

Série Tecnologia Ambiental

Balanço Hídrico em Coberturas Secas Utilizando Modelagem Numérica

Mario Valente Possa

Anderson Borghetti Soares

Vicente Paulo de Souza

Paulo Sérgio Moreira Soares

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Balanço Hídrico em Coberturas Secas Utilizando Modelagem Numérica

**Mario Valente Possa
Anderson Borghetti Soares
Vicente Paulo de Souza
Paulo Sérgio Moreira Soares**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Dilma Vana Rousseff

Presidente

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Vice-Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Celso Pansera

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

Emília Maria Silva Ribeiro Curi

Secretária-Executiva

Adalberto Fazzio

Subsecretário de Coordenação 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

Durval Costa Reis

Coordenador de Administração

Cosme Antonio de Moraes Regly

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

ISBN 978-85-8261-031-2

STA - 80

Balanço Hídrico em Coberturas Secas Utilizando Modelagem Numérica

Mario Valente Possa

DSc. Engenharia Mineral – EPUSP/USP, Tecnologista Sênior do CETEM/MCTI.

Anderson Borghetti Soares

DSc. Geotecnia – COPPE/UFRJ.

Vicente Paulo de Souza

DSc. Engenharia Mineral – EPUSP/USP, Pesquisador Titular do CETEM/MCTI.

Paulo Sérgio Moreira Soares

DSc. Ciências em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – Escola de Química /UFRJ.

CETEM/MCTI

2015

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

João Henrique de Castro Rocha

Programação Visual

Valéria Cristina de Souza

Editoração Eletrônica

Andrezza Milheiro

Revisão

Possa, Mario Valente

Balanço hídrico em coberturas secas utilizando modelagem numérica / Mario Valente Possa [et alli.] __Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015.

43p. (Série Tecnologia Ambiental, 80)

1. Rejeito de carvão. 2. Cobertura seca. 3. Meio ambiente. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Possa, Mario Valente, III. Soares, Anderson Borghetti, IV. Souza, Vicente Paulo. V. Soares, Paulo S. Moreira. VI. Série.

CDD – 665.772

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 ASPECTOS TEÓRICOS	12
2.1 Precipitação	12
2.2 Escoamento Superficial	13
2.3 Infiltração e Fluxo de Água	13
2.4 Armazenamento de Água nas Camadas	17
2.5 Evaporação	18
3 MODELAGEM NUMÉRICA	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5 CONCLUSÕES	36
6 AGRADECIMENTOS	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

RESUMO

A aplicação de coberturas secas em rejeitos de carvão é uma alternativa de engenharia para a prevenção e controle da geração de drenagem ácida de mina (DAM). Esses rejeitos contêm pirita, que é oxidada quando em contato com o ar e água, gerando um efluente ácido e causando problemas ambientais. 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). Para tanto, 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 o interior 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

balanço hídrico, rejeito de carvão, cobertura seca.

ABSTRACT

The application of dry covers in coal tailings is an engineering alternative for the prevention and control of acid mine drainage (AMD). These materials contain pyrite that oxidizes when exposed to air and water, creating an acid effluent that pollutes the environment. The dry covers act as a barrier to oxygen and water to get into the tailing, thereby inhibiting the AMD to generate. Numerical modeling of the water balance is an important tool in understanding the variation of the water volumes in tailing-cover systems. This paper presents results of numerical modeling of water balance models that reproduced experimental models in a pilot plant designed and operated by CETEM in Forquilha (SC). The numerical modeling was performed by 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 that have been projected as compacted layers, obtaining reduced volumes of seepage into the tailing. Experimental data obtained on seepage in a pilot plant showed good agreement with the numerical results generated. The numerical modeling provided water balance portions and has proven useful in predicting the behavior of water in tailing-covers in mining tailings deposits.

Keywords

water balance, coal tailing, dry cover.

1 | INTRODUÇÃO

A bacia carbonífera do Estado de Santa Catarina, abrange áreas sob a jurisdição de nove municípios do sul do Estado e três bacias hidrográficas e produz, aproximadamente, 3,5 milhões de toneladas/ano de carvão mineral. 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).

Os rejeitos da mineração de carvão produzidos nesta bacia em mais de 120 anos de extração ainda causam impactos ambientais em 24 municípios, prejudicando uma população estimada em cerca de 650 mil pessoas. O agravamento da questão, do ponto de vista ambiental, ocorreu na década de 70, quando houve um aumento significativo da produção do carvão na região. Atualmente, cerca de uma dezena de empresas atuam na bacia carbonífera e há também áreas inativas decorrentes da desativação de algumas companhias, cujos rejeitos de carvão, expostos ao ar e à água, causam impactos ambientais, principalmente devido à geração de drenagem ácida de mina (DAM). A área impactada, ao longo desses anos, atingiu cerca de seis mil hectares e, até o final de 2014, pouco mais de dois mil hectares foram recuperados.

Na busca de alternativas para prevenção/control 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 alli.*, 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 instalada na Mina Verdinho da CCSA, no município de Forquilha – SC, situada nas coordenadas 28°47' de latitude sul e 49°26' de longitude oeste.

Cobertura seca é uma técnica de prevenção e controle da drenagem ácida que objetiva minimizar a entrada de água e de oxigênio na pilha de rejeito. As coberturas podem ser simples ou complexas, variando de uma única a várias camadas, com diferentes materiais, incluindo solos, rejeitos não reativos, geossintéticos e materiais para consumo de oxigênio. O número de camadas e a espessura são baseados em critérios de engenharia. O desempenho de cada cobertura seca projetada depende dos materiais utilizados e das condições climáticas do local.

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.

Esta publicação apresenta as modelagens numéricas do balanço hídrico de quatro modelos experimentais da Estação Experimental Juliano Peres Barbosa (EEJPB). 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 alli. 2006; AYRES *et alli.* 2002; ADSU-WUSU e YANFUL, 2006). No Brasil, entretanto, há uma carência de dados experimentais de coberturas secas aplicadas em rejeitos de mineração de carvão (qualidade do efluente, volumes de percolação de efluente, evaporação real, saturação de camadas etc).

O uso de modelagem numérica auxilia na previsão do comportamento do fluxo de água e balanço hídrico de rejeitos com coberturas secas. Os resultados dessas modelagens permitem avaliar a eficiência de cada tipo de cobertura. A confiabilidade da modelagem é condicionada, principalmente, à qualidade dos parâmetros de entrada, que devem ser representativos das condições reais dos materiais de campo. Nesta publicação são reproduzidos, por modelagem numérica, duas configurações de modelos experimentais com cobertura seca e duas configurações, sem cobertura contendo somente rejeitos. Com a utilização da modelagem numérica foi possível obter as parcelas de balanço hídrico e perfis e contornos de saturação, umidade volumétrica e sucção. Nesta publicação 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 | ASPECTOS TEÓRICOS

O balanço hídrico de um sistema é baseado na lei da conservação de massas e representa a soma de todas as quantidades de água adicionadas, subtraídas e retidas em um dado volume de solo durante um determinado período de tempo (HILLEL, 2003). Em outras palavras, é a quantidade de água que entra e que sai em um determinado volume de solo. Cada uma das quatro células da estação experimental representa um sistema isolado, cujo balanço hídrico pode ser determinado individualmente. As parcelas que compõem o balanço hídrico são: precipitação, evaporação, transpiração, água armazenada no sistema, escoamento superficial (água que não se infiltra no material poroso durante o evento de precipitação) e percolação (água que escoar através do material poroso). As parcelas de evaporação e transpiração podem ser agregadas em uma componente chamada de evapotranspiração. Pode-se determinar o balanço hídrico através da seguinte equação (Equação 1):

$$P_c - P_e = \Delta w + (E_s + Evt) \quad [1]$$

onde: P_c = precipitação, E_s = escoamento superficial, Evt = evapotranspiração, Δw = água armazenada no sistema e P_e = percolação.

2.1 | Precipitação

Precipitação é toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre (TUCCI, 2007). A chuva é a mais importante das precipitações, pois tem a capacidade de produzir escoamento ao contrário de demais tipos (neblina, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve). As características

importantes da chuva são: a quantidade total da chuva, a duração e a distribuição temporal e espacial. As grandezas que caracterizam a chuva são: (a) altura pluviométrica: espessura média da lâmina, admitindo que a água não infiltre, escoe ou evapore, sendo expressa geralmente em mm (1mm é a quantidade de precipitação correspondente a um volume de 1 litro por metro quadrado de superfície); (b) duração: período de tempo que a chuva cai; e (c) intensidade: precipitação por unidade do tempo, dada pela razão entre a altura pluviométrica e a duração, geralmente expressa em mm/h ou mm/min.

2.2 | Escoamento Superficial

O escoamento superficial ou *runoff* é a parcela da água da chuva não absorvida pelo solo e que não acumula na superfície, escoando lateralmente (HILLEL, 1971). Isto só ocorre quando a intensidade de chuva excede a taxa de infiltração do solo.

2.3 | Infiltração e Fluxo de Água

Os hidrólogos usam o termo infiltração para se referir à porção da chuva que não é diretamente interceptada pela vegetação superficial, coletada em barragens ou transportada diretamente para os riachos como água de escoamento. Na literatura concernente às drenagens ácidas de mina (DAM), o termo infiltração também se refere ao processo pelo qual a água penetra na superfície de uma pilha.

Na Figura 1 podemos observar a distinção entre infiltração e percolação, sendo que esta última refere-se somente à porção de água que penetra por todo o corpo da pilha, atingindo inclusive o lençol freático.

Consequentemente, esta porção de água não é perdida pela evapotranspiração.

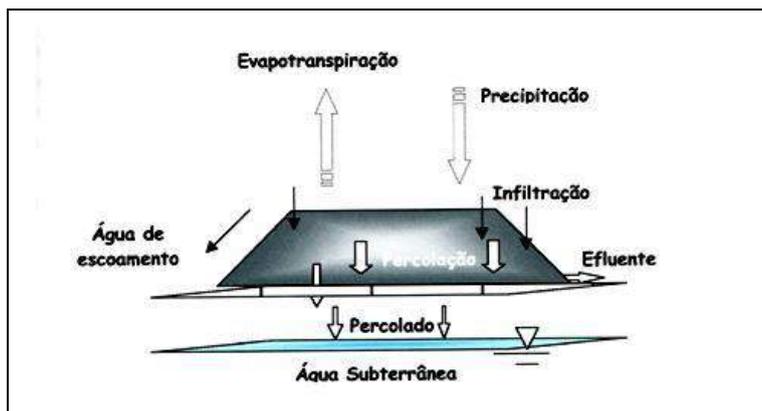


Figura 1. Esquema simplificado do ciclo hidrológico típico para uma pilha de rejeito.

A maioria dos autores não leva em consideração este pormenor e usa o termo infiltração no sentido genérico. O conhecimento dos fluxos de água infiltrados e percolados está diretamente ligado à questão das coberturas secas. Para este tipo de cobertura são utilizados materiais com diferentes coeficientes hidráulicos, justamente para evitar a penetração das águas da chuva para o interior das pilhas, contribuindo com isso para o abatimento das drenagens. O fluxo da água percolada através do corpo de uma pilha pode se processar por três vias distintas:

- fluxo uniforme não saturado;
- canais preferenciais acima da linha d'água; e
- fluxo saturado abaixo da linha d'água.

Nas pilhas de estéril ou de rejeito, em que as reações de oxidação dos sulfetos geram suficiente calor, a evaporação e o movimento da água sob a forma de vapor também podem ser de grande importância.

A percolação refere-se ao movimento da água no solo (ou material poroso). Adotam-se duas hipóteses básicas: (1) a estrutura do solo é rígida (não sofre deformações e não há carreamento de partículas durante o fluxo); e (2) é válida a Lei de Darcy (há uma proporcionalidade entre o gradiente hidráulico e a velocidade de fluxo). A percolação da água em um sistema do tipo rejeito-cobertura geralmente se dá em condições em que as camadas do sistema, ou pelo menos a maioria delas, não estão completamente saturadas. Neste caso, o fluxo de água é não saturado e a pressão que a água exerce sobre os materiais porosos é denominada sucção, que é uma pressão abaixo da atmosférica (negativa). É de fundamental importância o conhecimento do movimento do fluxo de água/solução ácida no interior de um corpo mineral, seja em uma pilha de lixiviação ou em pilha de estéril/resíduo ou mesmo em um lisímetro, uma vez que as reações geoquímicas estão intimamente ligadas ao fluxo. O ideal é o acoplamento do modelo geoquímico com o modelo de fluxo.

O escoamento da água em pilhas de estéril, em função da ampla variação espacial e temporal da granulometria, porosidade e saturação em água, cria um complexo padrão de drenagem com comportamento de difícil medição, interpretação

e previsão (FALA *et al.* 2005; NEWMAN *et al.* 1997, *apud* FRANKLIN, 2007). Há que se considerar, no entanto, que na última década vários esforços têm sido feitos, tanto pelo setor produtivo, quanto pela academia, para esclarecer os processos físicos e geoquímicos que ocorrem em pilhas de estéril/rejeito. Outro aspecto sobre o fluxo de água em pilhas de estéril que vem sendo muito estudado, diz respeito aos mecanismos de transporte do oxigênio gasoso (difusão e advecção), que são fortemente dependentes do grau de saturação e influem na oxidação dos sulfetos.

Diversas pesquisas têm sido realizadas no sentido de desenvolver modelos conceituais para descrever os processos de oxidação e transporte em pilhas de rejeito contendo sulfetos minerais. Gradientes térmicos que se desenvolvem a partir das reações exotérmicas de oxidação dos sulfetos podem adicionar complexidade ao sistema, induzindo fluxos convectivos de gás e vapor d'água, que podem ocasionar a evaporação e condensação local (LEFEBVRE *et alli.* 2001).

A sucção refere-se ao estado de energia livre da água no solo ou material poroso. O conhecimento do valor de sucção permite determinar a carga hidráulica total. Quando ocorre uma diferença de carga hidráulica entre dois pontos há fluxo de água entre eles (cujo sentido é do ponto de maior para o de menor carga hidráulica). Quando o solo está em um estado não saturado, os vazios estão preenchidos por água e ar. À medida que o material poroso seca, maior é o valor da sucção. Quando o solo está saturado, todos os vazios estão preenchidos por água e o valor da sucção é zero. Neste caso atua a poro-pressão ou pressão neutra (positiva).

Além da sucção, é necessário conhecer as umidades das camadas. A umidade permite estimar a quantidade de água que fica armazenada no decorrer do tempo, assim como o grau de saturação. A entrada do oxigênio através de uma camada é inversamente proporcional ao seu grau de saturação. Se a camada estiver saturada ou com um grau de saturação superior a 85%, o coeficiente de difusão do oxigênio é reduzido em várias ordens de grandeza (YANFUL, 1993). A minimização do ingresso do oxigênio para as camadas de rejeito, pela saturação de camadas superiores, auxilia na redução de geração de DAM.

2.4 | Armazenamento de Água nas Camadas

O armazenamento de água nas camadas (rejeitos, solo, materiais de cobertura) refere-se a uma variação de massa em um sistema fechado. Neste caso é devido à variação do volume da água na unidade do tempo. É possível determinar a quantidade de água armazenada na camada pelo conhecimento da umidade na mesma. O teor de umidade na camada pode ser definido em termos de umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou grau de saturação. A umidade gravimétrica (ω) é definida pela razão entre o peso da água e o peso da camada seca. O teor de umidade volumétrico (θ) é definido como a razão entre o volume de água e o volume da camada. Definições de umidade a base de peso ou volume de água não são muito convenientes, sendo que a água armazenada na camada é medida através de uma “altura de água” (REICHARDT, 1987).

A definição exata do armazenamento de água (A_L) em uma camada de solo de espessura L é (REICHARDT, 1987):

$$A_L = \int_0^L \theta dz. \quad [2]$$

onde: θ = a umidade volumétrica do solo e z = a coordenada vertical ou profundidade.

Para resolver a (Equação 2) é necessário conhecer a variação de θ em função de z . Na prática, a (Equação 2) pode ser simplificada, considerando um valor médio de umidade volumétrica (em mm), de 0 a L , conforme (Equação 3):

$$A_L = \bar{\theta} \cdot L. \quad [3]$$

2.5 | Evaporização

Evaporação é definida como a passagem de água do estado líquido para o estado de vapor, necessitando de aproximadamente 585cal/cm^3 de água evaporada a temperatura de 20°C . Nota-se que a evaporação depende da energia disponível para o processo. É um fluxo geralmente medido em mm/dia. O potencial total da água na atmosfera é geralmente bem menor do que no solo, resultando um gradiente contínuo que provoca o aparecimento de um fluxo (evaporação) no sentido solo-atmosfera (REICHARDT, 1987). Em um solo sem vegetação, inicialmente saturado e submetido a uma série de dias ensolarados, REICHARDT (1987) definiu três fases de variação da umidade do solo:

Fase 1: todo o perfil de solo encontra-se úmido (condutividade hidráulica do solo máxima) e quem comanda a evaporação é o potencial de água na atmosfera, a radiação solar e o vento. A água é conduzida quase igualmente através das profundidades para a superfície evaporante;

Fase 2: a condutividade hidráulica do solo já é um fator limitante e o fluxo evaporante quase cessa nos primeiros centímetros do solo. As perdas de água são menores e preferencialmente nas camadas superiores; e

Fase 3: o fluxo de evaporação cessa na superfície devido à baixa condutividade hidráulica nos primeiros centímetros do solo. As perdas de água são bem menores e, praticamente, se limitam à superfície.

Os métodos mais comuns para prognosticar a evaporação calculam a evaporação potencial ou evaporação de referência. A evaporação potencial é a máxima taxa de evaporação que pode ocorrer na superfície, assumindo que a água esteja sempre disponível. A evaporação real será igual à evaporação potencial somente quando a superfície do solo estiver em uma condição próxima da saturação. À medida que a superfície do solo seca, a evaporação real diminui a valores menores que a evaporação potencial. Assim, métodos que prognosticam a evaporação potencial tendem a superestimar o valor da evaporação. WILSON (1990) modificou o método de PENMAN (1948) que calcula a evaporação potencial de superfícies saturadas. O método de PENMAN (1948) fornece uma boa concordância com dados experimentais de evaporação de superfícies de água tais como reservatórios e lagos. O método de Penman-Wilson (WILSON, 1990) permite calcular a evaporação real na superfície de solos não saturados (com ou

sem cobertura vegetal), empregando uma solução numérica (por elementos finitos) para equações não lineares que consideram mecanismos de transferência de massa e de calor na superfície do solo. Este método estima o fluxo evaporativo real com base na pressão de vapor real na superfície do solo e do acoplamento de processos de transferência de calor e massa no contorno solo-atmosfera. A solução não é trivial e necessita utilizar um método numérico para resolução baseados em elementos finitos.

3 | MODELAGEM NUMÉRICA

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, o qual 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 alli.* 1994). No presente trabalho são apresentadas as modelagens numéricas do fluxo de água e o balanço hídrico das quatro células reproduzidas na Estação Experimental Juliano Peres Barbosa, cuja vista geral é apresentada na Figura 2 (BORGHETTI SOARES *et alli.* 2009; 2010; SOUZA *et alli.* 2009).



Figura 2. Vista geral da EEJPB.

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, conforme mostrado na Figura 3. Como observado, todos os modelos possuem, praticamente, o mesmo volume de rejeitos, 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 de geração de 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 8,0m. A dimensão do topo, definida na modelagem numérica, é um pouco maior que a apresentada na Figura 3 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 30cm de espessura e espaçamento horizontal de 50cm (no topo dos rejeitos).

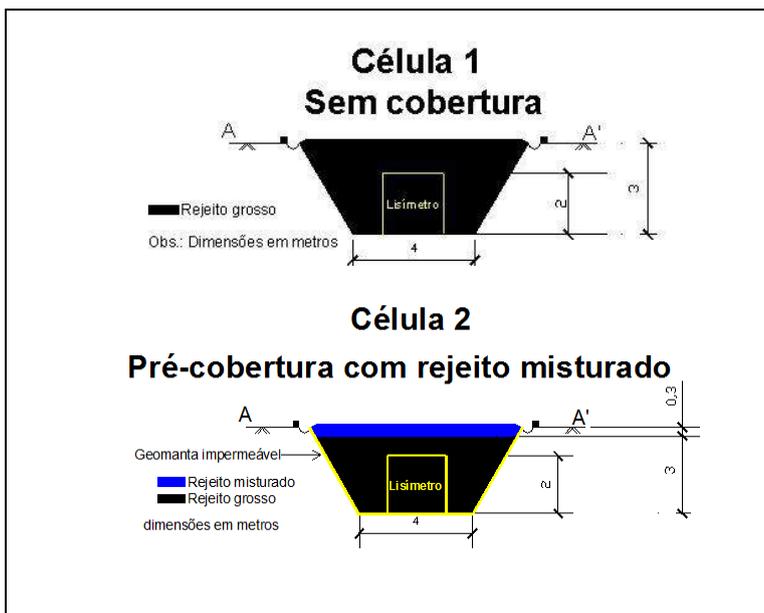


Figura 3a. Modelos experimentais com e sem cobertura seca.

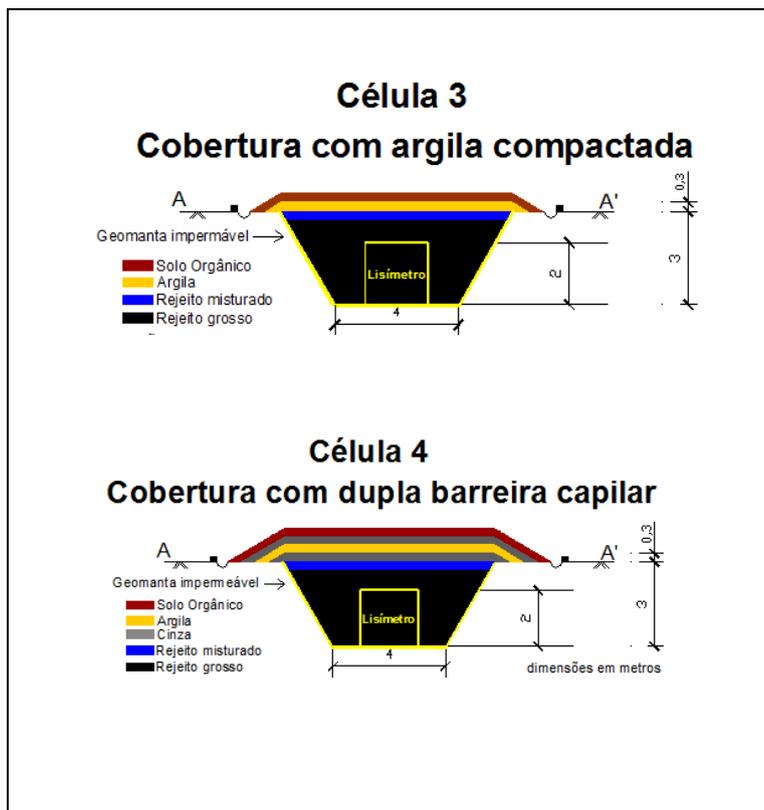


Figura 3b. Modelos experimentais com e sem cobertura seca.

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 4, 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.

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 4 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 como precipitação, umidade relativa do ar, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento. Estes dados foram obtidos a partir de uma estação meteorológica instalada em campo no local do experimento.

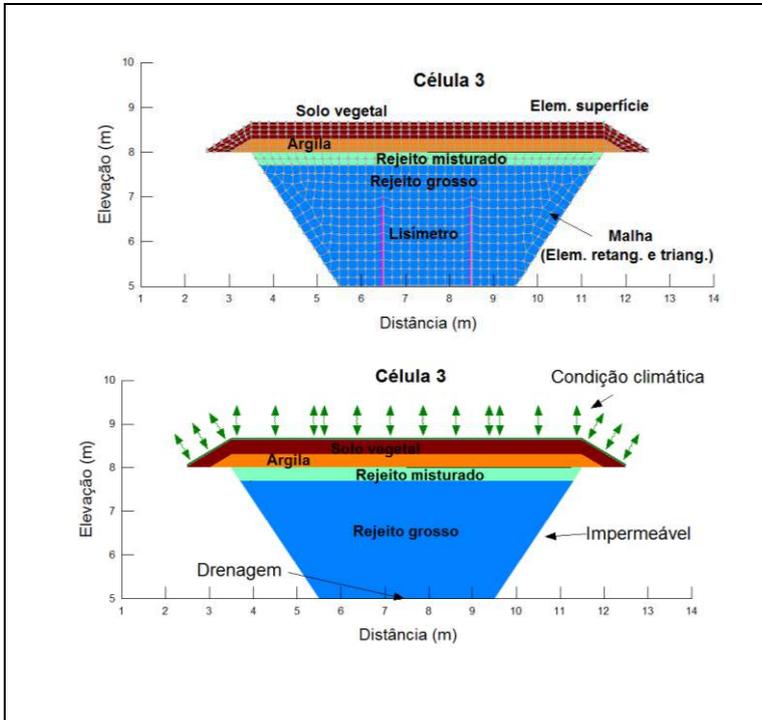


Figura 4. Malha e condições de contorno da análise transiente (célula 3).

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 compactados 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 realizado 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 5 apresenta 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 alli.* 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 100kPa), 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

decrece 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, e foram obtidas pelo método de VAN GENUCHTEN (1980) a partir da curva de retenção (Figura 5).

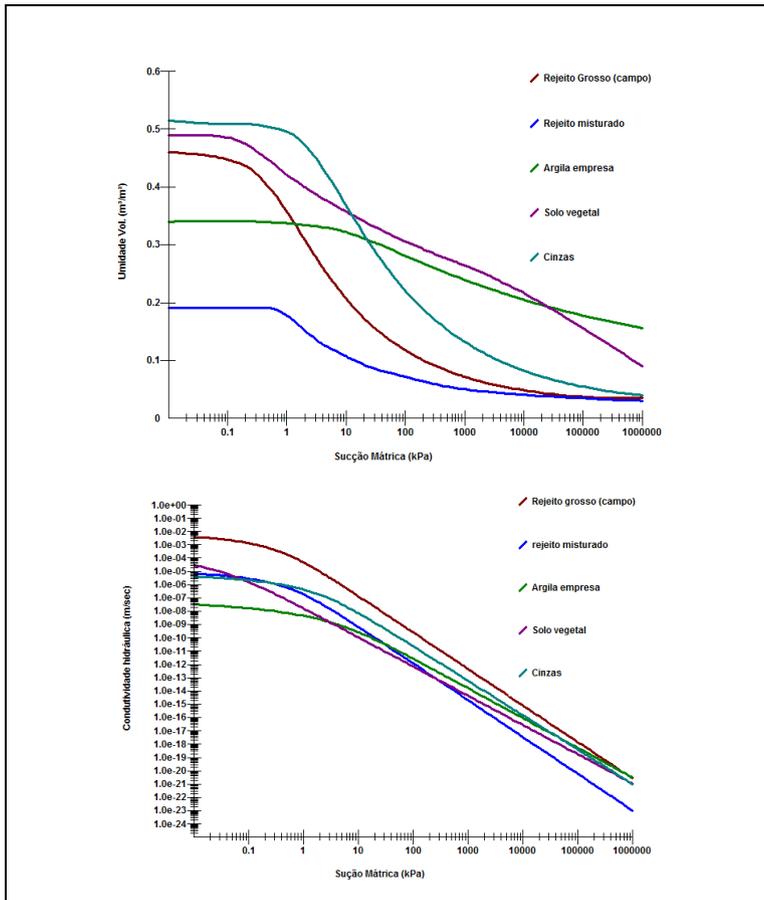


Figura 5. Curvas de retenção e condutividade não saturada dos materiais das modelagens.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

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 6 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 daquele 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 6 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 ($S = 1$).

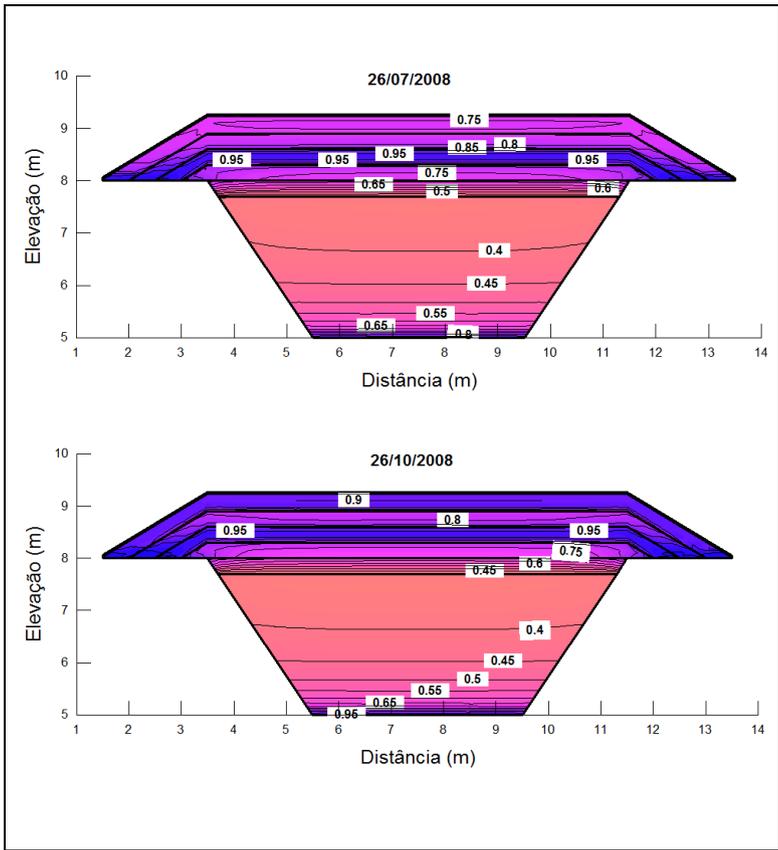


Figura 6. Contornos de saturação na célula 4 (0 = seco, 1 = saturado).

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 milímetros. Os volumes percolados e acumulados no ano de 2008, dados pelas modelagens numéricas, são apresentados na Figura 7.

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 em relação ao percolado na célula 1. 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.

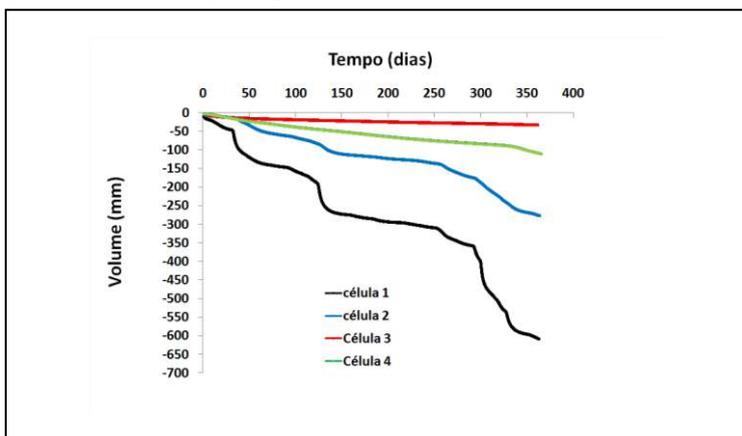


Figura 7. Volume acumulado percolado nas células (2008).

A Figura 8 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 585mm. 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 729mm. 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.

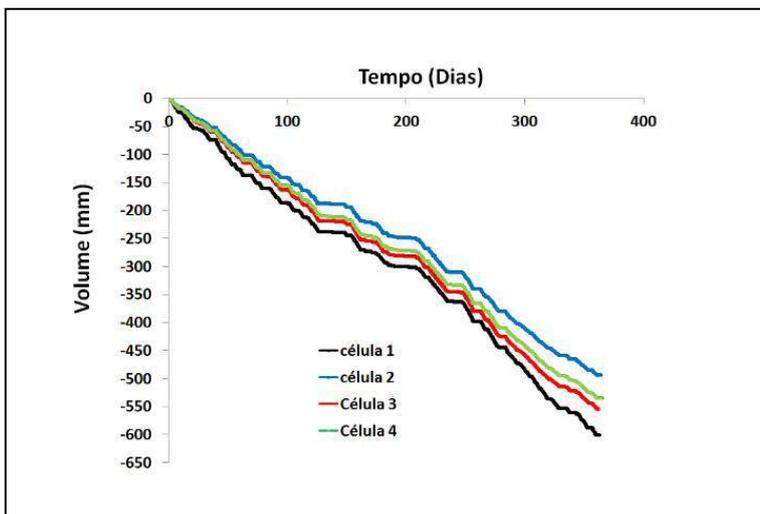


Figura 8. Evaporação real acumulada nas células (2008).

A variação do volume acumulado do escoamento superficial das células experimentais é apresentada na Figura 9. A célula 3 apresentou o maior volume acumulado de escoamento superficial, de 851mm, com um coeficiente de *runoff* (razão entre o volume escoado por *runoff* e o volume total precipitado), de 0,60. A célula 1 apresentou o menor volume acumulado de escoamento superficial, que foi de 224mm (coeficiente de *runoff* igual a 0,16). Os volumes escoados superficialmente nas células 2 e 4 foram, respectivamente, de 585mm (coeficiente de *runoff* igual a 0,41) e de 776mm (coeficiente de *runoff* igual a 0,55).

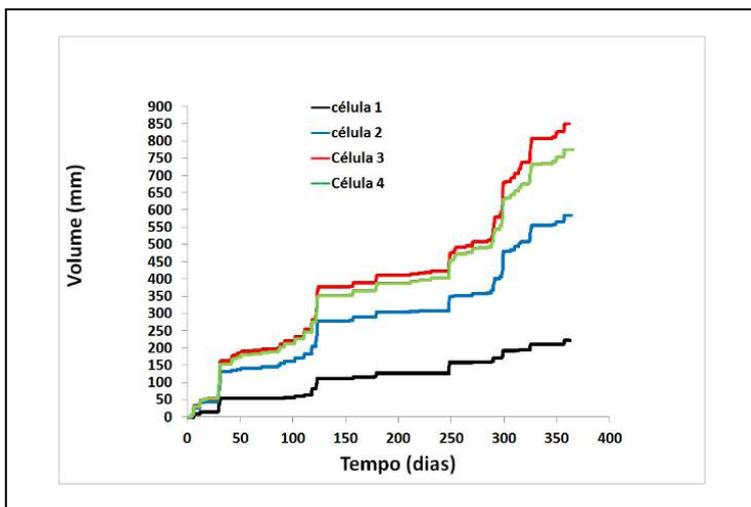


Figura 9. Volume acumulado do escoamento superficial das células (2008).

A Figura 10 apresenta a variação anual de massa de água obtida pela modelagem numérica. Pode-se observar que a variação da massa de água é pequena em relação às outras parcelas do balanço hídrico e tende a valores próximos do valor inicial. A célula 1, que está mais “desprotegida”, apresentou as maiores variações anuais de umidade durante o ano de 2008 e a aplicação de camadas de cobertura acarretou uma redução destas variações.

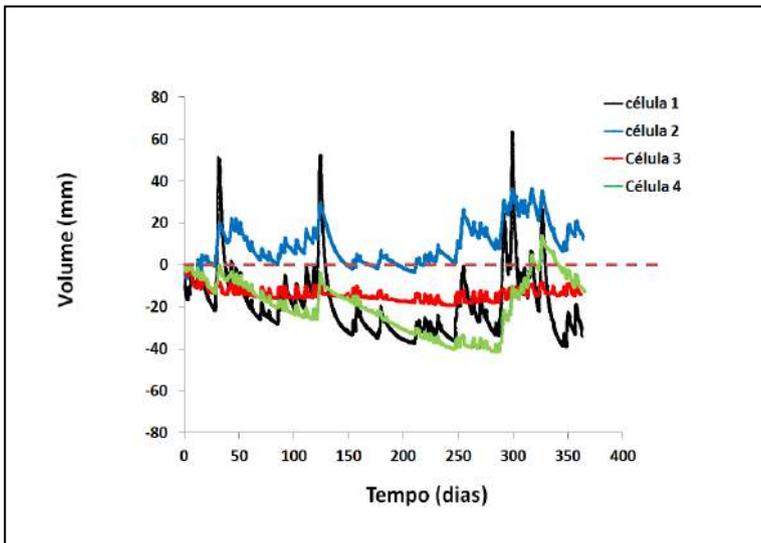


Figura 10. Volumes armazenados nas células (2008).

A Tabela 1 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 milímetros 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 1. 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

5 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados obtidos na modelagem numérica de quatro células experimentais reproduzidas em campo na Estação Experimental Juliano Peres Barbosa. 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 construídos em campo com uma espessura de 30cm dispostas sobre uma camada de 3m de rejeito grosso. O programa utilizado foi o Vadose 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 englobaram contornos e perfis de poro-pressão/sucção, de teor de umidade volumétrica e de 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 em relação ao percolado na célula 1. A camada de argila da célula 4 apresentou teores de umidade mais elevados que os da argila da célula 3 e, conseqüentemente, uma maior condutividade hidráulica.

Elevados graus de saturação na camada argilosa acarretaram a redução da entrada do oxigênio para o interior do rejeito. 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 585mm. Os dados obtidos nas modelagens numéricas são coerentes com os dados experimentais de evaporação potencial medidos na EEJPB para o ano de 2011 obtidos em um tanque de evaporação, que indicaram um valor superior a 700mm. 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.

6 | 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 financeiro e de infraestrutura na realização deste trabalho bem como à Tractebel Energia pela disponibilização das cinzas de fundo para realização dos estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, vol. 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 vol. 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 vol. 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.
- FRANKLIN, M.R. Modelagem numérica do escoamento hidrológico e dos processos geoquímicos aplicados à previsão da drenagem ácida em uma pilha de estéril da mina de urânio de Poços de Caldas – MG – Tese submetida à COPPE/ UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em ciências em engenharia civil, Rio de Janeiro, 2007.

- GEOSTUDIO. VADOSE/W. Vadose zone and soil cover analysis. user's guide. Third Edition, GEO-SLOPE International Ltd., Canada. Third edition, 2007.
- HILLEL, D. Soil and water: physical principles and processes. New York and London, Academic Press, INC, 1971.
- HILLEL, D. Introduction to environment soil and physical. First Edition, 2003.
- LEFEBVRE, R.; HOCKLEY, D.; SMOLENSKY, J. e GELINAS, P. Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage:1: Conceptual model and system characterization. Journal of Contaminant Hydrology, vol.52, nº 1-4, pp. 137-164, 2001.
- MEND. Dry Covers. Mend Manual 5.4.2d. In: Prevention and Control. In: Tremblay GA, Hogan CM (eds), vol. 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.
- PENMAN, H.L. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London Ser. A. 193, pp. 120-145, 1948.
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. Editora Manole. 188p., 1987.
- 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. Formação de barreira geoquímica para o abatimento de drenagens ácidas de pilha de estéril piritoso. Tese apresentada ao Depto. Eng. Minas, Universidade de São Paulo como pré requisito para obtenção do grau de doutor. São Paulo, 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. Proc, 23rd ENTMMME, Gramado, RS, Brasil, vol. 2, p. 515-523, 2009.
- TUCCI, C.E.M. Hidrologia. Ciência e aplicação. Cap. V, Precipitação, Bertoni, J.C. e Tucci, C.E.M. 4^o Ed. Editora UFRGS. 943p., 2007.
- VAN GENUCHTEN, MTh. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Am. Journal, vol. 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.
- WILSON G.W. Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems. Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, 1990.
- WILSON, G.W., FREDULUND, D.G., BARBOUR, S.L. Coupled soil-atmosphere modeling for soil evaporation. Canadian Geotechnical Journal, vol. 31: p. 151-161, 1994.
- YANFUL, E. K. Oxygen diffusion through soil cover on sulfidic mill waste. ASCE J. Geotech. Eng., 199, n^o 8, pp. 1207-1228, 1993.

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 2014, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 280 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-79 - **Desativação de Minas**. Adão Benvindo da Luz e João Alves Sampaio, 2015.

STA-78 - **Parâmetros Físico-Químicos e Geoquímicos na Mitigação de Drenagem Ácida de Mina Utilizando Método de Cobertura Seca: Estudos em escala piloto**. Vicente Paulo de Souza, Mario Valente Possa, Anderson Borghetti Soares e Paulo Sérgio Moreira Soares, 2014.

STA-77 - **Uso de Espumas na Remediação de Solos Contaminados por Hidrocarbonetos e Metais Pesados: Uma revisão**. Regina Coeli Casseres Carrisso, 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

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.



Missão Institucional

A missão do Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é desenvolver tecnologia para o uso sustentável dos recursos minerais brasileiros.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 22 laboratórios, 3 usinas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 37 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 720 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.