

Avaliação do desempenho de cobertura seca mineral na mitigação da drenagem ácida.

Anderson Borghetti Soares

Eng. Civil, D.Sc.

Vicente Paulo de Souza

Engenheiro Químico, D.Sc., USP/SP

Resumo

O uso de cobertura seca sobre rejeitos de carvão constitui uma alternativa para reduzir os efeitos da drenagem ácida de minas que ocorre quando tais rejeitos são expostos às condições ambientais. Este trabalho apresenta a modelagens do balanço hídrico de uma cobertura seca, tipo barreira capilar dupla, e do rejeito sem cobertura. A geometria das modelagens simula modelos físicos construídos em uma unidade piloto, que foi instalada em uma área de mineração de carvão, no município de Forquilha/SC. Esta unidade foi projetada pelo CETEM e atualmente se encontra em fase de operação. As modelagens foram feitas com o software Vadose (GeoStudio, 2007) que utiliza como dados de entrada os parâmetros hidráulicos dos materiais e as condições climáticas da região. Os resultados indicaram uma eficiência no uso da barreira capilar dupla através da redução da água percolada no rejeito e a diminuição pelo fluxo de oxigênio devido à saturação da camada argilosa.

Seção: Meio Ambiente

1. Introdução

Um modelo numérico serve para fazer uma simulação matemática de um processo físico real. A vantagem do uso de um modelo numérico é que os resultados são obtidos de forma mais rápida quando comparadas a um modelo físico, que pode levar meses ou anos para ser construído. Além disso, os resultados obtidos em um modelo físico são limitados aos pontos de medição da instrumentação, ao contrário do modelo numérico que fornece informações por todo um perfil estudado, podendo ainda simular diferentes geometrias e condições de contorno. O modelo numérico possui limitações, pois os resultados são fortemente condicionados aos parâmetros de entrada e pode não levar em consideração condições reais que ocorrem em campo.

Neste Trabalho foi utilizado o programa Vadose (GeoStudio, 2007) para simular o fluxo de água e o balanço hídrico em um sistema particulado,. O Vadose é um software bidimensional em elementos finitos que simula o fluxo de água em meios porosos (regime transiente e permanente) e o balanço hídrico de um sistema. Este software permite modelar a infiltração em depósitos de rejeito, levando em conta os processos atmosféricos que atuam na superfície, através do método de Penman (1948) modificado por Wilson (1990), ou método de Penman-Wilson, que estima a evaporação real, a partir da pressão de vapor na superfície do solo acoplada com os processos de transferência de massa e calor (Wilson *et al.*, 1993).

Um projeto de cobertura seca foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), com apoio financeiro da FINEP/MCT, e culminou na construção de uma unidade piloto para avaliação do desempenho de diferentes coberturas secas para o Estado de Santa Catarina (Borghetti Soares *et al.*, 2009; 2010; Souza *et al.* 2009, Borghetti Soares & Souza, 2007). A unidade piloto foi instalada em uma área de mineração situada no

município de Forquilha/SC. Cobertura seca é uma técnica de prevenção e controle da drenagem ácida de minas que objetiva minimizar a infiltração da água e o fluxo do oxigênio para dentro do rejeito. As coberturas podem ser simples ou complexas, variando de uma única camada a várias camadas, com diferentes materiais, incluindo solos, rejeitos não reativos, geossintéticos e materiais para consumo de oxigênio (Mend, 2001). O uso de coberturas secas em diversas regiões do globo tem sido amplamente relatado na literatura (O’Kane et al., 2002, Mend, 2001; Souza *et al.*, 2007, Adu-wusu & O’Kane, 2006). Uma das coberturas projetadas na unidade piloto é do tipo barreira capilar dupla que utiliza como material drenante as cinzas de fundo da usina Tractebel (Tubarão-SC). Ubaldo (2005) estudou a aplicação da barreira capilar dupla como material de cobertura de rejeitos de carvão de Santa Catarina. A utilização de resíduos como cobertura foi sugerida por diversos pesquisadores (Cabral *et al.*, 2000; Borma *et al.*, 2002, 2003; Heineck *et al.*, 2003).

Este trabalho apresenta as modelagens numéricas de duas situações projetadas na unidade piloto: (a) rejeito sem cobertura e (b) rejeito coberto com barreira capilar dupla. O objetivo destas modelagens é de obter informações adicionais sobre o de fluxo de água e balanço hídrico, além de servir para uma posterior calibração dos parâmetros hidráulicos dos materiais. Uma vez que o modelo numérico consiga representar o mais próximo possível a condição de campo, o seu uso pode ser “extrapolado” para escalas maiores. Os resultados obtidos na modelagem numérica mostraram-se bastante promissores e confirmou a efetividade do uso de cobertura do tipo barreira capilar para minimizar os efeitos da drenagem ácida de minas na região em que foi projetada.

2. Descrição do modelo numérico

Os modelos físicos monitorados na unidade piloto simulam a parte superior de um depósito de rejeitos (sistema rejeito-cobertura) e foram projetados no interior de um aterro experimental. Dentro do aterro foram executadas quatro cavidades individuais representando três tipos de cobertura e o rejeito sem cobertura (Souza *et al.*, 2009; Borghetti Soares *et al.*, 2009, 2010). As cavidades foram preenchidas com rejeito, de granulometria grosseira, oriundo do beneficiamento do carvão mineral. Uma das coberturas secas projetadas é do tipo barreira capilar dupla, sendo composta por três camadas, com espessura de 30 cm cada, compactadas na seguinte ordem sobre os rejeitos: (a) cinzas de fundo, (b) argila e (c) cinzas de fundo. Sobre a barreira capilar dupla foi depositada uma camada de 30cm de solo vegetal, para proteção das camadas inferiores contra a erosão e perda de água. As modelagens numéricas realizadas compreendem dois casos: Caso 1: Rejeito s/ cobertura; Caso 2: Rejeito coberto com barreira capilar dupla. A Figura 1 mostra detalhes da geometria da barreira capilar e as condições de contorno consideradas. A modelagens foram feitas para o mês de janeiro de 2008.

Para o rejeito definiu-se, como condição inicial, poropressão nula na base do rejeito; para as camadas de cobertura, valores sucção constantes e representativos dos dados de campo do dia 1/01/2008 (primeiro dia das simulações). Os dados de sucção foram obtidos através leituras de sensores eletrônicos do tipo GMS (“Granular Matrix Soil”), instalados em cada camada e que medem até 200 kPa de sucção (Campbell Scientific, 1996).

Os dados de entrada dos materiais utilizados para “alimentar” o modelo numérico foram: curva de retenção solo-água, ou curva característica (Figura 2), curva de condutividade hidráulica não saturada e a condutividade hidráulica saturada (Tabela 1).

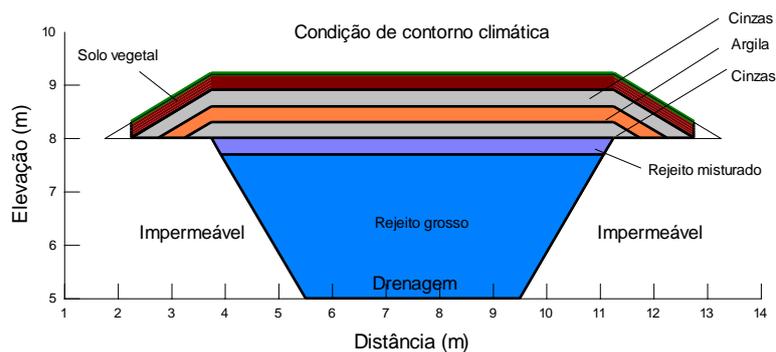


Figura 1 - Geometria, malha e condição de contorno: (a) barreira capilar e (b) rejeito sem cobertura.

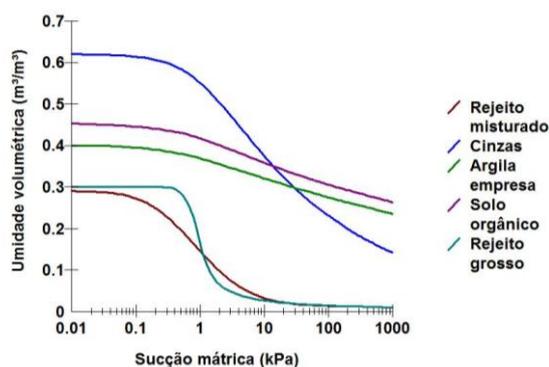


Figura 2 - Curvas características dos materiais

As curvas características da argila, solo orgânico e cinzas foram obtidas experimentalmente através de ensaios de laboratório convencionalmente usados para a determinação deste parâmetro (papel filtro e extrator de Richards). Os pontos experimentais destes ensaios foram ajustados segundo a equação de Van Genuchten (1980). As curvas características dos rejeitos foram obtidas pelo método de Kovacs (1980) *apud* (GeoStudio, 2007), a partir de dados da curva granulométrica destes materiais.

Tabela 1. Condutividade hidráulica saturada (m/s).

Material	K_{sat}
Rejeito Grosso	6×10^{-4}
Rejeito Misturado	1×10^{-5}
Argila	$3,25 \times 10^{-8}$
Solo vegetal	$2,78 \times 10^{-5}$
Cinzas	$2,45 \times 10^{-6}$

As curvas de condutividade hidráulica não saturada foram estimadas a partir da curva de retenção pelo método de Fredlund & Xing (1994) que produz possui uma boa correlação com os dados experimentais.

Os dados meteorológicos (precipitações, umidade relativa do ar, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento) foram obtidos por uma estação meteorológica instalada na unidade piloto e servem para estimar a evaporação real pelo método de Penman-Wilson. O total precipitado no mês de janeiro de 2008 foi de 209 mm e as precipitações diárias são apresentadas na Figura 3. Os dias 6, 12, 29 e 31, onde precipitações maiores ocorreram, serão objeto das análises de fluxo de água.

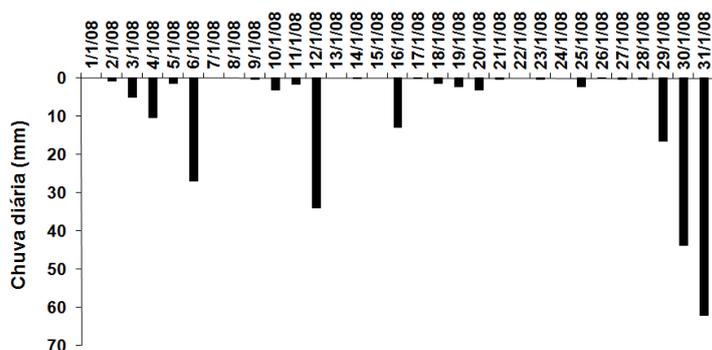


Figura 3 - Precipitações diárias: janeiro de 2008.

3. Resultados e Discussão

Neste tópico serão apresentados os resultados de umidade, sucção e balanço hídrico obtidos nas duas modelagens. A Figura 4 mostra, respectivamente, os perfis de sucção e teor de umidade com a profundidade e com o tempo, considerando os intervalos de tempo inicial ($t=0$), $t=6$ dias (precipitação de 26,8 mm), $t=12$ dias (precipitação de 34 mm), $t=29$ (precipitação de 16,5 mm) e final (dia 31 com precipitação de 62 mm).

Para o rejeito sem cobertura, nota-se, de acordo com a Figura 4a, que a sucção decresceu na superfície e este decréscimo foi maior para precipitações diárias mais elevadas, como também a profundidade de mudança na sucção com relação ao perfil inicial de poropressões. Um decréscimo da sucção correspondeu a um aumento no teor de umidade (Figura 4b), que foi maior em dias que ocorreram precipitações diárias mais elevadas. As sucções foram menores e os teores de umidade maiores na superfície para $t=31$ dias (precipitação 62mm).

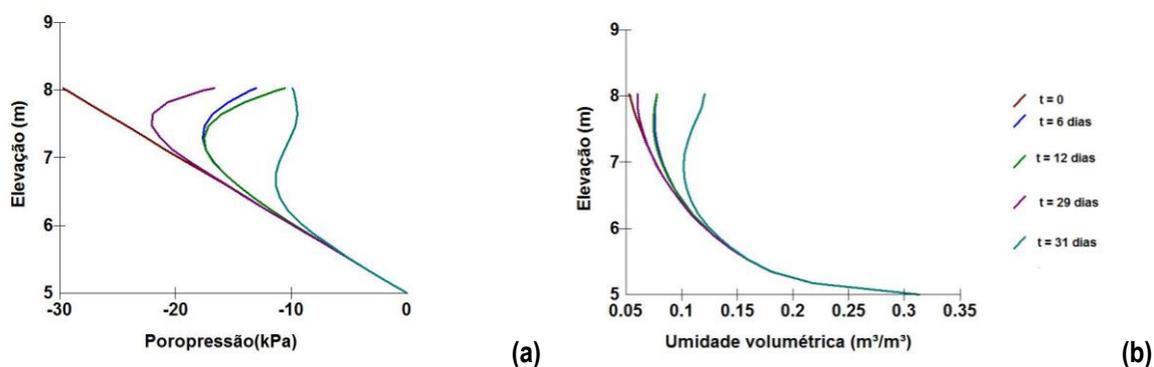


Figura 4 - Caso 1 (rejeito sem cobertura): Perfis de (a) poropressão e (b) teor de umidade;

Observando o perfil de poropressões para a barreira capilar dupla (Figura 5a), nota-se que as sucções no rejeito grosso (elevações de 5-8 m) não se modificaram muito com o tempo e as precipitações, indicando a ocorrência

de fluxos de água no rejeito inferiores aos observados no caso 1 (sem cobertura). A sucção decresceu com as precipitações, principalmente na superfície (camada de solo vegetal), sendo que este decréscimo foi maior para precipitações mais elevadas. Nas demais camadas compactadas (cinza abaixo da argila, argila e rejeito misturado) as sucções se mantiveram baixas (entre 0 e -5 kpa). Os perfis de umidade no rejeito e nas camadas de cobertura mostraram pouca variação com o tempo, exceto na camada de cinza posicionada acima da argila, que atingiu um estado próximo da saturação (umidade volumétrica em de 61.2%), no dia 31 de janeiro, onde a precipitação diária foi a maior do mês.

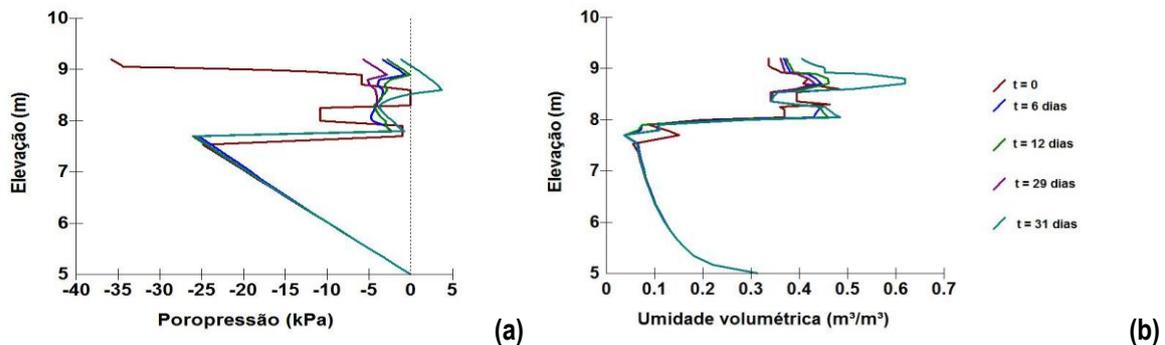


Figura 5 – Caso 2 (barreira capilar dupla): Perfis de (a) poropressão e (b) teor de umidade;

Outra informação importante obtida diz respeito à saturação da camada argilosa. As modelagens feitas na barreira capilar dupla apresentaram graus saturação na camada de argila, no meio da camada, superiores a 85%. Segundo Yanful (1993), o coeficiente de difusão ao oxigênio é inversamente proporcional ao grau de saturação da camada e, para graus superiores a 85% forma-se uma barreira efetiva ao oxigênio. Com isso, há uma inibição das reações associadas ao fenômeno da drenagem ácida de minas (DAM).

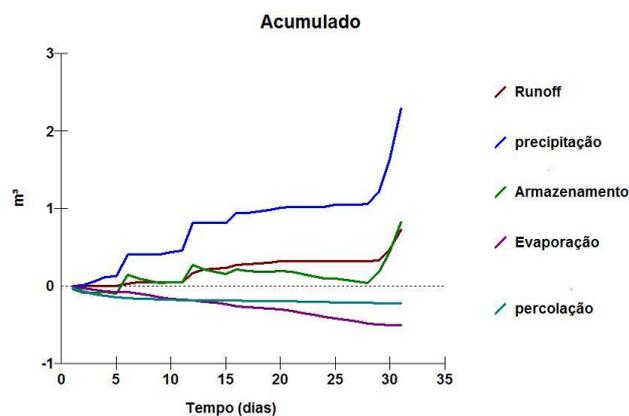


Figura 6– Parcelas do balanço hídrico (acumulado): barreira capilar dupla

As modelagens forneceram os seguintes resultados de balanço hídrico: **Caso 1**: precipitação acumulada - 1717 l; runoff - 0 l (0%), água armazenada - 617 l (36%), água percolada - 770 l (44,8%) e água evaporada - 329 l (19,2%); **Caso 2** (Figura 6): precipitação acumulada - 2295 l; runoff - 729 l (31,8%), água armazenada no sistema - 838 l (36,5%), água percolada - 225 l (9,8%) e água evaporada - 503 l (21,9%). Nota-se houve uma

significativa redução da água percolada no rejeito, com o uso de barreira capilar dupla, de 45% para 10% do total precipitado. Adicionalmente a camada argilosa da barreira capilar dupla mantém graus de saturação elevados que minimizam o fluxo de oxigênio para o rejeito. Estes dados mostram que o uso da barreira capilar dupla na região estudo é recomendável, pois mitiga os efeitos da drenagem ácida de minas.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou resultados de modelagens numéricas de sistemas rejeito-cobertura. Foram simulados dois casos: Caso 1 - rejeito sem cobertura e Caso 2 - rejeito coberto com uma cobertura do tipo barreira capilar dupla. Os resultados mostraram que o fluxo de água para dentro do rejeito é reduzido significativamente quando se utiliza uma cobertura do tipo barreira capilar dupla. Além disso, a camada argilosa mantém uma saturação acima de 85% e assim é eficaz também com barreira a entrada do oxigênio para dentro do rejeito. A barreira capilar dupla apresenta dupla função: barreira hidráulica e barreira de transporte ao oxigênio que em conjunto mitigam os efeitos associados à drenagem ácida de minas. As modelagens apresentaram resultados bastante promissores, ainda que tenham usado parâmetros hidráulicos baseados em formulações teóricas para os rejeitos. Curvas características dos rejeitos serão obtidas e os resultados da modelagem poderão ser comparados com dados experimentais.

5. Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

6. Referências Bibliográficas

- Adu-wusu C., Yanful E.K. Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario. **Canadian Geotechnical Journal** 43, 2006, pp 1-18.
- 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): 219-231, 2009.
- 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 2: Pilot Unit Construction and Initial Monitoring. Technical communication. Aceito para publicação pela revista **Mine Water and the Environment**, 2010.
- Borghetti Soares, A., Souza, V.P. Uso de Coberturas Secas sobre Rejeitos de Carvão da Região de Santa Catarina. **Anais da 1ª Jornada do Programa de Capacitação Institucional (PCI)**, 2007.
- Borma, L.S., Mendonça R.M.G., 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 para o SIECESC)**, Rio de Janeiro, Brasil, 2002, 126p.

- Borma, L.S., Mendonça R.M.G, Souza, V.P. Soares P.S.M. Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas de mineração de carvão. **Proc, 5th Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, CD ROM, Porto Alegre, Brasil, 2003.
- Cabral A., Racine I., Burnotte F., Lefebvre G. Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier. **Canadian Geotechnical Journal**, 37(1), 2000, pp. 201-217.
- Campbell Scientific IC. Model 253 and 253-L (WaterMark 200). Soil Moisture Sensor . **Instruc. Manual**. 8p,1996.
- Fredlund D.G., Xing A. Predicting the permeability function for unsaturated soil using soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 31, n. 4, 1994, pp. 533-546.
- GeoStudio. Vadose Zone Modeling with VADOSE/W. **Geo-Slope International Ltda**. Third edition, 2007.
- Heineck K.S., Consoli N.C., BICA A.V.D., Flores J.A.A. Utilização de Cinzas de Carvão Visando sua Aplicação como material Geotécnico. **Proc, 5th Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, CD ROM, Porto Alegre, Brasil, 2003.
- MEND. Dry Covers. **Mend Manual 5.4.2d Prevention and Control**. In: Tremblay GA, Hogan CM (eds), Vol.4, pp. 155-232, 2001.
- O’Kane M.A., Ayres B.K., Christensen D., Meiers G. **CANMET-CETEM Manual on cover system design for reactive mine waste**. Report 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., Mendonca 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**. (relatório de pesquisa), 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. **Proc, 23rd ENTMM**, Gramado, RS, Brasil, vol. 2, 2009, pp. 515-523.
- Wilson, G.W., Machibroda, R.T., Barbour, S.L., Woyshner, M.R. Modelling of Soil Evaporation from Waste Disposal. In: **Proceedings of the Joint ASCE-CSCE National Conference on Environmental Engineering**, Montreal, PQ, July, 2-14, 2003, pp. 281-288.
- Penman, H.L. (1948). Natural Evapotranspiration from Open Water, bare soil and grass. **Proc. R. Soc. London Ser. A**. 193: 120-145, 1948
- Ubaldo M.O. **Uso de Cinza de Carvão na Composição de uma Cobertura de Rejeitos de Mineração**. 150p, 2005. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, RJ, Brasil.
- Van Genuchten MTh (1980) A Closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Sci. Am. J.**, 44, n. 5, pp. 892-898.
- Yanful E. K. Oxygen Diffusion Through Soil Cover on Sulfidic Mill Waste. **ASCE J. Geotechnical. Eng.**, 199, n.8, pp. 1207-1228, 1993.
- Wilson, G.W. 1990. **Soil Evaporation Fluxes for Geotechnical Engineering Problems**. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.