

Avaliação do Desempenho de Coberturas Secas com o Uso de Modelagem Numérica

Anderson Borghetti Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil, borghetti@ufc.br

Mario Valente Possa
Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, Brasil, mpossa@cetem.gov.br

Vicente Paulo de Souza
Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, Brasil, vpsouza@cetem.gov.br

Paulo Sérgio Moreira Soares
Ministério das Minas e Energia (MME), Brasília, Brasil, paulo.soares@mme.gov.br

Marcos Fábio de Porto Aguiar
Instituto Federal do Ceará (IFCE), Fortaleza, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

RESUMO: A geração de resíduos produzidos por atividades de mineração requer que sejam tomados cuidados quanto a sua disposição, para que não contaminem o meio ambiente. Os rejeitos de mineração de carvão são comumente dispostos em pilhas (rejeitos granulares) ou em lagoas de decantação (rejeitos finos). Em várias regiões de mineração de carvão do Estado de Santa Catarina, os rejeitos granulares produzidos pelo processo de beneficiamento são dispostos em pilhas cobertas com solos com o objetivo de mitigar o ingresso de ar e da água para o interior da massa de resíduos. O rejeito de carvão é rico em pirita (FeS_2) e quando em contato com a água e oxigênio, e pela ação de bactérias, produz efluente ácido que contamina o meio ambiente. Particularmente importante é o dimensionamento das coberturas aplicadas sobre o rejeito, que devem levar em conta as propriedades hidráulicas dos materiais utilizados e as condições climáticas do local. Este trabalho apresenta resultados de modelagens numéricas do fluxo de água e do balanço hídrico de sistemas do tipo rejeito-cobertura, utilizando o software Vadose, em elementos finitos, que considera o fluxo evapotranspirativo. As modelagens numéricas representam dois modelos físicos tipo rejeito-cobertura, construídos em uma unidade piloto, localizada em uma mina de carvão, no Estado de Santa Catarina. Os resultados da modelagem indicaram um bom desempenho das coberturas, pela diminuição dos volumes percolados e a manutenção de elevados graus de saturação na camada argilosa, e estão de acordo os dados obtidos em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem numérica, rejeito, carvão, fluxo não saturado, coberturas.

1 INTRODUÇÃO

A mineração de carvão gera resíduos que são dispostos em pilhas controladas e bacias de decantação. Do carvão bruto extraído - *ROM* ("run of mine") - cerca de 1/3 é composto por rejeito. No Brasil as principais jazidas de carvão mineral são encontradas na região Sul (Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná).

Estes rejeitos quando expostos ao meio ambiente, entram em contato com a água e o ar, gerando um efluente ácido que contamina o solo e os corpos hídricos. Tal fenômeno é conhecido como drenagem ácida de mina (DAM). A técnica de Coberturas secas consiste na aplicação de camadas de solos, geossintéticos e/ou materiais alternativos, sobre os rejeitos. A cobertura seca é uma técnica de

prevenção e controle na geração de drenagem ácida de mina que objetiva minimizar a entrada de água e de oxigênio na pilha de rejeito. O número de camadas e a espessura destas são dimensionados com base em critérios de engenharia, fundamentados a partir de conceitos de fluxo de água em solos não saturados.

O presente artigo apresenta os resultados de modelagens numéricas do balanço hídrico de dois modelos experimentais (rejeito-cobertura), construídos em uma unidade piloto situada em uma área de mineração de carvão pertencente à Carbonífera Criciúma S/A (CCSA), no Estado de Santa Catarina. A unidade piloto foi dimensionada e operada pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). As modelagens numéricas permitiram obter parcelas de balanço hídrico, perfis de saturação, de umidade volumétrica e de sucção.

2 MODELOS NUMÉRICOS

Um modelo numérico simula um processo físico real, com a vantagem de produzir resultados rápidos quando comparados aos resultados obtidos em um modelo físico, que pode requerer meses ou anos para serem obtidos. O modelo numérico fornece informações por todo um perfil estudado, podendo ainda simular diferentes geometrias e condições de contorno. O modelo numérico utilizado neste trabalho para avaliar o desempenho de coberturas sobre rejeitos de mineração de carvão foi o Vadose (GeoStudio, 2007), que é um software bidimensional em elementos finitos, que simula o fluxo de água em meios porosos (regime estacionário e transiente) e o balanço hídrico em sistemas do tipo rejeito-cobertura. A infiltração da água é modelada com base na equação de fluxo de água em meio não saturado e a evaporação por meio da consideração de processos atmosféricos que atuam na superfície, pelo método modificado de Penman (1948). Este método 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.*, 1994).

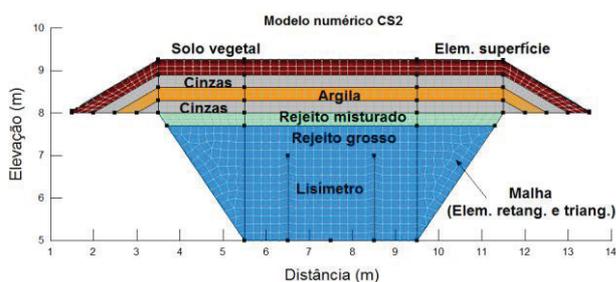
A modelagem numérica apresentada no

presente trabalho simulou o comportamento de dois modelos físicos construídos em campo, que foram projetados a partir de uma modelagem numérica preliminar, unidimensional, utilizando o software SoilCover, baseado nos dados climáticos e de materiais disponíveis no local de estudo (Borghetti Soares *et al.*, 2009). Cada modelo representa uma cava, em formato de tronco de pirâmide invertida, construída dentro de um aterro de 3 metros de altura, com base inferior da cava medindo 4x4m e a base superior, 8x8m. As paredes internas e o fundo da cava foram revestidos por uma geomembrana do tipo PEAD para impedir vazamentos. Posteriormente, a cava foi preenchida com rejeitos de mineração de carvão (volume total de 108 m³). No interior da cava foi dimensionado um lisímetro (2 metros de diâmetro e 2 metros de altura) para permitir a amostragem de efluente percolado. A parcela da água que percolava no rejeito fora do lisímetro era conduzida até um reservatório externo. Em campo as camadas foram instrumentadas com sensores para medir sucção, umidade volumétrica e temperatura, conectados a um sistema de aquisição central (data logger), totalizando 45 instrumentos. Uma descrição detalhada dos modelos e da unidade piloto é apresentada em Borghetti Soares *et al.* (2010) e Souza *et al.* (2009). A diferença entre os modelos é o tipo de cobertura aplicada na superfície de cada cava. No primeiro modelo, que aqui será denominado de CS1, os rejeitos foram cobertos por uma camada de 30cm de argila compactada e 30cm de solo vegetal não compactado e sem a aplicação de vegetação. No segundo modelo, denominado de CS2, o rejeito foi coberto por camadas de 30cm de espessura na seguinte ordem (de baixo para cima): cinzas de fundo, oriunda da queima do carvão mineral na termoelétrica Jorge Lacerda, argila, cinzas de fundo e solo vegetal. Assim como no modelo CS1, o solo vegetal não foi compactado. As cavas foram preenchidas com dois tipos de rejeitos (Borghetti Soares *et al.*, 2009): (a) rejeito grosso, material com “*top size*” de 37 mm, classificado, de acordo com o SUCS, como GW, e (b) rejeito misturado que é uma mistura do rejeito grosso com um rejeito fino, sendo que este último apresenta diâmetro médio

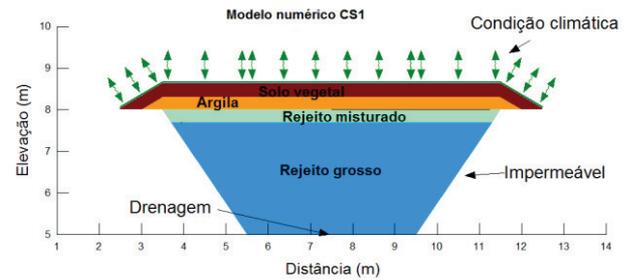
dos grãos inferior a 1 mm.

As modelagens numéricas utilizando o Vadose são bidimensionais e os resultados obtidos são por metro linear. Cada material é definido dentro de uma região e com uma malha de elementos finitos. A Figura 1 mostra a malha utilizada, com elementos retangulares e triangulares (do modelo CS2) e as condições de contorno da análise transiente do modelo CS1 (idênticas à célula CS2). Na superfície da cada modelo definiu-se uma malha de elementos de superfície do solo vegetal (5cm). A definição deste tipo de elemento, disponível no software Vadose, é necessária para simular as variações bruscas de pressão que ocorrem na superfície, em intervalos curtos de tempo.

As análises de fluxo constaram de uma análise de fluxo estacionário, para obtenção das condições iniciais de poropressão (condição inicial) e uma análise transiente, que permitiu verificar as variações de umidade, saturação e poro-pressão nos modelos numéricos, com a profundidade e com o tempo, além das parcelas do balanço hídrico gerados. As condições de contorno adotadas foram: (a) fluxo estacionário: (i) impermeável nos taludes, (ii) drenagem permitida no fundo e (iii) poro-pressões iniciais baseadas em dados de sucção obtidos em campo através de sensores instalados nas camadas; e (b) fluxo transiente: (i) impermeável nas paredes internas das cavas, (ii) drenagem permitida no fundo e (iii) condição climática na superfície.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Malha do modelo CS2 e (b) condições de contorno do modelo CS1.

Os parâmetros hidráulicos dos materiais utilizados nas modelagens numéricas foram obtidos a partir de resultados de ensaios de campo e de laboratório e a aplicação de métodos teóricos descritos na literatura. A condutividade hidráulica saturada (k_{sat}) dos materiais é apresentada na Tabela 1, bem como os ensaios realizados.

Tabela 1. k_{sat} dos materiais.

Material	k_{sat} (cm/s)	Método
Rejeito grosso	$1,62 \cdot 10^{-2}$	Cava
Rejeito misturado	$6,89 \cdot 10^{-4}$	Infiltrômetro
Argila empresa	$3,25 \cdot 10^{-6}$	P. Carga cte.
Cinzas de fundo	$2,45 \cdot 10^{-4}$	P. Carga cte.
Solo vegetal	$3,21 \cdot 10^{-3}$	Infiltrômetro

As curvas de retenção de água foram obtidas experimentalmente por diferentes técnicas: de papel filtro, de extrator de Richards e também por medições da sucção em amostras indeformadas, retiradas em campo, por meio de tensiômetros. Os pontos experimentais foram ajustados às curvas pelo método de Van Genuchten (1980), utilizando o programa RETC (Van Genuchten *et al.*, 1991). Os rejeitos e as cinzas apresentaram um baixo valor de sucção de entrada de ar, ao contrário da argila que apresenta um valor mais elevado (em torno de 50kPa), que é característico de materiais argilosos. As curvas de condutividade hidráulica não saturada foram obtidas pelo método de Van Genuchten (1980), obtida a partir da curva de retenção (Figura 2b).

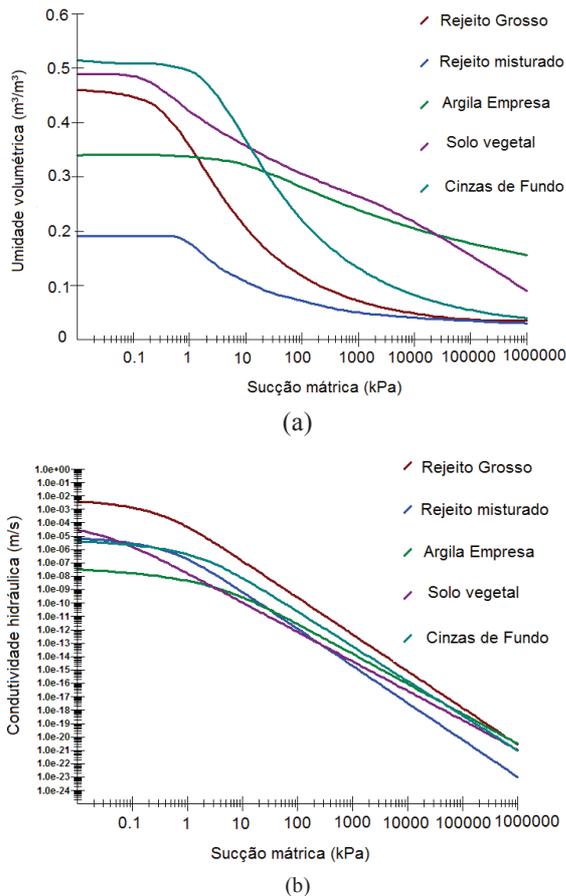


Figura 2. (a) Curvas de retenção e (b) condutividade não saturada dos materiais.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos referem-se ao ano de 2008 que teve uma precipitação anual de 1418mm. Como pode ser observado na Figura 3, que mostra os dados pluviométricos do local, há uma distinção entre um período seco, com o mês de julho sendo o mais seco, e um período chuvoso, com o mês de outubro, sendo o mais chuvoso. Os dados pluviométricos foram obtidos por dois pluviógrafos instalados na unidade piloto (CR10X e Estação).

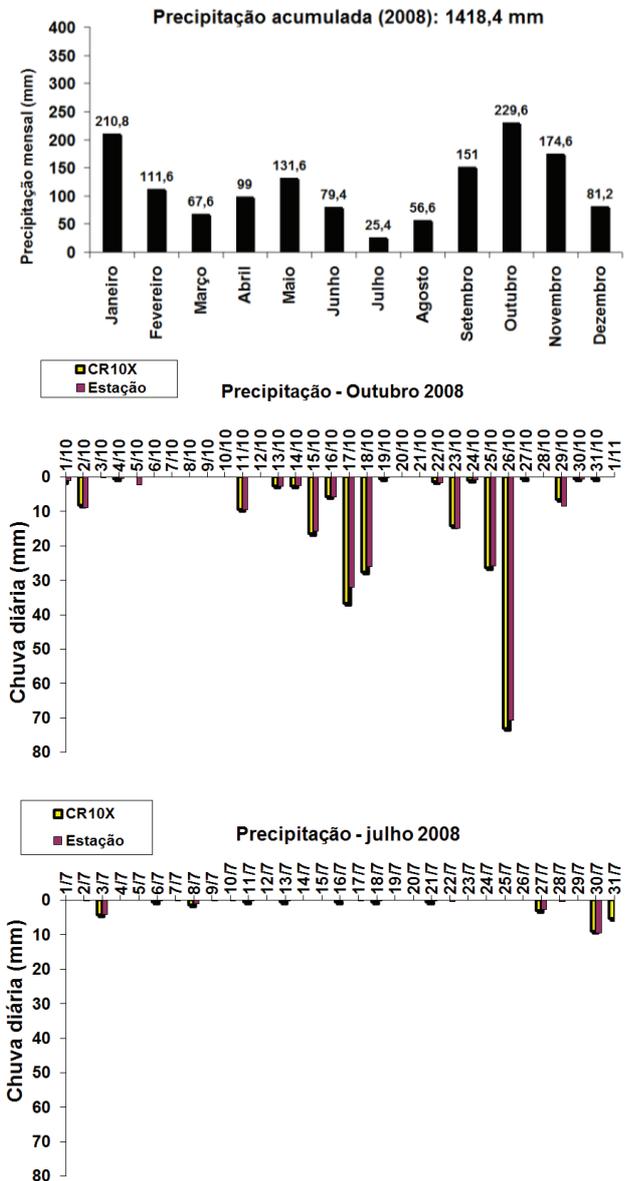


Figura 3. Dados de precipitação em 2008.

A evaporação real foi estimada pelo método de Penman (1948) modificado que utilizou dados de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura máxima e mínima, pressão atmosférica e velocidade dos ventos, obtidos em uma estação meteorológica instalada na unidade piloto. A Figura 4a mostra os perfis de propensões, umidade e saturação no modelo CS1, em uma vertical que passa no centro do modelo, variando com o tempo e a profundidade (a cada 2 meses). Como pode ser observado as sucções nas camadas de cobertura variaram entre -5 e -25 kPa, com pouca variação no teor de umidade volumétrica e na saturação (Figuras 4b e 4c). Na camada de rejeito grosso não houve grandes variações no valor da sucção com a

profundidade (exceto na condição inicial que foi determinada em função de dados de campo). Houve uma pequena tendência de queda na umidade (e saturação) na camada argilosa, que apresentou graus de saturação elevados, superiores a 90%, durante todo o ano de 2008. O solo vegetal apresentou um estado não saturado atingindo valores de saturação inferiores a 75%. Entretanto, de acordo com os resultados da modelagem, a camada de solo vegetal conseguiu proteger a argila de ressecamentos excessivos, pela manutenção de elevados graus de saturação na camada argilosa, que restringe o acesso do oxigênio para as camadas de rejeito (Yanful, 1993).

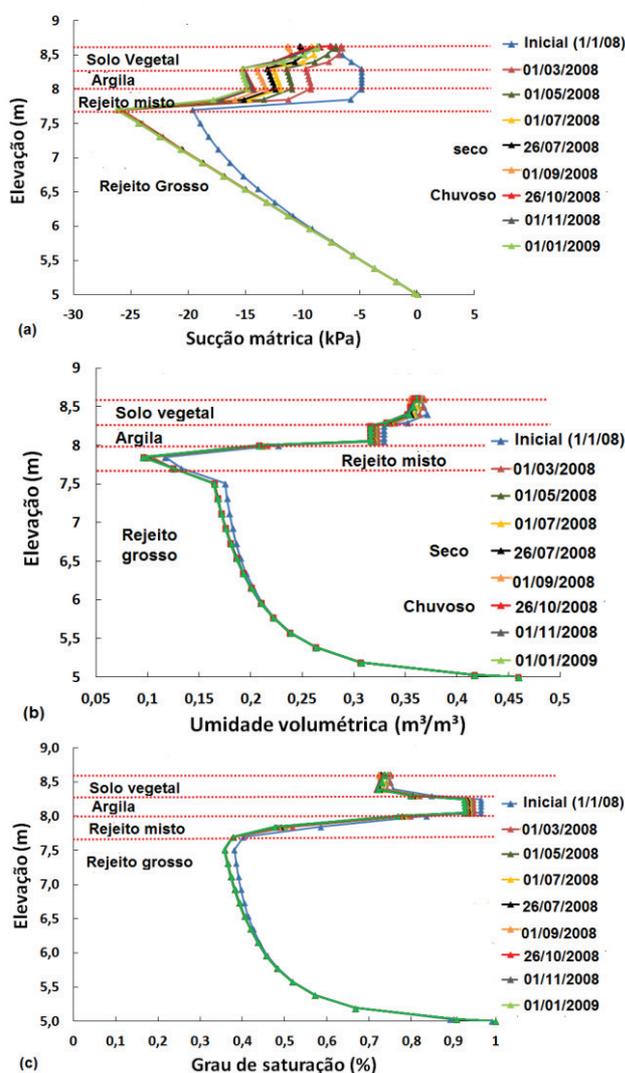


Figura 4. Perfis: (a) sucção, (b) umidade vol. e (c) grau de saturação com o tempo e a profundidade no modelo CS1.

O balanço hídrico do modelo CS1 é apresentado na Figura 5. Simulou-se, no modelo

CS1, uma crosta na superfície com condutividade hidráulica mais baixa (10^{-7} m/s) que o solo vegetal subjacente. A condutividade hidráulica saturada do solo vegetal (medido em campo, na ordem de $1e^{-5}$ m/s) é em geral maior que os valores de intensidade de chuva que ocorreram no ano de 2008. A definição de uma crosta superficial no solo vegetal permite representar o comportamento observado em campo, onde foram medidos volumes de escoamento superficial nos modelos experimentais. A não definição da crosta na superfície do modelo numérico resultaria na infiltração total da água da chuva, sem a ocorrência de escoamento superficial, fato este que contradiz o comportamento observado em campo. Pelo mesmo motivo, no modelo CS2, simulou-se uma crosta superficial na superfície do solo vegetal.

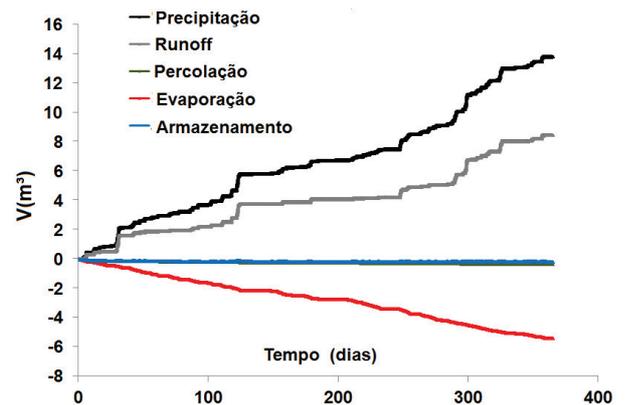


Figura 5. Parcelas do balanço hídrico no modelo CS1.

Os resultados do balanço hídrico indicaram um volume total precipitado, por metro linear do modelo, de $14,18\text{m}^3$. O volume percolado foi de $0,371\text{m}^3$, sendo bastante reduzido em relação ao total precipitado (2,6% do total precipitado). O armazenamento de água apresentou um déficit relação ao início do ano de $-0,160\text{m}^3$. A evaporação acumulada foi de $5,54\text{m}^3$ e o escoamento superficial de $8,51\text{m}^3$.

Dados físico-químicos e geoquímicos obtidos em campo no efluente percolado na CS1 indicaram uma boa qualidade, demonstrada através de valores de pH superiores a 7,0 e concentração de espécies químicas (ferro, sulfato, manganês, acidez, etc.) inferiores ao mínimo exigido pela legislação ambiental, no ano de 2008 (Souza *et al.*, 2009).

A Figura 6 mostra os resultados obtidos para o modelo CS2. Observa-se que as poro-pressões nas camadas de cobertura não variam significativamente e situaram-se entre 0 e -15kPa (Figura 6a). Variações maiores da umidade e da saturação (Figuras 6b e 6c) ocorreram nas camadas de cinzas e solo vegetal. Não há grandes variações nos valores de saturação na camada argilosa, considerando os meses mais seco e chuvoso. A camada argilosa manteve elevados graus de saturação, superiores a 90%, atingindo a condição saturada em determinados períodos do tempo.

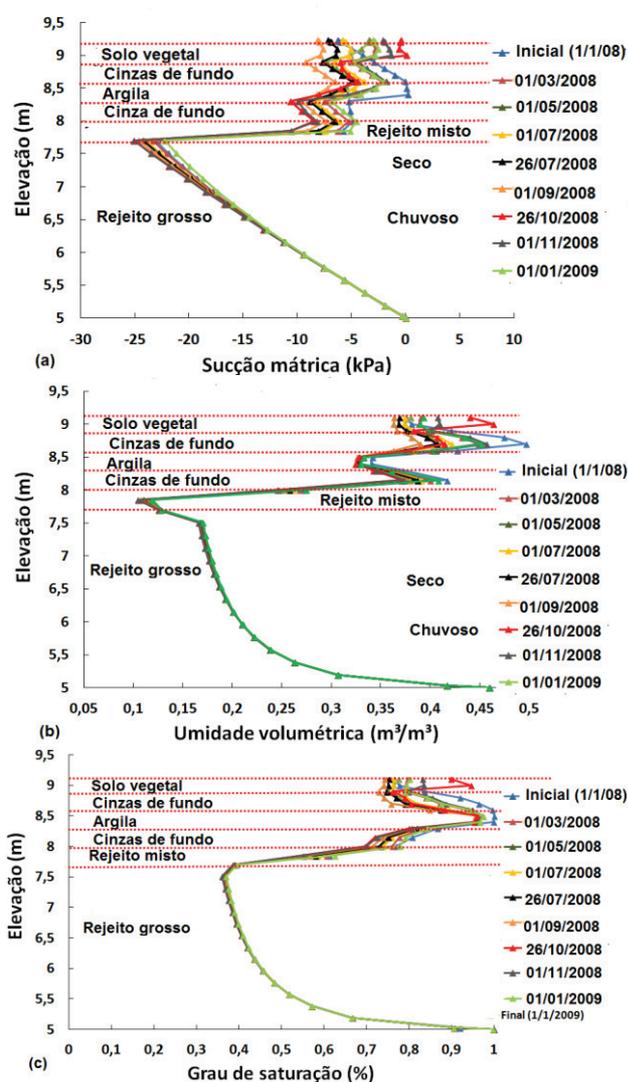


Figura 6. Perfis: (a) sucção, (b) umidade vol. e (c) grau de saturação com o tempo e a profundidade no modelo CS2.

Os resultados da modelagem da cobertura CS2 mostraram que esta foi capaz de manter a saturação da camada argilosa durante todo o ano de 2008 e mitigar os efeitos da drenagem ácida

de minas, pela redução do ingresso do oxigênio para as camadas de rejeito. Os dados de campo físico-químicos e geoquímicos de efluentes percolados neste modelo confirmaram os resultados da modelagem, com pH do efluente percolado > 6,5 (Souza *et al.*, 2009).

O balanço hídrico do modelo CS2 é apresentado na Figura 7. Assim como no modelo CS1 foi definida uma crosta superficial com condutividade hidráulica saturada mais baixa que o solo vegetal subjacente (ordem de 10^{-7} m/s). A precipitação total acumulada foi de 17m^3 (por metro linear). Deste total, $9,31\text{m}^3$ não infiltraram, escoando superficialmente, $6,41\text{m}^3$ evaporaram e $1,3\text{m}^3$ (7,6% do total precipitado) percolou, resultando em uma variação de massa de água de $-0,149\text{m}^3$ (armazenamento). Assim como ocorreu na cobertura CS1, houve uma redução significativa do fluxo de água para dentro do rejeito.

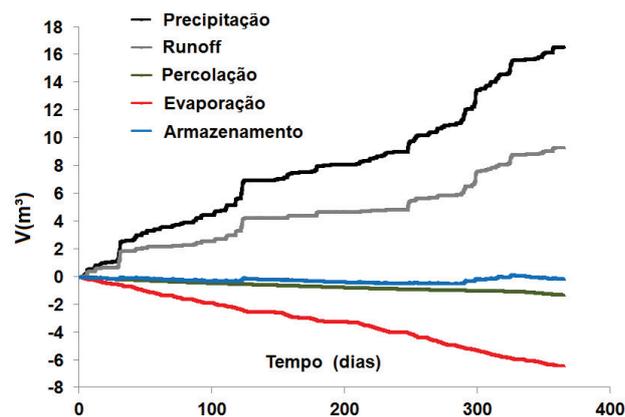


Figura 7. Parcelas do balanço hídrico no modelo CS2.

A Tabela 2 mostra os volumes percolados nos modelos CS1 e CS2 obtidos na modelagem com o software Vadose e os medidos em campo. Nota-se uma boa concordância entre os dados experimentais e numéricos para o modelo CS2. Para o modelo CS1 observou-se uma redução bastante significativa do volume percolado, em relação ao volume total precipitado, tanto na modelagem numérica, quanto nos dados experimentais. Com pode ser visto na Tabela 2. Os volumes percolados obtidos pela modelagem numérica com o Vadose apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais obtidos em campo.

Tabela 2. Volumes percolados nos modelos (ano de 2008): resultados numéricos x experimentais.

Percolação (2008), em mm.	CS1	CS2
Vadose (2007)	32	108
Campo	6	110

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados obtidos na modelagem do fluxo de água e balanço hídrico, utilizando o programa Vadose (GeoStudio, 2007). Os modelos numéricos foram caracterizados quanto à geometria, condições iniciais, condições de contorno e parâmetros de entrada. Os resultados das modelagens englobaram perfis de sucção, perfis de teor de umidade volumétrica e perfis de saturação, considerando diferentes períodos (seco e chuvoso) do ano de 2008, e as parcelas do balanço hídrico de cada modelo.

Os resultados de modelagem numérica indicaram um bom desempenho das coberturas secas projetadas, que se reflete na redução dos volumes percolados e na manutenção de elevados graus de saturação na camada argilosa. Os volumes percolados, em relação à precipitação total, obtidos na modelagem numérica, foram de 7,8 % na CS2 e de 2,6% e na CS1, sendo próximos dos volumes percolados medidos em campo. Os perfis de poro-pressão, umidade volumétrica e saturação da mostraram que a camada argilosa manteve elevados graus de saturação ao longo do ano de 2008. A mitigação dos efeitos da drenagem ácida de mina é obtida pela redução do fluxo de água e oxigênio para dentro dos rejeitos. Dados físico-químicos e geoquímicos do efluente percolado nos modelos em campo, para o ano de 2008, indicaram uma boa qualidade do efluente (pH superior a 6,5 e espécies químicas poluentes em concentrações aceitáveis) e confirmam os resultados das modelagens numéricas (Souza *et al.*, 2008). A modelagem numérica mostrou-se uma ferramenta eficiente para estimar o fluxo de água em sistemas do tipo-rejeito cobertura e pode ser utilizado em outras situações mais complexas (depósitos de rejeitos). Entretanto, para que haja uma boa confiabilidade sobre os resultados da

modelagem numérica é necessário o uso parâmetros de entrada os mais representativos possíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, à Rede Carvão - Rede de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação em Carvão Mineral, à Carbonífera Criciúma S/A pelo apoio na realização deste trabalho e à Tractebel Energia.

REFERÊNCIAS

- Borghetti Soares, A, Ubaldo, M.O., Souza, V.P., Soares, P.S.M, Barbosa, M.C., Mendonça, .R.M.G. (2009). 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), pp 219-231.
- 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. (2010). 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), pp. 277-284.
- GeoAnalysis (2000). Soil Cover Software. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- GeoStudio (2007). VADOSE/W. Vadose Zone and Soil Cover Analysis. *User's Guide*. Third Edition, GEO-SLOPE International Ltd., Canada. Third edition, 2007.
- Penman, H.L. (1948). Natural Evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London Ser. A*. A:193: 120-145.
- Souza, V.P., Possa, M.V., Soares, P.S.M., Borghetti Soares, A., Bertolino, A.V.F.A., Souza, M.R.R. (2009). Desempenho de cobertura seca em escala piloto para abatimento de DAM gerada por rejeito de carvão. *Proc, 23rd ENTMMME*, Gramado, RS, Brasil, vol. 2, pp. 515-523.
- Van Genuchten, MTh (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am.* J 44:892-898.
- Van Genuchten, MTh, LEIJ, F.J., Yates, S.R. (1991) The

RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soil. IAG-DW 12933934, Oklahoma, 93p.

Yanful, E.K. (1993). Oxygen Diffusion Through Soil Cover on Sulfidic Mill Waste. *ASCE J. Geotechnical Engineering*, vol. 199, n.8, pp. 1207-1228.

Wilson. G.W. (1990). Soil Evaporation Fluxes for Geotechnical Engineering Problems. *P.hD. Thesis, University of Saskatchewan*, Saskatoon, Canada.

Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L. (1994) Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 151-161.