

MODELAGEM NUMÉRICA DE COBERTURAS SECAS APLICADAS SOBRE REJEITOS DE MINERAÇÃO

BORGHETTI SOARES, A.¹, SOARES, P.S.M.², POSSA, M.V.², SOUZA, V.P.²

¹Universidade Federal do Ceará (UFC). borghetti@ufc.br

²Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). psoares@cetem.gov.br, mpossa@cetem.gov.br, vpsouza@cetem.gov.br

RESUMO

A aplicação de coberturas secas em rejeitos de carvão é uma alternativa de engenharia para a prevenção e controle da drenagem ácida de mina (DAM). Estes rejeitos contêm pirita que oxida quando em contato com o ar e a água, gerando um efluente ácido que polui o meio ambiente. As coberturas secas atuam como uma barreira ao ingresso do oxigênio e da água para o interior do rejeito, inibindo assim as reações que originam a DAM. A modelagem numérica do balanço hídrico é uma ferramenta importante no entendimento dos volumes de água que entram e saem de sistemas rejeito-cobertura. Este trabalho apresenta resultados de modelagens numéricas do balanço hídrico de modelos experimentais construídos em uma unidade piloto, projetada e operada pelo CETEM em Forquilha (SC). Foi utilizado o software Vadose-GeoSlope, que permite simular a infiltração da água da chuva, levando em conta os processos atmosféricos que atuam na superfície. Os resultados indicaram um bom desempenho dos sistemas de cobertura onde foram empregados materiais de cobertura compactados, obtendo-se a redução dos volumes de água percolados para dentro do rejeito. Dados experimentais de percolação obtidos na unidade piloto revelaram boa concordância com os resultados numéricos gerados. A modelagem numérica forneceu resultados das parcelas do balanço hídrico mostrando-se útil na previsão do comportamento hídrico de sistemas rejeito-cobertura em depósitos de rejeitos de mineração.

PALAVRAS-CHAVE: cobertura seca; drenagem ácida de mina; modelagem numérica.

ABSTRACT

The application of dry covers in coal wastes is an engineering alternative for the prevention and control of acid mine drainage (AMD). These materials contain pyrite that oxidizes when exposed to air, water, creating an acidic effluent that pollutes the environment. The dry covers act as a barrier to the entry of oxygen and water into the waste, thereby inhibiting the reactions that lead to AMD. Numerical modeling of the water balance is an important tool in understanding the variation of the water volumes in waste-cover systems. This paper presents results of numerical modeling of water balance models that reproduced experimental models in pilot unit designed and operated by CETEM in Forquilha (SC). The numerical modeling was performed to Vadose-GeoSlope software that simulates the infiltration of rainwater, taking into account the atmospheric processes that act on the surface. The results showed a good performance of dry covers have been projected as compacted layers, obtaining the reduced volumes of seepage into the waste. Experimental data obtained on seepage in pilot unit showed good agreement with numerical results generated. The numerical modeling provided water balance parcels and has proven useful in predicting the behavior of water in waste-covers in mining wastes deposits.

KEYWORDS: dry cover; acid mine drainage; numerical modeling.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta as modelagens numéricas do balanço hídrico de quatro modelos experimentais da Estação Experimental Juliano Peres Barbosa (EEJPB), projetada e operada pelo CETEM no município de Forquilha/SC, situada nas coordenadas 28°47' de latitude sul e 49°26' de longitude oeste. Esta região de mineração de carvão é parte da região Carbonífera de Santa Catarina que está localizada no sudeste do Estado de Santa Catarina. A região corresponde a um polígono de aproximadamente 95km e uma largura média de 20km, compreendida na área delimitada pelas coordenadas, 28°11' a 29°03', de latitude sul e 49°10' a 49°37' de longitude oeste (CETEM, 2001). A função de coberturas secas é limitar a entrada de água e oxigênio. Se o resíduo é um rejeito de mineração sulfetado, a cobertura age de forma a abater os efeitos da drenagem ácida de mina (DAM). A descrição do fenômeno da DAM foge do escopo deste trabalho e seus conceitos são amplamente discutidos na literatura (Rose e Cravota III, 1998). A eficiência das coberturas tem sido comprovada em diversas pesquisas (Mend, 2001; O'Kane *et al.* 2006; Ayres *et al.*, 2002; Adswusu e Yanful, 2006). No Brasil, entretanto, há uma carência de dados experimentais de cobertura secas aplicadas em rejeitos de mineração de carvão (qualidade do efluente, volumes de percolação de efluente, evaporação real, saturação de camadas, etc). A EEJPB, que está em operação por mais de 5 anos, e é pioneira no Brasil nos estudos sobre coberturas secas e permite a análise destes dados.

O uso de modelagem numérica auxilia na previsão do comportamento do fluxo de água e balanço hídrico de rejeitos com coberturas secas, e os resultados das modelagens permitem avaliar a eficiência de cada tipo de cobertura. A confiabilidade da modelagem é condicionada principalmente qualidade aos parâmetros de entrada, que devem ser representativos das condições reais dos materiais de campo. Neste artigo são reproduzidos por modelagem numérica de modelos experimentais da EEJPB: duas configurações de cobertura seca e duas configurações contendo rejeitos. Através da modelagem foi possível obter as parcelas de balanço hídrico e perfis e contornos de saturação, umidade volumétrica e sucção. Neste artigo são apresentados alguns dos resultados obtidos nas modelagens para o ano de 2008. A descrição completa dos resultados pode ser consultada em Borghetti Soares (2012). Os volumes percolados nas células gerados pelas modelagens foram comparados com os dados experimentais das mesmas células da EEJPB. O objetivo da modelagem é reproduzir de forma mais realística possível o comportamento de campo, de modo a poder prever com confiabilidade o comportamento hídrico em depósitos de rejeitos.

2. METODOLOGIA

Um modelo numérico permite fazer simulações matemáticas de 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. As modelagens numéricas apresentadas aqui foram realizadas com o programa 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 (equação de Laplace) e a evaporação por meio da consideração de processos atmosféricos que atuam na superfície, pelo método de Penman (1948) modificado, 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.*, 1994). No presente trabalho são apresentadas as modelagens numéricas do fluxo de água e balanço hídrico das quatro células reproduzidas na Estação Experimental Juliano Peres Barbosa (Borghetti Soares *et al.*, 2009; 2010; Souza *et al.* 2009).

Para a construção de um modelo numérico é necessário, primeiramente, definir os elementos da modelagem. O primeiro elemento definido foi a geometria dos quatro modelos experimentais da unidade piloto. Como observado, todos os modelos possuem o mesmo volume de rejeitos, contido em cavidades de mesmas dimensões, no formato de tronco de pirâmide invertida. A diferença entre eles reside no tipo de cobertura aplicada na superfície de cada modelo. Os resultados de campo mostraram que as configurações rejeito-cobertura projetadas com cobertura de argila e cinzas (células 3 e 4) apresentaram bons resultados na mitigação do efeito da DAM.

As geometrias dos modelos numéricos representados no programa Vadose foram definidas a partir de uma seção transversal, passando no centro dos modelos, considerando uma análise bidimensional (2-D). Os resultados obtidos no programa são dados por metro linear da seção transversal. As cavidades de cada modelo numérico foram definidas com base de 4,0m de largura e o topo de 8,0 m. A dimensão do topo definida na modelagem numérica é um pouco maior que a apresentada na Figura 1 e corresponde à dimensão real executada em campo, pois durante a fase construtiva, esta ficou superior à definida em projeto (7,5m). O objetivo desta mudança é reproduzir resultados de modelagem mais próximos do comportamento de campo. As camadas de cobertura foram representadas com 30 cm de espessura e espaçamento horizontal de 50 cm (no topo dos rejeitos).

Nas modelagens numéricas, cada material (cobertura ou rejeito) é definido dentro de uma região, na geometria da célula. Dentro de cada região foi definida uma malha de elementos finitos. Utilizaram-se elementos retangulares e triangulares, como pode ser visto na Figura 1, que exemplifica o modelo numérico da célula 3. As malhas utilizadas nas modelagens numéricas foram as que apresentaram os melhores resultados em termos de convergência da solução e redução do tempo de processamento. Na superfície da cada modelo definiu-se uma malha de elementos de superfície (rejeito grosso=célula 1; rejeito misturado=célula 2 e solo vegetal=células 3 e 4). 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.

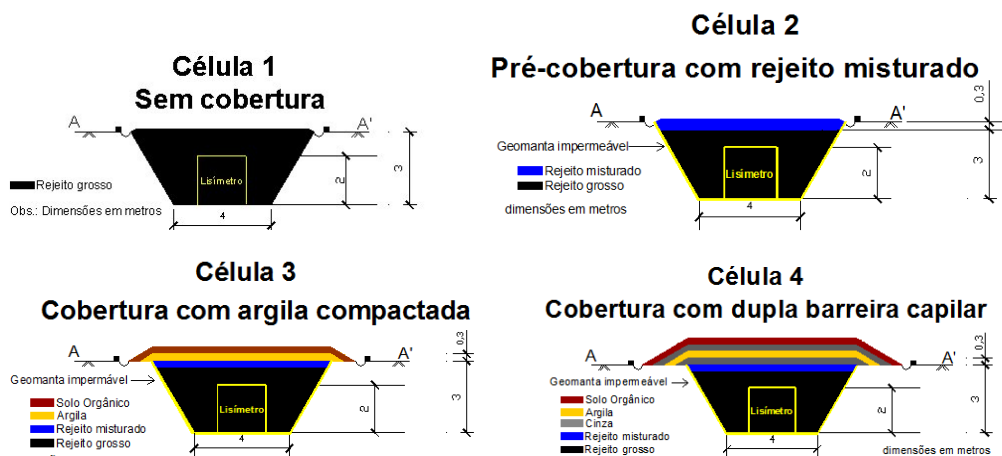


Figura 1. Modelos experimentais com e sem cobertura seca: (a) célula 3 e (b) célula 4.

Duas análises foram realizadas nas modelagens numéricas: (a) fluxo de água estacionário (definição do instante inicial) e (b) fluxo transiente (dependente do tempo). No regime de fluxo estacionário foram definidas condições iniciais de pressão nas camadas de rejeito, cobertura e proteção. Em todos os modelos definiu-se poro-pressão zero na base (dentro e fora do lisímetro) e impermeável na parte inclinada da célula experimental. Ainda na análise estacionária, nas camadas de cobertura, foram definidos diferentes valores de sucção em função da profundidade, baseados em dados de sensores instalados em campo.

As condições de contorno definidas na análise transiente (dependente do tempo) foram iguais nas quatro células. Assim como na análise estacionária foi definida uma condição de poro-pressão nula na base da célula (dentro e fora do lisímetro) e impermeável na parte inclinada. Nas análises de fluxo de água transiente foi aplicada uma condição de contorno climática na superfície (do ano de 2008) para cada modelo numérico. A Figura 2 mostra as condições de contorno definidas para a análise transiente da célula 3, que são idênticas às das demais células. A condição de contorno climática leva em conta parâmetros tais com precipitação, umidade relativa do ar, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento. Estes dados foram obtidos a partir de uma estação climatológica instalada em campo no local do experimento.

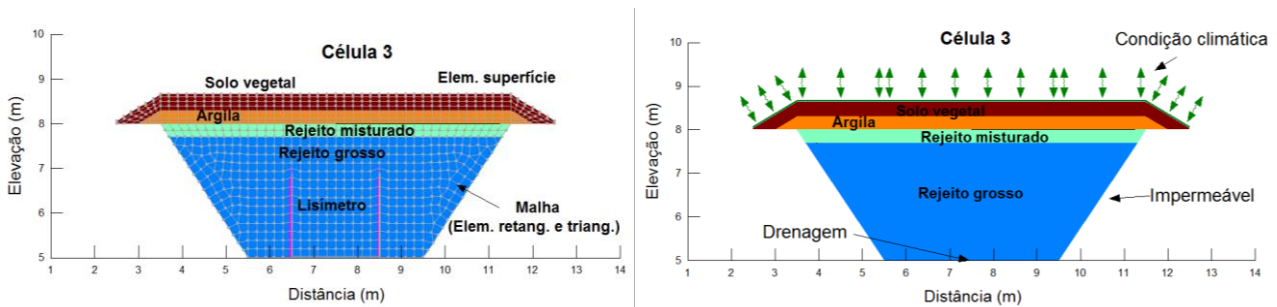


Figura 2. Malha e condições de contorno da análise transiente (célula 3).

Além da geometria, condições iniciais e de contorno, para a realização das modelagens foi necessário determinar os parâmetros hidráulicos de cada material. Estes parâmetros dependem da textura e da estrutura do material e são: a permeabilidade (ou condutividade hidráulica) saturada (k_{sat}), a curva de retenção de água e a curva de condutividade hidráulica não saturada. Para materiais de cobertura compactados a permeabilidade saturada foi determinada em laboratório, utilizando permeômetros de carga constante e variável (k_{sat} argila = $3,25 \cdot 10^{-6}$ cm/s e k_{sat} cinzas = $2,45 \cdot 10^{-4}$ cm/s). As permeabilidades saturadas dos materiais de proteção e de rejeito compactado foram obtidas com infiltrômetro de anéis concêntricos (k_{sat} solo vegetal = $3,21 \cdot 10^{-3}$ cm/s e k_{sat} rejeito misturado = $6,89 \cdot 10^{-4}$ cm/s). Para o rejeito grosso, foi feito um ensaio de cava (k_{sat} rejeito grosso = $4,0 \cdot 10^{-1}$ cm/s).

As curvas de retenção de água foram obtidas experimentalmente utilizando diferentes técnicas: de papel filtro e de extrator de Richards (argila empresa e cinzas de fundo) e também por medições da sucção em amostras indeformadas, retiradas em campo, por meio de tensiômetros (solo vegetal e rejeitos). A Figura 4 mostra as curvas de retenção de água de todos os materiais utilizados na modelagem. 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 apresentam um baixo valor de sucção de entrada de ar, ao contrário da argila que apresenta um valor mais elevado (em torno de 100 kPa), que é característico de materiais argilosos. À medida que o solo vai secando, os poros vão sendo preenchidos por água e ar e a condutividade hidráulica decresce com o aumento da sucção (diminuição da saturação). Esta variação da condutividade hidráulica com a sucção é representada pela curva de condutividade hidráulica não saturada, que foram obtidas pelo método de Van Genuchten (1980) a partir da curva de retenção (Figura 3).

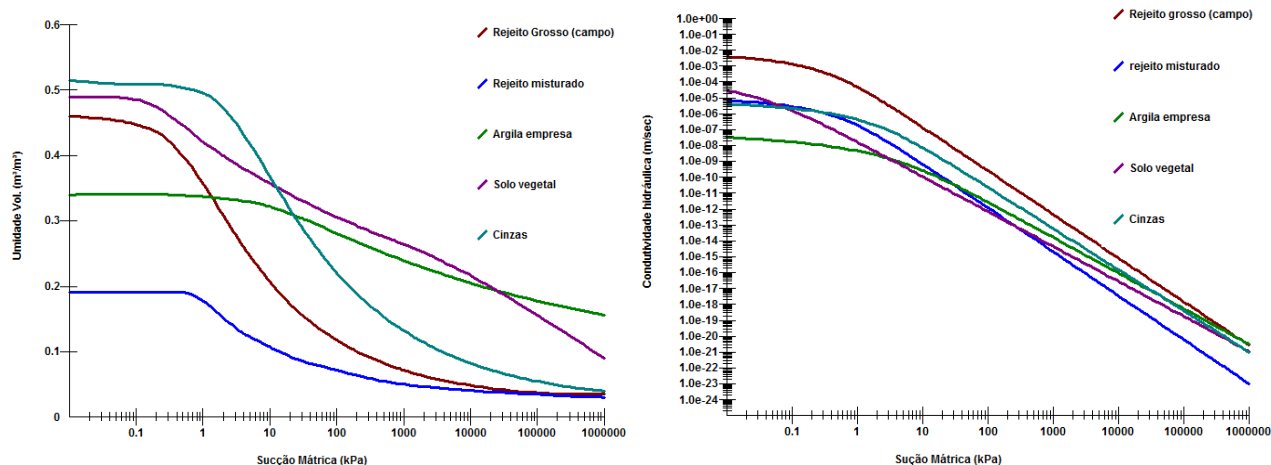


Figura 3. Curvas de retenção e condutividade não saturada dos materiais das modelagens.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As modelagens numéricas geraram os seguintes resultados para as quatro células: perfis e contornos de sucção, de umidade volumétrica, de saturação com a profundidade e o tempo, e parcelas de balanço hídrico. Neste artigo serão apresentados alguns destes resultados. A descrição completa da modelagem de todas as células pode ser consultada em Borghetti Soares (2012).

A Figura 4 exemplifica os contornos de saturação gerados no modelo numérico da célula 4. Em 2008 foram selecionados dois dias críticos nas análises: a) dia 26/07, que faz parte de um período seco de 2008, no mês de julho, que teve a menor precipitação mensal deste ano e b) dia 26/10, que faz parte de um período úmido de 2008, no mês de outubro, que teve a maior precipitação mensal de 2008. Os contornos de saturação apresentados na Figura 5 mostram que a célula 4 mantém elevados graus de saturação na camada argilosa (cor azulada), independente da época do ano de 2008. Mesmo em dias mais secos, os graus de saturação na argila foram superiores a 85%. No dia mais úmido, o solo vegetal aumentou do grau de saturação se comparado a dia mais seco. No rejeito grosso os graus de saturação não foram elevados e foram distantes da condição saturada ($S=1$).

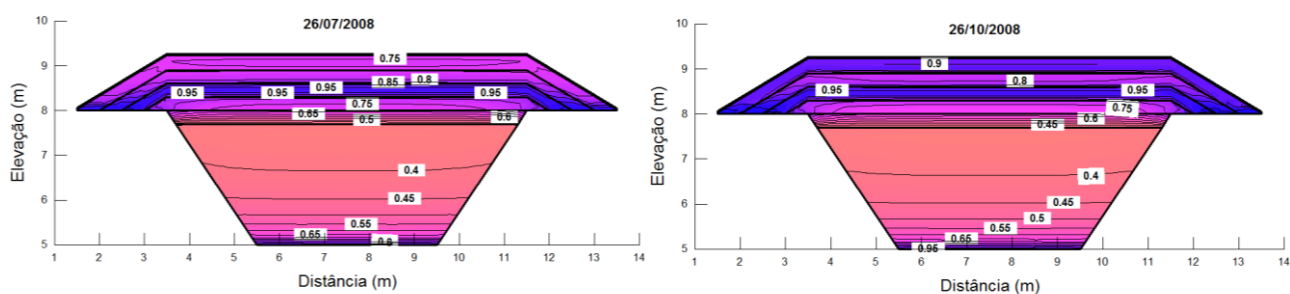


Figura 4. Contornos de saturação na célula 4 (0 = seco, 1 = saturado).

As parcelas de balanço hídrico obtidas foram de percolação, evaporação, escoamento superficial e armazenamento de água. Para que as comparações entre os dados das modelagens e de campo fossem possíveis, os volumes percolados em campo foram convertidos em *mm*. Os volumes percolados e acumulados no ano de 2008, dados pelas modelagens numéricas, são apresentados na Figura 5a. O volume percolado na célula 1 foi de 611mm e representa o máximo volume que

percola se o rejeito estiver exposto, sem qualquer tipo de cobertura. A aplicação de uma camada de pré-cobertura (rejeito misturado) sobre o rejeito grosso (modelo da célula 2) resultou em uma redução do volume percolado de 55%. A aplicação de cobertura de argila compactada (modelo da célula 3) resultou em uma redução de 95% do volume total percolado no rejeito grosso. A combinação de camadas de cinzas e argila compactadas (modelo da célula 4) resultou numa redução de 82% do volume percolado no rejeito. Esta redução foi bastante significativa, embora inferior à da célula 3, pois a camada de argila da célula 4 apresentou teores de umidade mais elevados que a argila da célula 3, e, conseqüentemente, uma maior condutividade hidráulica. Estes dados de percolação mostram um ótimo desempenho das coberturas projetadas nas células 3 e 4, confirmado pela redução muito significativa da quantidade de água percolada para dentro do rejeito grosso.

A Figura 5b apresenta a evaporação real acumulada obtida nas modelagens numéricas. Como pode ser observado, a célula 2 apresentou a menor evaporação anual acumulada. Os valores de evaporação real total acumulada foram próximos, independente do tipo de material de topo, e variou entre 493 e 585 mm. Estes valores foram coerentes, pois dados de campos do ano de 2011 obtidos em um tanque de evaporação, instalado no local do experimento, indicaram um valor de evaporação potencial anual, de até 729 mm. O valor de evaporação potencial corresponde à máxima evaporação que pode ocorrer quando há disponibilidade de água na superfície. No caso das quatro células, os materiais da superfície estão, na maior parte do tempo, em um estado não saturado e os volumes de evaporação real devem ser inferiores aos de evaporação potencial.

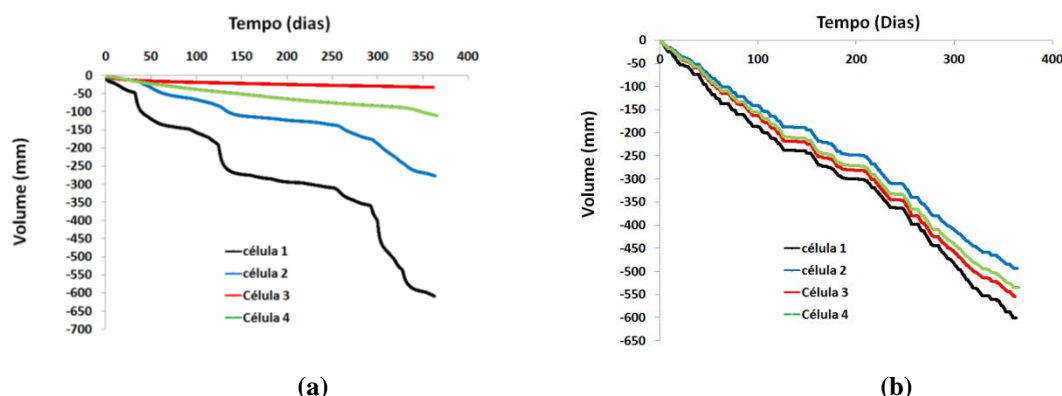


Figura 5. Parcelas de balanço hídrico dos modelos numéricos: (a) percolação e (b) evaporação real.

A Tabela I apresenta a comparação entre os dados experimentais e simulados na modelagem numérica de cada célula da EEJPB. Os volumes de água percolados em campo foram convertidos para *mm* dividindo-se o volume medido pela área de topo da célula. Observa-se uma boa concordância entre os dados experimentais e os simulados. Os resultados indicam que a modelagem numérica, utilizando Vadose, simulou de forma satisfatória a percolação da água nos rejeitos sobre diferentes condições de cobertura, podendo ser utilizada em simulações de depósitos de rejeitos.

Tabela I. Comparação entre os dados de percolação das células: experimental x numérico (*mm*) de 2008.

Percolação (mm)-2008	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4
Modelagem numérica	611	277	32	108
Resultados de campo	659	252	6	110

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados obtidos na modelagem numérica de quatro células experimentais reproduzidas em campo na EEJPB. Os seguintes casos foram reproduzidos nas modelagens numéricas: (a) rejeito exposto sem cobertura, (b) rejeito com uma pré-cobertura de rejeito misturado, (c) rejeitos cobertos com camada de argila compactada e proteção e (d) rejeitos cobertos por camadas de cinzas e argila compactadas e uma camada de proteção. Todas as camadas de cobertura, proteção e pré-cobertura foram dimensionadas em campo com uma espessura de 30 cm dispostas sobre uma camada de 3 metros de rejeito grosso. O programa utilizado foi o Vadose (GeoStudio, 2007) e os modelos numéricos das células experimentais foram caracterizados quanto à geometria, condições iniciais, condições de contorno e parâmetros de entrada. Os resultados das modelagens englobam contornos e perfis de poro-pressão, de teor de umidade volumétrica e de saturação, contornos de poro-pressão e saturação e parcelas de balanço hídrico.

Os volumes percolados obtidos pelas modelagens numéricas foram comparados entre si, indicando um bom desempenho das células projetadas com cobertura seca, com redução no volume percolado de 82% na célula 4 e 95% na célula 3. A camada argilosa da célula 4 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. Nas células 3 e 4 a redução da percolação da água foi bastante significativa. A redução da entrada do oxigênio deve ocorrer se houver manutenção de elevados graus de saturação na camada argilosa. Dados físico-químicos e geoquímicos do efluente percolado nas células 3 e 4, obtidos em campo, indicaram uma boa qualidade do efluente percolado na célula 4 (pH superior a 6,5). A evaporação real acumulada, por sua vez, variou entre 493 e 585 mm. Os dados obtidos nas modelagens numéricas são coerentes com os dados experimentais de evaporação potencial medidos na EEJPB para o ano de 2011, que indicaram um valor superior a 700 mm. A evaporação real acumulada foi obtida apenas pelo modelo numérico, pois outros métodos exigiriam a realização de experimentos paralelos (lisímetros em campo, de superfície natural de evaporação, caixa de vidro, etc).

Comparações entre as parcelas de balanço hídrico, experimental e numérico, indicaram uma boa concordância entre os volumes de percolação gerados na modelagem numérica e os coletados em campo, nas quatro células. A modelagem numérica mostrou-se uma ferramenta eficiente para estimar o fluxo de água em sistemas do tipo rejeito-cobertura e pode ser utilizada em outras situações mais complexas (depósitos de rejeitos). Entretanto, para que haja uma boa confiabilidade dos resultados obtidos, os parâmetros iniciais de entrada na modelagem numérica devem representar de forma mais próxima possível as condições de campo.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

AYRES, BK., O'KANE, M., CHRISTENSEN, D., LANTEIGNE, L. Construction and instrumentation of waste rock test covers at Whistle Mine, Ontario, Canadá. In: Proc, 9th International Conf on Tailings and Mine Waste, Fort Collins, CO, USA, p. 163-171, 2002.

ADSU-WUSU, C., YAUNFUL, E.K. Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle Mine, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 43: p. 1-18, 2006.

BORGHETTI SOARES, A., UBALDO, M.O., SOUZA, V.P., SOARES, P.S.M, BARBOSA, M.C., MENDONÇA, .R.M.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* v. 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* v. 29(4), p. 277-284, 2010.

BORGHETTI SOARES, A. Modelagem numérica de coberturas secas sobre rejeitos de mineração de carvão. RT003-2012-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.

GEOSTUDIO. VADOSE/W. Vadose Zone and Soil Cover Analysis. User's Guide. Third Edition, GEO-SLOPE International Ltd., Canada. Third edition, 2007.

MEND. Dry Covers. Mend Manual 5.4.2d. In: Prevention and Control. In: Tremblay GA, Hogan M (eds), v. 4, p. 155-232, 2001.

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, June, 2002.

ROSE, A., CRAVOTA, III, C.A. Chapter I: Geochemistry of Coal Mine Drainage. In: Coal Mine Drainage Prediction and Pollution. Pennsylvania, p.1-8, 1998.

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 ENTMME, Gramado, RS, Brasil, v. 2, p. 515-523, 2009.

VAN GENUCHTEN, MTh. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. Journal*, v. 44: p.892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, MTh, LEIJ, F.J., YATES, S.R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soil. IAG-DW 12933934, Oklahoma, 93p., 1991.

PENMAN, H.L. Natural Evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London. A*:193, p. 120-145, 1948.

WILSON, G.W., FREDULUND, D.G., BARBOUR, S.L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31: p. 151-161, 1994.