

# **USO DE COBERTURAS SECAS SOBRE REJEITOS DE CARVÃO DA REGIÃO DE SANTA CATARINA**

**Anderson Borghetti Soares**

Bolsista PCI, Engenheiro Civil, D. Sc., COPPE/UFRJ

**Vicente Paulo de Souza**

Orientador, Engenheiro Químico, D. Sc., USP/SP

## **Resumo**

O uso de cobertura seca é uma alternativa que pode ser utilizada para cobrir rejeitos de carvão oriundos do processo de beneficiamento. Estes rejeitos quando expostos ao oxigênio e a água sofrem oxidação e geram drenagem ácida de minas (*DAM*). Este trabalho mostra as etapas desenvolvidas no projeto de cobertura seca na Mina do Verdinho (Forquilha/SC). O projeto envolveu uma investigação dos materiais disponíveis na região, com ensaios de campo e de laboratório, modelagem numérica e a construção de uma unidade experimental para monitoramento do desempenho das coberturas. Os primeiros resultados estão sendo coletados e o monitoramento e as análises devem ser feitos por um período mínimo 3 anos.

## **1. Introdução**

Do processo de beneficiamento do carvão surgem rejeitos com diferentes granulometrias. Estes depósitos são freqüentemente expostos às condições ambientais sem qualquer tipo de proteção. O contato da água e do oxigênio com os rejeitos geram um efluente ácido, contendo metais pesados, que percola pelo rejeito, podendo contaminar águas superficiais e lençóis subterrâneos. Este fenômeno é denominado de Drenagem Ácida de Minas (*DAM*).

Uma alternativa eficaz para minimizar os efeitos da *DAM* é o uso de coberturas sobre os rejeitos. As coberturas podem ser de dois tipos: coberturas secas ("dry cover") e úmidas ("wet cover"). Há outras formas para inibir ou reduzir a taxa de oxidação nos rejeitos tais como tratamento do efluente, tratamento químico, remoção do rejeito, etc (Borma et al. 2002).

As coberturas secas são camadas de materiais (solos, resíduos não inertes ou materiais geossintéticos) dispostos sobre os depósitos de rejeito. O número de camadas, a disposição e a espessura dependem do clima da região e dos materiais usados. Um projeto de cobertura seca envolve 3 fases (O'Kane, 2002):

- a) Investigação dos materiais disponíveis na região, amostragem e ensaios de campo e laboratório;
- b) Modelagem numérica dos sistemas de cobertura;
- c) Construção e monitoramento de uma unidade piloto dos sistemas de cobertura.

Nas coberturas úmidas o material reativo fica submerso sob uma lâmina d'água, que reduz o fluxo de oxigênio para dentro do rejeito a taxas desprezíveis (Yanful, 1993). Este tipo de cobertura é de difícil construção e manutenção ao longo do tempo.

## 2. Local de Estudo

A área de estudo localiza-se na mina do Verdinho (Figura 1), da empresa Carbonífera Criciúma, no Município de Forquilha (28°17'17" S e 49° 25'52" W) e faz parte da Bacia Carbonífera de Santa Catarina que está localizada no sudoeste do Estado, estendendo-se das proximidades do morro dos Conventos - Arroio Silva, no Litoral Sul, até as cabeceiras do Rio Hipólito, ao norte. No limite oeste atinge Nova Veneza, e a leste, a linha natural de afloramento vai até a Lauro Muller e Brusque do Sul. A bacia possui um comprimento conhecido de 95 Km e uma largura média de 20 Km, compreendida na área delimitada pelas coordenadas, 28°11' a 29°03', de latitude sul e 49°10' a 49°37' de longitude oeste (CETEM, 2000).



Figura 1 - Visão geral da área em estudo (Carbonífera Criciúma, Mina do Verdinho).

## 3. Projeto de cobertura seca

Este estudo tem por objetivo avaliar o desempenho de diferentes tipos de coberturas secas na minimização dos efeitos da DAM, O projeto seguiu os passos propostos por O'Kane (2002).

Na amostragem e a caracterização foram estudados os seguintes materiais (Ubaldo, 2006; Ubaldo et al., 2008): (a) Argila Picollo; (b) Argila amarela; (c) Cinza grossa (termelétrica de tubarão); (d) Areia; (e) Solo orgânico; (f) Rejeito grosso e (g) Rejeito misturado\*.

\*Do processo de beneficiamento de carvão na Empresa Carbonífera Criciúma surge dois tipos de rejeito: rejeitos grossos e rejeitos finos. Os denominados rejeitos grossos são R<sub>1</sub> (rejeito piritoso), R<sub>2</sub> (rejeito argiloso) e R<sub>3</sub> (rejeito argiloso). Os rejeitos R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> e R<sub>3</sub> são de granulometria mais grosseira, na ordem de 37 a 25 mm, e os finos na ordem de 1mm, sendo constituídos por pirita, folhelhos, argilitos e carvão (Borma et al., 2002).

Os parâmetros geotécnicos foram obtidos (Ubaldo, 2006; Ubaldo et al., 2008) são de análise granulométrica (NBR 6457; NBR 7181; NBR 6459; NBR 7181; ME 093), compactação (NBR 6457; NBR 7182), condutividade hidráulica saturada (NBR 13292) e parâmetros hidráulicos (curva característica - variação da sucção com a umidade - condutividade hidráulica não saturada - variação da condutividade hidráulica com a sucção).

A curva característica foi obtida utilizando o método do papel filtro (ASTM D5298-03) para os materiais de cobertura e de proteção. Os pontos experimentais foram ajustados com a equação de Fredlund & Xing (1994a). Para os rejeitos esta curva foi obtida empiricamente por a partir da curva granulométrica, utilizando o método de Kovacs modificado por Aubertin et al. (2003).

A função de condutividade hidráulica não saturada é obtida a partir da curva característica através de correlações empíricas obtidas na literatura, que fornecem bons resultados com pontos experimentais (Van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994b). O uso deste tipo método é justificado pelo produzir resultados rápidos e com boa concordância com dados experimentais. Além do mais, ensaios de laboratório são caros e demorados. Os resultados obtidos foram utilizando o método de Fredlund e Xing (1994b).

A *modelagem numérica* (Ubaldo, 2006) foi feita utilizando o SOILCOVER (Wilson et al., 1994) que é um programa unidimensional em Elementos Finitos, usado para a simulação do movimento da água de um sistema rejeito/cobertura, o qual está sujeito a uma infiltração e evapotranspiração na superfície do solo. O programa avalia o fluxo evaporativo em solos através de um sistema de equações que descrevem o fluxo de vapor d'água, água e calor. O programa modela o transporte de calor, água e oxigênio associado às condições atmosféricas com base na formulação de Penman, que permite o cálculo da evaporação a partir da superfície de um solo. Os efeitos da evapotranspiração e da vegetação também são considerados.

A modelagem serviu para avaliar preliminarmente os tipos de cobertura seca mais eficientes na minimização do fluxo de água e oxigênio para dentro do rejeito. Esta modelagem é baseada nos parâmetros de campo e laboratório obtidos anteriormente e dos dados climáticos da região. Os resultados definiram duas configurações eficientes na minimização da *DAM*. A modelagem definiu quatro tipos de cobertura sobre células contendo rejeito grosso (Figura 3):

- Célula 1 - Sem cobertura (referencial);
- Célula 2 - Cobertura com rejeito misturado ("pré-cobertura", utilizada nas laterais das pilhas de rejeito do depósito da empresa);
- Célula 3 - Pré-cobertura e cobertura de argila compactada com uma camada de proteção superior de solo orgânico (cobertura modelada na simulação numérica);
- Célula 4 - Pré-cobertura e barreira capilar dupla (cinza grossa + argila + cinza grossa) e uma camada de proteção superior de solo orgânico (cobertura mais eficiente modelada na simulação numérica).

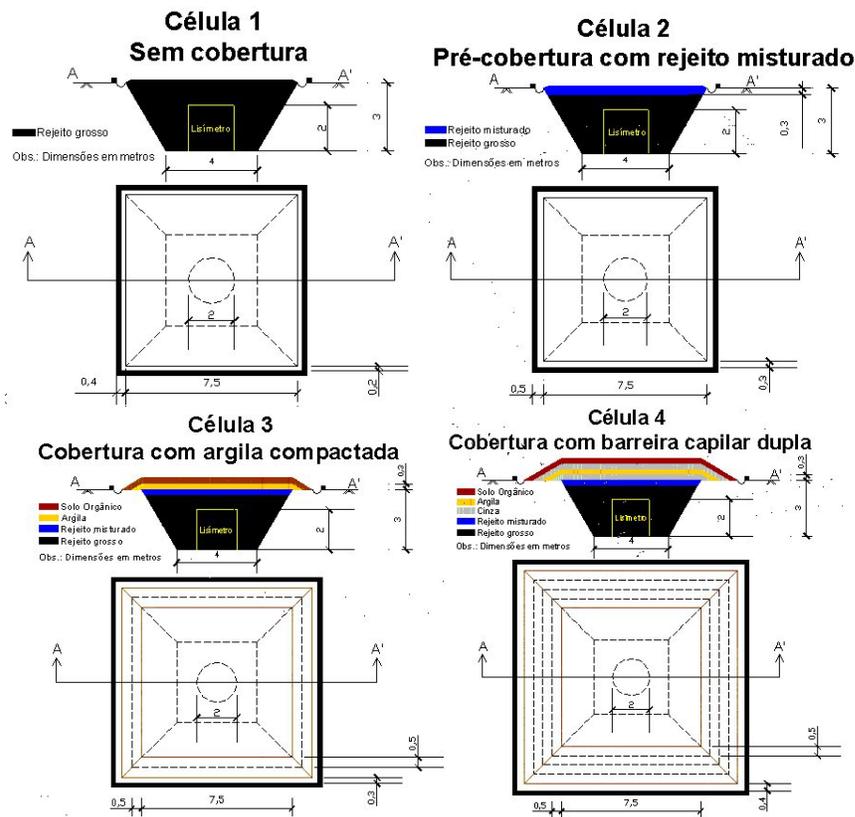


Figura 3. Sistemas de cobertura.

O próximo passo foi a *execução de uma estação experimental* de monitoramento. Esta é composta por um aterro experimental, que contém as quatro cavas de mesmo volume, contendo rejeito grosso no interior e diferentes materiais de cobertura e proteção, uma estação meteorológica, para obtenção dos dados climáticos do local e um laboratório para análises físico-químicas do efluente percolado no rejeito.

Dentro de cada cava foi colocado um lisímetro para coleta do efluente percolado que é coletado em um poço central (drenagem interna). A posição do lisímetro foi modelada numericamente (Ubaldo, 2006; Ubaldo et al., 2008) utilizando o programa SEEPW de modo que a presença deste não interferisse no fluxo de água para dentro do rejeito. Dentro das cavas e fora do lisímetro uma saída de drenagem que permite a percolação da água de dentro da cava (drenagem externa). Adicionalmente foi construído um sistema de calhas superficiais para coletar o escoamento superficial em cada célula. A Figura 4 mostra um corte transversal do aterro.

Dentro de cada camada de cobertura ou proteção e de rejeito foram instalados sensores para medir umidade, sucção e temperatura. Foram instalados um total de 45 sensores ligados a um sistema de aquisição central (Datalogger), cujos dados podem ser adquiridos via internet ou cabo serial (laptop). A medida destes sensores permite avaliar os movimentos da água no interior das camadas, bem como velocidades de percolação que são função dos gradientes de carga hidráulica total entre as camadas.

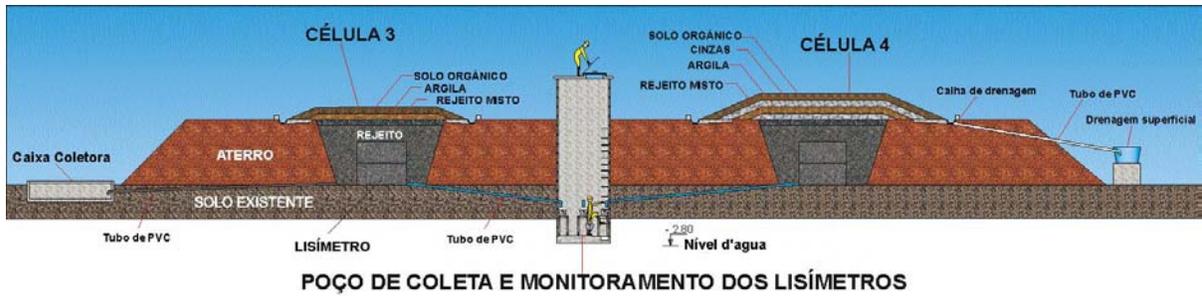


Figura 4. Detalhes das células (sistemas de coleta de água, aterro, células, poço de coleta).

As etapas construtivas são construtivas da estação experimental são apresentadas na Figura 5:



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 5. Etapas construtivas da unidade experimental. (a) aterro em construção; (b) aterro pronto; (c) regularização da geometria da cava; (d) instalação de geomanta impermeável; (e) Instalação do lisímetro; (f) Colocação do rejeito grosso na cava; (g) Compactação da cinza (h) Compactação da argila; (i) Colocação da camada de proteção; (j) Calhas de drenagem superficial; (k) Poço de coleta e unidade de aquisição de dados (Datalogger) e (l) Série de instrumentos instalados (temperatura, sucção e umidade).

A estação experimental foi inaugurada no dia 17/10/2007 (Figura 6), e o monitoramento está sendo feito através da coleta de dados da instrumentação instalada nos materiais de cobertura/proteção e rejeito, de vazões (drenagem interna, externa e superficial) que permitirão analisar o balanço hídrico de cada células

(sistema de cobertura) separadamente, além de dados climáticos obtidos na estação meteorológica instalada no local.



Figura 6. Estação Experimental concluída.

A seguir são apresentados alguns dos resultados obtidos nas análises físico-química do efluente percolado nos lisímetros (Tabela 2) e adquiridos pela instrumentação instalada nas células (Figura 7):

Tabela 2 - Análises físico-químicas do efluente percolado

Amostra	Data 10/07/2007			
	pH	Eh (mV)	CE (mS/cm)	O2 dissolvido (Mg/l)
Lisímetro 1	1,3	680,4	14,78	3,2
Lisímetro 2	1,6	642,8	14,75	4,3
Lisímetro 3	5,9	275,4	2,3	7,7
Lisímetro 4	6,6	316,6	1,901	8,3

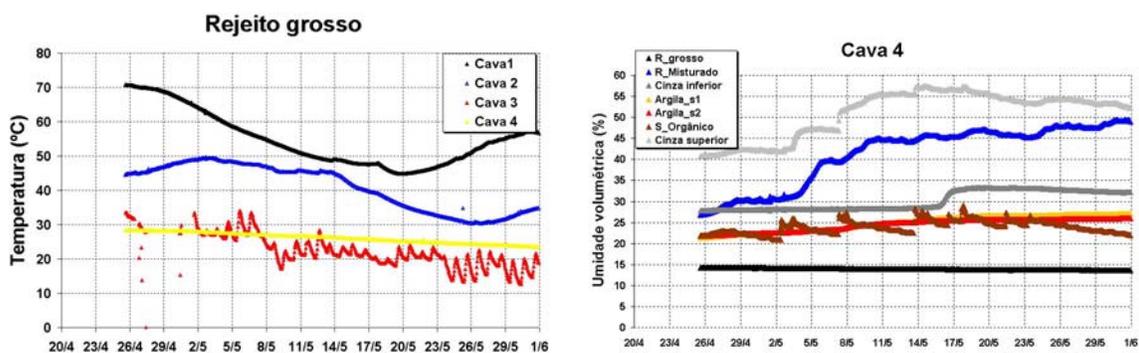


Figura 7. Dados obtidos pela instrumentação instalada nas células (Maio 2007).

#### 4. Conclusões iniciais

A estação experimental está em fase de monitoramento sendo possível coletar dados relativos ao fluxo de água em cada célula individualmente (drenagem interna - efluente percolado do lisímetro para o poço,

drenagem externa - efluente percolado na cava para a caixa de coleta e escoamento superficial - água da chuva que não infiltra na pilha, fluxo no interior dos materiais - dados de instrumentação) ao longo do tempo. Os parâmetros físico-químicos também serão monitorados ao longo do tempo e conclusões a respeito dos resultados poderão ser traçadas a partir de um período de monitoramento de no mínimo 3 anos.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP pelo apoio Financeiro, à CCSA pelo apoio Financeiro e técnico, ao CNPq pelo apoio financeiro e às pesquisadoras anteriores envolvidas no projeto, Laura Borma, Mariluce de Oliveira Ubaldo e Rosemary Mendonça.

## 6. Referências Bibliográficas

- ASTM, **D-5298-03**, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, v. 15.09, pp. 1312-1316, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7180**: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica, ABNT, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 6457**: Amostras de Solo Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 13292**: Solo - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares e de Carga Constante, ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação, ABNT, 1986.
- AUBERTIN, M., MBONIMPA, M., BUSSIERE, B. and CHAPUIS, R.P. 2003. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. **Canadian Geotechnical Journal**, 40(6): 1104-1102, 2003.
- CETEM **Projeto Conceitual para Recuperação Ambiente da Bacia Carbonífera Sul Catarinense**, Vol I, RT/ 33/2000 - Relatório Técnico elaborado p/ SIESCEC. Volumes I, II e III, 2000.
- BORMA, L.S., MENDONÇA, R. & SOUZA, V. P. **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 elaborado para o SIECESC, 126p, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **ME 093**: Solos - Determinação da densidade real dos grãos, DNER, 1994.

FREDLUND, D. G., CHING, A. Equations for the Soil Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4 (March), pp. 521-532, 1994a.

FREDLUND, D.G. & XING, S.H. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soil using the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4 (March), pp. 533-546, 1994b.

GEOSLOPE INTERNACIONAL LTD. **SEEP/W for finite elements seepage analysis**. User's Guide. Ver 4.2, Canadá, 1998.

O'KANE, M. A. **CANMET - CETEM Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste**. Report No. 689-01 prepared for CANMET-CETEM, June, 2002.

SOILCOVER, Unsaturated Soils Group, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 2000.

SOUZA, V.P. **Formação de Barreira Geoquímica para Abatimento de Drenagens Ácidas de Pilhas de Estéril Piritoso**. 2001. Tese de Doutorado, 143p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.

UBALDO, M. O. **Uso de Cinza de Carvão na Composição de uma Cobertura de Rejeitos de Mineração**. 2005, Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, RJ.

UBALDO, M.O. **Relatório de atividades desenvolvidas durante o período de 01/05 a 11/06**, Relatório enviado ao CNPq, 2006, 30p.

UBALDO, M. O., BORGHETTI SOARES, A., SOUZA, V.P. & BARBOSA, M. C. Effectiveness evaluation of a dry cover system for abatement of acid mine drainage from waste pyritic coal waste. Abstract accept in **8<sup>th</sup> International conference of Clean Technologies for the World Mining Industry**, Santiago, Chile, 13-16 April, 2008.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil. **Soil Science. Am. Journal**, v. 44, n. 5, pp.892-898, 1980.

YANFUL, E. K. Oxygen Diffusion Through Soil Cover on Sulfidic Mill Tailings, **ASCE, Journal of Geotechnical Engineering**, 199(8), p. 1207-1228, 1993.

WILSON, G.W., FREDLUND, D.G., BARBOUR, S.L. Coupled Soil-Atmosphere Modelling for Soil Evaporation, **Canadian Geotechnical Journal**. nº31, p.151-161, 1993.