rejeito, e não era coletada pelo lisímetro, como já citado, era conduzida pela drenagem externa (Figura 3) até um reservatório, conforme mostrado na Figura 5.

Uma vista geral da área de trabalho, antes e após a execução do aterro, é mostrada na Figura 6. O laboratório de apoio técnico foi construído ao lado do aterro e destinou-se à realização das análises de parâmetros físico-químicos dos efluentes percolados nos lisímetros, além de servir como escritório para a equipe técnica.

Uma vez concluído o aterro seguiu-se o carregamento dos materiais nas células. Todos os materiais foram transportados e carregados nas células por caminhões e espalhados com retroescavadeira. Após o espalhamento, o rejeito misturado, a argila empresa e as cinzas de fundo foram compactados de forma controlada utilizando-se compactadores manuais (placa vibratória - modelo Weber *mt* e “sapo”). O rejeito grosso e o solo vegetal foram dispostos e espalhados sem compactação. A Figura 7 mostra o carregamento do rejeito grosso nas células por caminhão, compactação da argila com o “sapo” e espalhamento do solo vegetal com retroescavadeira.



**Figura 4.** Colocação de geomembrana e lisímetro na célula.



Corte parcial do aterro



Reservatório externo para coletar drenagem externa das células

**Figura 5.** Corte parcial do aterro da Estação e reservatório externo para coleta de água da drenagem externa das células.



Preparação da área



Área com aterro

**Figura 6.** Vista geral da Estação Experimental: antes e após a execução do aterro.





Carregamento com rejeito grosso



Compactação da argila

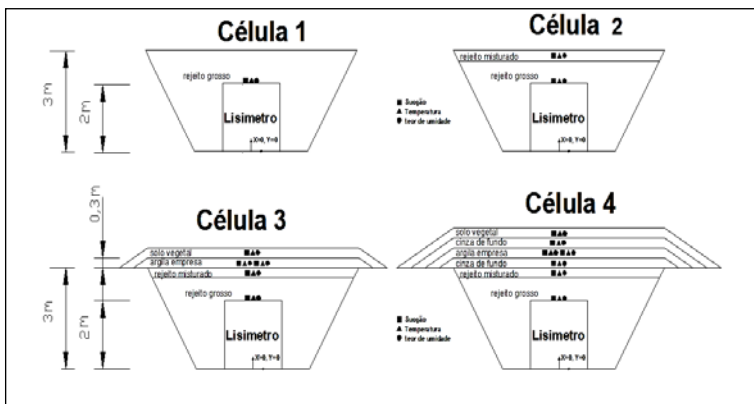


Espalhamento do solo vegetal

**Figura 7.** Carregamento e coberturas das células.



Durante a operação de carregamento das células foi instalada, em cada camada de material de cobertura e de rejeito, a instrumentação que permitiu o acompanhamento do desempenho do experimento. Essa instrumentação foi conectada a um sistema central automático de aquisição de dados (*data logger*) e teve como objetivo medir sucção, umidade e temperatura, quantificando, assim, o comportamento das coberturas quando submetidas às condições climáticas da região. Foram instalados quarenta e cinco (45) sensores, sendo 15 para medir sucção, 15 para medir umidade volumétrica e 15 para medir temperatura. Todos os sensores foram posicionados no centro da célula (em planta) e no meio (espessura) de cada camada de cobertura, com exceção dos instrumentos posicionados no rejeito grosso, que foram instalados na cota imediatamente acima do topo dos lisímetros. A Figura 8 e a Tabela 1 apresentam o número e o posicionamento da instrumentação nas células.



**Figura 8.** Posição da instrumentação instalada nas células.

**Tabela 1.** Número e posição dos sensores instalados nas células.

| <b>Célula</b> | <b>Camadas</b>    | <b>Série de sensores*</b> | <b>Posição horizontal (planta)</b> | <b>Posição vertical (perfil)</b> |
|---------------|-------------------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1             | rejeito grosso    | 1                         | centro da cava                     | sobre o lisímetro                |
| 2             | rejeito grosso    | 1                         | centro da cava                     | sobre o lisímetro                |
|               | rejeito misturado | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
| 3             | rejeito grosso    | 1                         | centro da cava                     | sobre o lisímetro                |
|               | rejeito misturado | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
|               | argila            | 2                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
|               | solo vegetal      | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
| 4             | rejeito grosso    | 1                         | centro da cava                     | sobre o lisímetro                |
|               | rejeito misturado | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
|               | cinzas de fundo   | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
|               | argila            | 2                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
|               | cinzas de fundo   | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |
|               | solo vegetal      | 1                         | centro da cava                     | meio da camada                   |

\*série de sensores: 1 sensor de umidade, 1 sensor de temperatura e 1 sensor de sucção.

Os sensores de sucção utilizados foram do tipo “*watermark 200*”, modelo 253. De fácil automação, baixo custo e dispensando fluxagem, esses sensores medem sucções no solo em intervalos de 0 a 200kPa. Os medidores de temperatura foram da Campbell Scientific modelo T108 e medem temperaturas de -5 a 95°C. Possuem boa acurácia com erros inferiores a 0,3°C. O sensor de umidade volumétrica

utilizado foi o modelo CS616 (Campbell Scientific) que mede teor de umidade volumétrica em solos e outros meios porosos utilizando o princípio da reflectometria (Topp *et al.*, 1980). O instrumento consiste de duas hastes de aço inox que estão conectadas a um circuito interno (encapsulado com resina epóxi). O aparelho emite um pulso em forma de ondas magnéticas que se propaga pelas hastes do sensor e que é refletido ao encontrar o conteúdo de água no solo. O tempo de percurso do sinal na haste do sensor depende da permeabilidade dielétrica do material em volta das hastes, que, por sua vez, é função do conteúdo de água. A saída do sensor é em forma de período de tempo. Uma equação de calibração do sensor converte o período em teor de umidade. O sistema central automático de aquisição de dados (*data logger*) era também conectado a um pluviógrafo para medição da precipitação pluviométrica no campo. Na Figura 9 são mostrados os sensores e o pluviógrafo empregados no experimento.



**Figura 9.** Sensores e pluviógrafo instalados na EEJPB.

O *data logger* utilizado foi da Campbell Scientific modelo CR10X. A alimentação do sistema era suprida por um painel solar com dispositivo para regulagem de tensão e bateria selada, mantendo o sistema continuamente energizado (Figura 10). Para maior segurança do suprimento de energia ao sistema de instrumentação foi instalado um circuito alternativo de fornecimento de energia elétrica da rede. A coleta de dados experimentais pode ainda ser feita de forma remota por meio da internet utilizando um *software* específico (LOGGNET).



Instalação dos sensores no *data logger*



*Data logger*, pluviógrafo e painel solar

**Figura 10.** Sistema de aquisição de dados instalado na EEJPB.

A etapa final de construção da Estação compreendeu a colocação de calhas, do tipo artefato de concreto, no entorno das células. A água da chuva que não se infiltrava nas células, escoamento superficial (*run-off*), era conduzida por essas calhas e armazenada em reservatórios, para medições do volume de água acumulado em cada evento de chuva (Figura 11).



Calhas do tipo artefato de concreto



Reservatório para armazenar o escoamento superficial

**Figura 11.** Colocação de calhas para a coleta do escoamento superficial das células.

O poço de coleta foi construído com o objetivo de amostrar os efluentes percolados em cada lisímetro e tem 1,5m de diâmetro interno e 5m de profundidade. O fundo do poço de coleta foi localizado a cerca de 1m abaixo da cota de fundo das células e o topo, 1m acima do aterro. Foi instalado um exaustor para permitir a renovação do ar dentro do poço e uma lâmpada para iluminação. A Figura 12 mostra o poço de coleta e uma vista da parte interna, com as quatro saídas das drenagens internas para a medição de volumes de água percolada nos lisímetros e para a coleta de amostras para análise da qualidade das águas. A Figura 13 mostra a EEJPB concluída com todos os seus componentes.



Vista externa do poço de coleta



Vista interna do poço de coleta

**Figura 12.** Vista externa e interna do poço de coleta.



**Figura 13.** Vista geral da EEJPB.



### 3. OPERAÇÃO

Durante a etapa de operação foram desenvolvidas as seguintes atividades na EEJPB (Borghetti Soares *et alli.* 2010):

- i) medição regular de dados meteorológicos (evaporação – tanque de evaporação classe A e precipitação – pluviômetro Ville de Paris, Figura 14), volumes de escoamento superficial e volumes de água percolados nos quatro modelos físicos que representam sistemas do tipo rejeito-cobertura (células experimentais);
  - ii) coleta dos dados de aquisição automática registrados no *data logger* (sensores instalados nas camadas: umidade, sucção e temperatura; e de precipitação do pluviógrafo) e de dados climáticos da estação meteorológica, Figura 15 (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção dos ventos e pressão atmosférica);
  - iii) coleta de amostras de efluentes (percolado nos lisímetros e algumas vezes do escoamento superficial) para a determinação de parâmetros físico-químicos e geoquímicos, o que tornou possível verificar a qualidade dos efluentes gerados;
  - iv) elaboração de um banco de dados sobre o desempenho das coberturas secas aplicadas na região do experimento, que poderá servir de base para futuros projetos de engenharia;
  - v) interpretação dos dados obtidos durante a operação da EEJPB pela avaliação da qualidade e do volume de efluentes gerados no rejeito para cada tipo de cobertura;
- e

- vi) realização de ensaios complementares de laboratório e de campo (curva de retenção, velocidade de infiltração e densidade aparente seca), em materiais das células.



Tanque de evaporação classe A



Pluviômetro – Ville de Paris

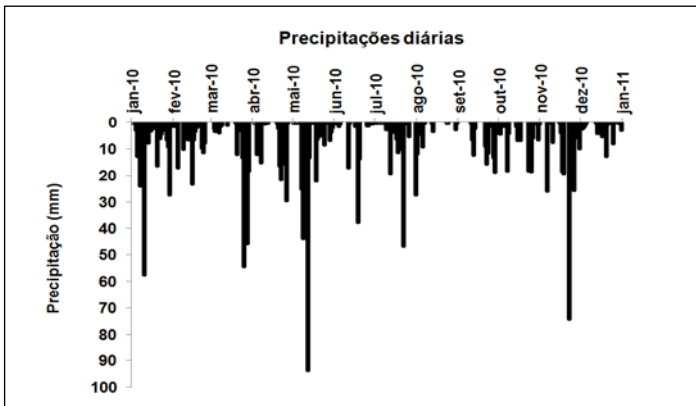
**Figura 14.** Tanque de evaporação e pluviômetro.



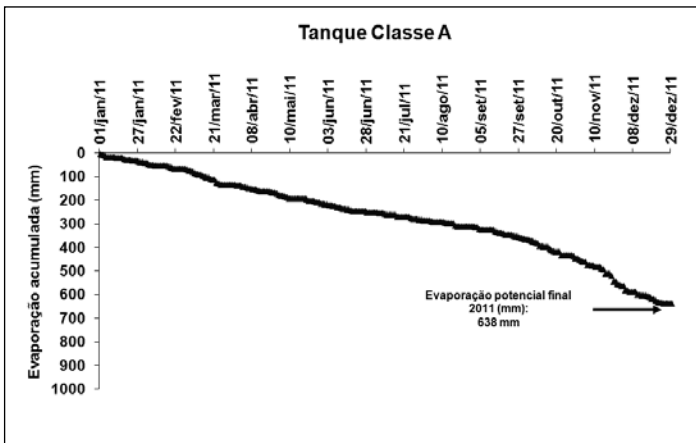
**Figura 15.** Estação meteorológica.

A título de exemplo serão apresentados alguns dados meteorológicos coletados durante o período de operação.

A Figura 16 mostra as precipitações diárias do ano de 2010 e a evaporação potencial do ano de 2011. Na EEJPB foram medidos os dados de precipitação (anuais, mensais, diários e de intensidade de chuva) de 2007 até o final de 2012. Os dados de evaporação potencial começaram a ser medidos a partir do ano de 2010, quando foi instalado o tanque de evaporação classe A.



(a)



(b)

**Figura 16.** Exemplo de dados meteorológicos obtidos na EEJPB:

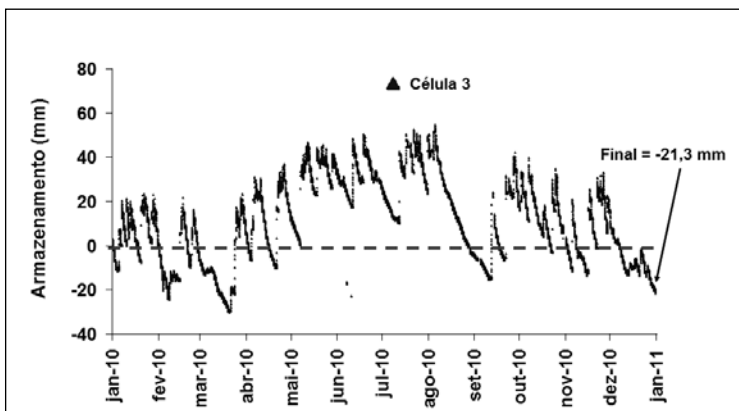
(a) precipitação diária de 2010

(b) evaporação potencial de 2011 ( $k_c$  do tanque = 0,7).

Com relação a outras parcelas do balanço hídrico, além das precipitações, em cada modelo experimental foram realizadas medições diárias dos volumes percolados no rejeito grosso

contido nos lisímetros. A célula 1, com rejeito descoberto, apresentou os maiores volumes percolados, como era de se esperar. No período de 01/01/2008 a 31/12/2012, a redução do volume percolado no rejeito grosso das células 2, 3 e 4 em relação à célula 1 foi 66% para a célula 2, 99,7% para a célula 3 e 84,7% para a célula 4. Embora a aplicação de uma camada de rejeito misturado na célula 2 tenha reduzido o fluxo de água no rejeito grosso, dados físico-químicos do efluente do escoamento superficial mostraram que este efluente também é ácido. As coberturas projetadas com solos e cinzas de fundo (células 3 e 4) reduziram, significativamente, o fluxo de água no rejeito grosso, principalmente na célula 3, e na maior parte do tempo de monitoramento os efluentes percolados nestas células apresentaram uma boa qualidade. Estes resultados de campo confirmaram aqueles obtidos por simulações preliminares do fluxo de água realizadas na fase de projeto.

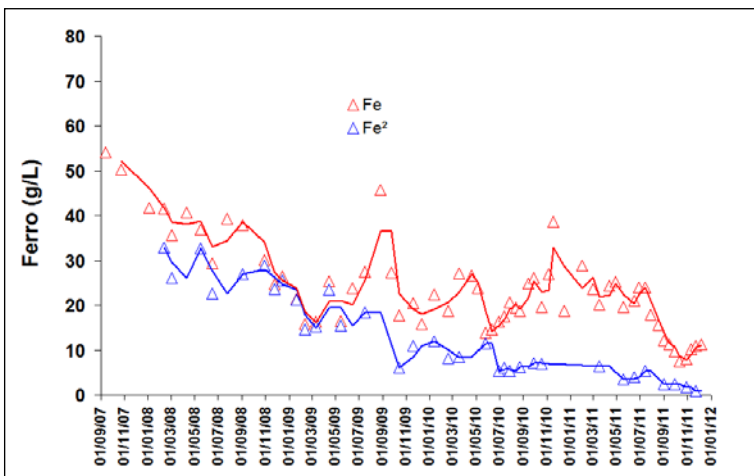
A variação das entradas e saídas de água nas células também foi obtida com base nos dados de teor de umidade nas camadas de cobertura, registrados no *data logger*. A Figura 17 mostra a variação do armazenamento de água na célula 3, para o ano de 2010. Como o fluxo de água foi muito reduzido no rejeito grosso da célula 3, pôde-se adotar a hipótese de que as variações de umidade ocorrem, principalmente, nas camadas de cobertura desta célula. Tal hipótese também foi adotada para a célula 4. Para as células contendo somente rejeitos (células 1 e 2), tal hipótese não pôde ser adotada, pois o fluxo de água no rejeito grosso foi significativo e dispunha-se de somente um sensor de umidade em toda a massa de rejeito grosso, o que é insuficiente para estimar a variação da umidade na célula inteira.



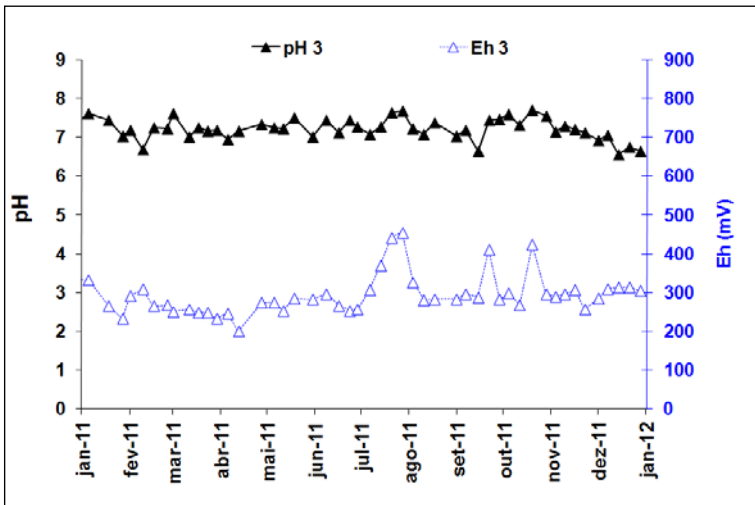
**Figura 17.** Variação do armazenamento de água nas camadas de cobertura da célula 3 em 2010.

Dados físico-químicos indicaram que o efluente percolado nas células projetadas com cobertura seca (células 3 e 4) apresentou boa qualidade, na maior parte do tempo de operação, com valores de pH entre 6 e 7, somente com concentrações de manganês e de sulfato acima do permitido pela legislação ambiental (CONAMA, 2005). A Resolução 357 do CONAMA não fixa um valor máximo para a concentração de sulfato em lançamento de efluentes. Porém, estabelece para águas doces (com salinidade igual ou inferior a 0,5%, para consumo humano, atividades de pesca e agricultura) valores máximos de concentração de sulfato de 250mg/L. Nestas mesmas células, em alguns períodos de seca, houve queda do pH, geralmente associada a uma redução drástica do fluxo de água no rejeito grosso. Nas demais células (1 e 2), o efluente percolado sempre foi ácido, com valores de pH entre 1 e 2, com a formação da drenagem ácida de mina. A Figura 18 mostra a variação das concentrações de ferro total e ferro

ferroso no efluente percolado na célula 1. Para todas as células foi medida a variação das concentrações de ferro, sulfato, manganês, zinco, cobre, alumínio e acidez. Os parâmetros físico-químicos determinados dos efluentes percolados e do escoamento superficial foram pH, Eh e condutividade elétrica. A Figura 19 mostra a variação do pH e Eh no ano de 2011 para a célula 3, mostrando um efluente com valores de pH em torno de 7 e Eh em torno de 300 mV vs.....?



**Figura 18.** Variação do ferro total e de ferro ferroso até o final de 2011, no efluente percolado na célula 1.



**Figura 19.** Variação do pH x Eh do efluente percolado no rejeito da célula 3 em 2011. (colocar no gráfico Eh, mV vs....)

Os dados aqui apresentados (meteorológicos, de balanço hídrico, físico-químicos e geoquímicos) constituem uma amostra dos dados que foram gerados e armazenados no período de operação da EEJPB. Os mais de cinco anos de operação da EEJPB foram considerados adequados para a observação do comportamento das coberturas. No final do ano de 2012 observou-se uma aceleração do processo de erosão natural das coberturas e a ocorrência de problemas de desgaste da instrumentação que poderiam comprometer a qualidade das medidas realizadas. A substituição de instrumentos foi descartada, pois comprometeria a integridade das coberturas estudadas. No início do ano de 2013 optou-se pela desativação do experimento.



## 4. CONCLUSÕES

As coberturas secas, no contexto do experimento objeto do presente trabalho, tiveram como objetivo primário a mitigação da geração da drenagem ácida de mina (DAM) em depósitos de rejeitos de mineração. Tais coberturas são constituídas de camadas de diferentes materiais o que reduz o acesso da água da chuva e do oxigênio do ar ao material depositado. Esta redução implica em menor volume e melhor qualidade das águas de chuva que se infiltram e percolam os rejeitos de mineração, o que reduz, também, a necessidade da instalação de unidades de tratamento de efluentes ácidos.

O projeto da Estação Experimental Juliano Peres Barbosa foi pioneiro no Brasil e foi concebido com o propósito de obter dados experimentais em escala piloto para avaliação do desempenho de coberturas secas aplicadas sobre rejeitos de mineração de carvão.

O experimento permitiu a geração de um banco de dados de balanço hídrico e de fluxo de águas, além de informações físico-químicas e geoquímicas sobre a geração da drenagem ácida de mina dos modelos de células experimentais examinados. As condições estudadas referem-se a fluxos unidimensionais de água e oxigênio. Os modelos empregados (células experimentais) representaram a superfície superior de uma pilha de rejeitos do beneficiamento de carvão mineral.

Os resultados indicaram que as coberturas projetadas com materiais disponíveis na região do estudo (argila e solo vegetal) e um resíduo não reativo (cinzas de fundo da combustão de carvão em termelétrica) cumpriram o objetivo de mitigar a geração de drenagem ácida de mina, pela redução do fluxo de água e de ar para o rejeito. A redução do volume percolado no

rejeito grosso das células 2, 3 e 4 em relação à célula 1 foi 66% para a célula 2, 99,7% para a célula 3 e 84,7% para a célula 4.

Observou-se que uma cobertura projetada de forma eficiente reduz, efetivamente, o volume e a carga de contaminantes dissolvidos nas águas da chuva que se infiltram e percolam uma pilha de rejeitos de carvão gerando efluentes ácidos. No entanto, é provável que o efluente residual que percolou a pilha necessite, ainda, de tratamento suplementar para remoção de manganês e sulfato dissolvidos antes de se obter as condições adequadas para seu lançamento em um corpo hídrico. Uma alternativa de tratamento químico em duas etapas para este efluente é o ajuste do pH com a adição de alcalis seguida do tratamento biológico com o emprego de bactérias (BRS – Bactérias Redutoras de Sulfato).

O estudo da condição bidimensional em escala piloto é a continuação prevista para os trabalhos de pesquisa descritos na presente publicação. Tal estudo exigirá a construção de uma pilha de rejeitos em escala piloto cujas superfícies laterais permaneçam expostas ao acesso do oxigênio do ar e à água da chuva. Tal estudo deverá prever, ainda, o estudo quantitativo da erosão da cobertura seca adotada e dos efeitos da aplicação de uma camada de vegetação sobre esta cobertura.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos e a Carbonífera Criciúma S.A. pelo apoio financeiro e de infra-estrutura na realização deste trabalho bem como à Tractebel Energia pela disponibilização das cinzas de fundo para realização dos estudos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGHETTI SOARES, A.; UBALDO, M.O.; SOUZA, V.P.; SOARES, P.S.M; BARBOSA, M.C.; MENDONÇA, R.G. Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part 1: material characterization and numeric modeling. *Mine Water and the Environment* 28:3, p. 219-231, 2009.
- BORGHETTI SOARES, A.; POSSA, M.V.; SOUZA, V.P.; SOARES, P.S.M.; BARBOSA, M.C.; UBALDO, M.O.; BERTOLINO, A.V.F.A.; BORMA, L.S. Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part 2: Pilot Unit Construction and Initial Monitoring. Technical communication. *Mine Water and the Environment*, 29:4, p. 277-284, 2010.
- BORGHETTI SOARES, A.; SOUZA, V.P.; POSSA, M.V.; SOARES, P.S.M. Histórico de um projeto pioneiro sobre o desempenho de coberturas secas na região sul do Brasil. In: IV Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, Gramado, Brasil, 2013.
- BORGHETTI SOARES, A. Análise de interpretação de resultados de amostragens e ensaios tecnológicos em rejeitos de mineração de carvão e materiais de cobertura. Relatório Técnico. RT001-2011-BE. 70p, 2012.
- CETEM. Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, RT/ 33/2000 - Relatório Técnico elaborado para o SIECESC, Vol I, II e III, CETEM, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005, MMA.
- GEOANALYSIS. SoilCover softwares. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2000.
- GEOSLOPE. SEEP/W for finite elements seepage analysis. User's Guide. Version 4.2, Geoslope International Ltd., Canadá, 1998.

- MENDONÇA, R.G.M. Estudo da Difusão do Oxigênio em Materiais de Cobertura, Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 354p, 2007.
- O'KANE, M.A.; AYRES B.; CHRISTENSEN D.; MEIERS G. CANMET-CETEM. Manual on cover system design for reactive mine waste. Report nº. 689-01 prepared for CANMET-CETEM, 2002.
- SOUZA, V.P.; SOARES, P.S.M.; POSSA, M.V.; SANTOS, M.D.C.; DALMINA, L.B.; MELLO, M.C.; UBALDO, M.O.; BORGHETTI SOARES, A.; TRINDADE, R.B.E.; BERTOLINO, A.V.F.A.; BORMA, L.S.; MENDONÇA, R.G.; ALMEIDA, J.R.; KREBS, A.S.J.; SCHNEIDER, C.L.; SCHNEIDER, C.H. Otimização do processo de geração de energia elétrica a partir do carvão e recuperação ambiental das áreas degradadas pela mineração, Projeto FINEP/CT-ENERG, Rio de Janeiro, 2007.
- SOUZA V.P.; POSSA, M.V.; SOARES, P.S.M.; BORGHETTI SOARES, A.; BERTOLINO, A.V.F.A.; SOUZA, M.R.R. Desempenho de cobertura seca em escala piloto para abatimento de DAM gerada por rejeito de carvão. Anais do 23<sup>rd</sup> Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, vol. 2, p. 515-523, Gramado, Brasil, 2009.
- TOP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of Soil Water Measurement in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, vol. 16:3 p. 574-582, 1980.
- UBALDO, M. O. Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração. Dissertação de mestrado. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 150p, 2005.
- UBALDO, M.O. Relatório de atividades desenvolvidas durante o período de 01/05 a 11/06. Relatório enviado ao CNPq, 30p, 2006.

## SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2010, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 200 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

### Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

**STA-75– Tratamento de Efluentes Empregando Membranas Filtrantes – Remoção de Sulfatos.** Ivan Ondino de Carvalho Masson e Flávio de Almeida Lemos, 2014.

**STA-74 – Influência da Distintas Formas de Processamento Mineral na Biolixiviação de Metais de Base.** André Luiz Ventura Fernandes, Débora Monteiro de Oliveira, Tatiane Franco Machado e Luis Gonzaga Santos Sobral, 2014.

**STA-73 – Aplicação de Ensaio Biológicos na Avaliação da Biodisponibilidade de Hidrocarbonetos de Petróleo em Solos Impactados.** Andréa Camardella de Lima Rizzo, Lúcia Silveira Sisino, Cláudia Duarte Cunha, Andréa Medeiros Salgado, Paulo Rubens Guimarães Barrocas, Rodrigo Gouvêa Taketani e Ellen Cristine Giese, 2014.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **NOVAS PUBLICAÇÕES**

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.