

XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE COBERTURA COM BARREIRA CAPILAR

Karla B. Souza

Christianne de L. Nogueira

karla.baeta@yahoo.com.br

chris@em.ufop.br

Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas
Campus Morro do Cruzeiro, 35400-000, Minas Gerais, MG, Brasil

Resumo. *O conhecimento da quantidade de água presente nas camadas de solo, e de como e quando ocorrem variações dessa quantidade, é importante sob o ponto de vista geotécnico, principalmente quando se trata de camadas de solo que compõem um sistema de cobertura. A medida dessa quantidade de água pode ser feita em termos do teor de umidade volumétrica, a qual afeta tanto a condutividade hidráulica quanto o potencial hidráulico, ou sucção, do meio poroso. Entende-se por sistema de cobertura um conjunto de camadas de solo, formando um perfil estratificado, com propriedades hidráulicas e espessuras definidas com o intuito de minimizar a disponibilidade de água e oxigênio nas camadas subjacentes. Os sistemas de cobertura têm sido amplamente utilizados na mineração, em pilhas de estéril e barragens de rejeitos, na prevenção da formação da drenagem ácida de mina. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de sistemas de cobertura com barreira capilar, através da modelagem numérica via método das diferenças finitas do processo de fluxo em meio não saturado. Os resultados das simulações numéricas ressaltam a importância da espessura da camada de barreira capilar e das taxas de infiltração no desempenho destas coberturas.*

Palavras chave: *Infiltração, Drenagem ácida de mina, Método da diferença finita, Sistemas de cobertura, Barreira capilar.*

1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração está presente no Brasil desde a época do seu descobrimento. A indústria da mineração é responsável pelo fornecimento de inúmeras matérias-primas que são indispensáveis ao desenvolvimento da qualidade de vida da humanidade em diversos setores da economia (alimentação, transporte, energia, construção civil, indústria automotiva e de eletroeletrônico). A atividade mineira tem uma grande expressão histórica e uma grande importância econômica para as nações. Entretanto, é também, uma atividade que gera muitos passivos negativos, alterando a paisagem e as condições ambientais.

O avanço tecnológico tem demandado uma crescente quantidade de matéria-prima e conseqüentemente tem gerado um grande desenvolvimento da indústria mineral. No entanto, para suprir toda a demanda de matéria-prima, as mineradoras aproveitam reservas cada vez mais pobres, ou seja, jazidas que contêm baixos teores de minério. Desta forma, a geração de resíduos (estéril e rejeito) está cada vez maior e a preocupação com aspectos relativos ao meio ambiente também tem crescido bastante. A disposição dos resíduos, em pilhas de estéril e em barragens de rejeito, deve ser feita de maneira responsável e segura, para que haja garantia de que as áreas ocupadas por essas estruturas estejam devidamente protegidas e que estas estruturas não representem risco algum de contaminação do meio ambiente.

Dentre os impactos ambientais causados pela mineração, sem dúvida destaca-se a drenagem ácida de mina (DAM). A DAM é caracterizada como sendo uma solução ácida gerada quando minerais sulfetados entram em contato com água e/ou oxigênio. Essa solução age como agente lixiviante, produzindo um percolado rico em ácido sulfúrico e metais pesados (Borma e Soares, 2002). Alcançando um manancial hídrico, esse percolado promove a sua contaminação, a qual não se restringe à área onde ocorreu a extração mineral, podendo atingir corpos hídricos superficiais e subterrâneos distantes do empreendimento e as reações químicas envolvidas no processo ocorrem por muitos anos, mesmo depois de cessadas as atividades (Duarte, 2012).

A técnica mais aplicada para prevenção de geração de DAM é a construção de sistemas de cobertura com solo. O termo sistema de cobertura é utilizado para caracterizar perfis de solos estratificados, com propriedades e espessuras definidas, que visam minimizar a infiltração de água e difusão de oxigênio para o interior da camada de resíduo. Entretanto, o uso dos sistemas de cobertura não está restrito às áreas onde possa ocorrer a DAM, ela é necessária, também, no fechamento das atividades mineiras e, ainda, no controle de erosão, controle de poeira e sustentação da vegetação (Duarte, 2012).

O dimensionamento dos sistemas de cobertura deve levar em conta diversos parâmetros, tais como: características dos materiais, espessura das camadas, precipitação, evaporação, dentre outros. Assim, é imprescindível que sejam feitas simulações de desempenho para diferentes configurações de sistemas de cobertura antes de sua implantação em campo. Neste trabalho faz-se um estudo numérico, com base no método das diferenças finitas, da influência da espessura da camada de barreira capilar e taxa de infiltração no processo de infiltração de água em um sistema de cobertura evapotranspirativo constituído por dois materiais (identificados como argila e silte) cujas curvas características são definidas pelo modelo constitutivo em fluxo van Genuchten (van Genuchten, 1980).

2 SISTEMA DE COBERTURA COM BARREIRA CAPILAR

As barreiras capilares são constituídas, na sua forma mais simplificada, de uma camada de material fino (tal como um solo argiloso), com alta capacidade de retenção de água, disposta sobre uma camada de material granular (tal como um solo arenoso, siltoso ou silte-arenoso), com pequena capacidade de retenção de água e com condutividade hidráulica em condições não saturadas muito menor que a condutividade hidráulica do material fino. A Figura 1 apresenta um perfil esquemático de um sistema de cobertura com barreira capilar bem como as curvas de condutividade hidráulica de cada material que o compõe. A camada de material mais grosseiro, portanto, é utilizada para que haja quebra da condutividade hidráulica, ou seja, uma diminuição da passagem de água, entre a camada de material fino e o interior do aterro sobre o qual o sistema de cobertura deverá ser disposto (Vieira, 2005).

A quebra da condutividade hidráulica ocorre quando a sucção mátrica na interface entre as camadas da cobertura ($\psi^I = -\gamma_w h_p^I$) supera o valor da sucção mátrica correspondente à sucção de quebra de barreira capilar ($\psi^{BC} = -\gamma_w h_p^{BC}$). É importante destacar que a sucção mátrica também pode ser avaliada em termos da carga hidráulica de pressão (h_p) para um dado valor de peso específico da água (γ_w).

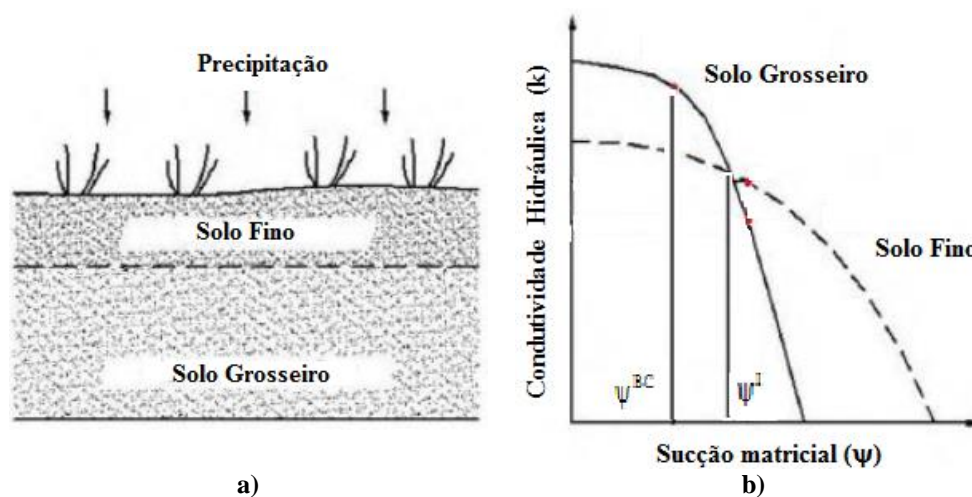


Figura 1. (a) Perfil esquemático de uma barreira capilar (b) Curvas de condutividade hidráulica (Adaptado de Abichou *et al.*, 2004)

Se o teor de umidade da camada de solo fino (camada superior da cobertura) aumentar demais, haverá a diminuição da sucção na interface entre as camadas, e eventualmente, para este nível de sucção, a condutividade hidráulica do solo grosso (camada inferior da cobertura) será maior do que a condutividade hidráulica do solo fino. A camada inferior, portanto, não conseguirá restringir a passagem de água promovendo assim um fluxo descendente que virá a alcançar o resíduo. Ocorrendo o que é chamado de “quebra de barreira capilar” tal como descrito por Amorim (2008).

De acordo com o Guia Global de Drenagem Ácida da Rede Internacional de Prevenção de Drenagem Ácida (GARD/INAP, 2015) o primeiro fator que determina o tipo de cobertura a ser projetada é o clima local. De modo geral, coberturas de armazenamento e liberação de água e barreira capilar são mais eficientes em climas áridos e semi-áridos, em que a taxa de evaporação excede a precipitação garantindo assim uma taxa de infiltração pequena.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NUM SISTEMA DE COBERTURA

A equação diferencial que governa o fluxo unidimensional em meio poroso homogêneo e não saturado é conhecida como equação de Richard (Freeze e Cherry, 1979). A Equação (1) representa essa equação escrita em termos da carga hidráulica de pressão, adotada neste trabalho, como variável primária (Nogueira et al., 2014; Souza et al. 2015).

$$k \left(\frac{dh_p}{dz} \right) \left(1 + \frac{dh_p}{dz} \right) + k \frac{d^2 h_p}{dz^2} = C \frac{dh_p}{dt} \quad (1)$$

em que k é a condutividade hidráulica do meio definida pela curva de condutividade hidráulica $k = k(h_p)$; k' indica a variação da condutividade hidráulica com a carga hidráulica de pressão; C é a capacidade de retenção de água definida pela tangente à curva de retenção $\theta = \theta(h_p)$ onde θ é o teor de umidade volumétrica. A capacidade de retenção de água indica a variação do teor de umidade volumétrica com a variação da carga hidráulica de pressão.

A solução da Eq. (1) deverá atender às condições de contorno que podem ser em carga de pressão prescrita (\bar{h}_p):

$$h_p(z_1, t) = \bar{h}_p \quad (2)$$

ou em fluxo prescrito (\bar{v})

$$\left(\frac{dh_p}{dz} \right)_{z=z_2} = -(\bar{v}/k + I) \quad (3)$$

onde z_1 e z_2 são as coordenadas da base ou do topo do sistema de cobertura. A Equação (1) deverá, ainda, atender à seguinte condição inicial:

$$h_p(z, 0) = \bar{h}_{p0}(z) \quad (4)$$

Como o sistema de cobertura envolve o fluxo em meio estratificado (Fig. 2), faz-se necessário a determinação da equação para o fluxo na interface entre os meios consecutivos. Assim, de acordo com a condição de continuidade, tem-se que:

$$\bar{v}_{meio1} = \bar{v}_{meio2} \quad (5)$$

em que \bar{v}_{meio2} corresponde à velocidade de fluxo na direção vertical na saída do meio 2 (camada superior) e \bar{v}_{meio1} corresponde à velocidade de fluxo vertical de entrada no meio 1 (camada inferior). Considerando o fluxo como sendo laminar, pode-se aplicar a lei de Darcy. Aplicando-se a lei de Darcy na Eq. (5), chega-se a:

$$\left[k \left(1 + \frac{dh_p}{dz} \right) \right]_1 = \left[k \left(1 + \frac{dh_p}{dz} \right) \right]_2 \quad (6)$$

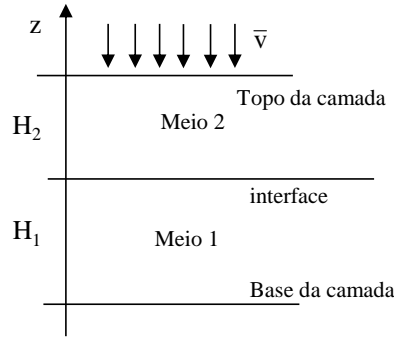


Figura 2. Idealização do problema físico - meio estratificado (Souza, 2015)

Além das condições de contorno, condição inicial e condição de fluxo na interface entre as camadas, é necessário, ainda, para solução da Eq. (1), a definição das curvas características dos meios porosos (curva de retenção e curva de condutividade hidráulica). Essas curvas são obtidas em laboratório e podem ser representada por equações analíticas, tal como as propostas por van Genuchten (1980), que serão usadas neste trabalho.

Assim, de acordo com o modelo de van Genuchten, a curva de retenção de água pode ser escrita em termos da carga hidráulica de pressão (h_p) como:

$$\theta(h_p) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \theta_e \quad (7)$$

onde

$$\theta_e = \theta_n^{-m} \quad (8)$$

e

$$\theta_n = 1 + |\alpha h_p|^n \quad (9)$$

em que θ_r é o teor de umidade volumétrica na condição residual; θ_s é o teor de umidade volumétrica na condição saturada (que é igual à porosidade, n , do meio); α é um parâmetro ajustado de acordo com o solo; n é um parâmetro relacionado com a inclinação da curva de retenção de água do solo; e , $m = 1 - 1/n$. A capacidade de retenção deste modelo é dada por:

$$C(h_p) = (\theta_s - \theta_r) \frac{d\theta_e}{d\theta_n} \frac{d\theta_n}{dh_p} \quad (10)$$

em que

$$\frac{d\theta_e}{d\theta_n} = -m\theta_n^{-m-1} \quad (11)$$

$$\frac{d\theta_n}{dh_p} = \alpha n |\alpha h_p|^{n-1} \quad (12)$$

A função de condutividade hidráulica, por sua vez, é definida através da seguinte equação:

$$k(h_p) = k_s (\theta_e)^{0.5} (\theta_m)^2 \quad (13)$$

onde

$$\theta_m = 1 - \left[1 - \theta_e^{(1/m)} \right]^m \quad (14)$$

A variação da permeabilidade com a carga de pressão pode ser obtida fazendo:

$$k'(h_p) = k_s \left\{ 0.5(\theta_e)^{-0.5} (\theta_m)^2 + 2(\theta_e)^{0.5} \theta_m \frac{d\theta_m}{d\theta_e} \right\} \frac{d\theta_e}{d\theta_n} \frac{d\theta_n}{dh_p} \quad (15)$$

em que

$$\frac{d\theta_m}{d\theta_e} = \theta_e^{(1/m-1)} \left[1 - \theta_e^{(1/m)} \right]^{m-1} \quad (16)$$

4 FORMULAÇÃO VIA MDF DO PROBLEMA

A solução da equação de governo do fluxo unidimensional em meio poroso homogêneo e não saturado, Eq. (1), envolve uma integração no espaço e no tempo. Além disto, este problema apresenta uma não linearidade constitutiva em virtude da variação dos parâmetros hidráulicos com o nível de saturação ou de carga hidráulica de pressão. Assim sendo, torna-se necessário o uso de algum método numérico, tal como o método das diferenças finitas (MDF), que é o método numérico adotado nesse trabalho, para a obtenção de soluções aproximadas. O MDF tem como princípio a transformação de equações diferenciais em um sistema de equações algébricas, as quais serão aplicadas a pontos discretos do domínio do problema, pontos nodais, conforme mostra a Fig. 3.

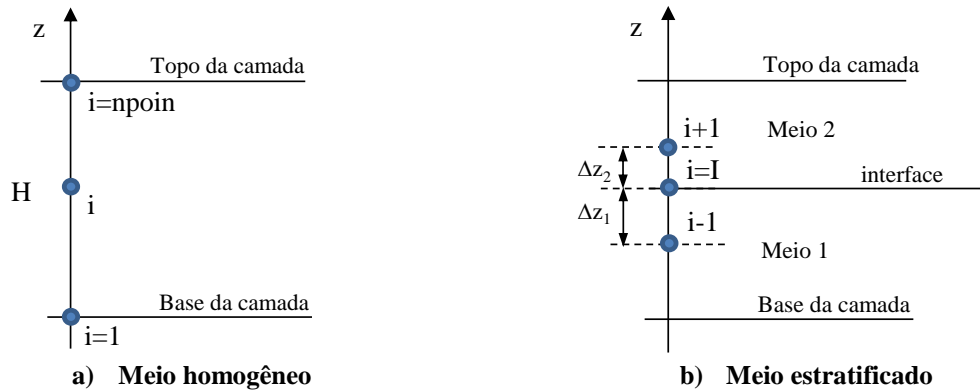


Figura 3. Discretização em diferenças finitas (Nogueira et al, 2014)

Adotando uma aproximação em diferença central (Nogueira et al., 2014; Souza et al., 2015), pode-se escrever a equação diferencial, Eq. (1), na forma discreta, num ponto genérico i de uma malha de diferenças finitas (Fig. 3) no interior de uma dada camada de solo, tal como:

$$A_1^1 h_{p_{i-1,j+1}} + A_2^1 h_{p_{i,j+1}} + A_3^1 h_{p_{i+1,j+1}} = A_1^0 h_{p_{i-1,j}} + A_2^0 h_{p_{i,j}} + A_3^0 h_{p_{i+1,j}} + C_1 \quad (17)$$

em que

$$A_1^1 = \beta \Delta t (2k - k'h_p \Delta z) \quad (18a)$$

$$A_2^1 = -4\beta k \Delta t - 2C \Delta z^2 \quad (18b)$$

$$A_3^1 = \beta \Delta t (2k + k'h'_p \Delta z) \quad (18c)$$

$$A_1^0 = -(1-\beta) \Delta t (2k - k'h'_p \Delta z) \quad (18d)$$

$$A_2^0 = (1-\beta) \Delta t 4k - 2C \Delta z^2 \quad (18e)$$

$$A_3^0 = -(1-\beta) \Delta t (2k + k'h'_p \Delta z) \quad (18f)$$

$$C_I = -2k'h'_p \Delta z^2 \Delta t \quad (18g)$$

em que o índice sobrescrito 0 refere-se a um instante de tempo (t) e 1 refere-se a um instante de tempo (t+Δt), Δz é a discretização espacial, Δt equivale ao incremento de tempo e β é uma constante que define o tipo de marcha no tempo adotada, de tal forma que para β=0 tem-se um algoritmo explícito, para β=1 tem-se um algoritmo puramente implícito e para β=0.5 tem-se o algoritmo implícito de Crank-Nicholson.

Quando se trata de problemas de fluxo em meios estratificados, a equação para o ponto da interface i=I entre meios consecutivos, é definida, com base no MDF, via aproximação em avanço e em atraso para as derivadas da Eq. (6) (Nogueira et al., 2014; Souza et al., 2015), obtendo-se:

$$A_{I1}^1 h_{p_{i-1}} + A_{I2}^1 h_{p_i} + A_{I3}^1 h_{p_{i+1}} = C_{II} + A_{I1}^0 h_{p_{i-1}} + A_{I2}^0 h_{p_i} + A_{I3}^0 h_{p_{i+1}} \quad (19)$$

em que:

$$A_{I1}^1 = \beta k_1 \Delta z_2 \quad (20a)$$

$$A_{I2}^1 = -\beta (k_1 \Delta z_2 + k_2 \Delta z_1) \quad (20b)$$

$$A_{I3}^1 = k_2 \beta \Delta z_1 \quad (20c)$$

$$A_{I1}^0 = -(1-\beta) (k_1 \Delta z_2) \quad (20d)$$

$$A_{I2}^0 = (1-\beta) (k_2 \Delta z_1 + k_1 \Delta z_2) \quad (20e)$$

$$A_{I3}^0 = -(1-\beta) k_2 \Delta z_1 \quad (20f)$$

$$C_{II} = (k_1 - k_2) \Delta z_1 \Delta z_2 \quad (20g)$$

Uma vez definidas as equações que serão utilizadas no interior das camadas, Eq. (17), e na interface entre as camadas, Eq. (19), devem-se definir agora as equações a serem utilizadas no contorno do problema. Essa equação irá depender do tipo de condição de contorno, podendo esta ser essencial (carga de pressão prescrita) ou natural (fluxo prescrita).

A aproximação em diferenças finitas para o ponto do contorno situado na base (i=1) é obtida fazendo-se:

$$A_{CC1}^1 h_{p_i} + A_{CC2}^1 h_{p_{i+1}} = A_{CC1}^0 h_{p_i} + A_{CC2}^0 h_{p_{i+1}} + CC_{IB} \quad (21)$$

e para o ponto do contorno situado no topo (i=npoin), tem-se:

$$A_{CC1}^1 h_{p_i} + A_{CC2}^1 h_{p_{i-1}} = A_{CC1}^0 h_{p_i} + A_{CC2}^0 h_{p_{i-1}} + CC_{IT} \quad (22)$$

Quando a condição de contorno for do tipo essencial em carga hidráulica de pressão prescrita, têm-se as seguintes equações para cada um dos termos das Eq. (21) e (22):

$$A_{CC1}^I = I \quad (23a)$$

$$A_{CC2}^I = 0 \quad (23b)$$

$$A_{CC1}^0 = I \quad (23c)$$

$$A_{CC2}^0 = 0 \quad (23d)$$

$$CC_{IB} = \bar{h}_p^B \quad (23e)$$

$$CC_{IT} = \bar{h}_p^T \quad (23f)$$

No caso de uma condição de contorno natural em fluxo prescrito, têm-se as seguintes equações para cada um dos termos das Eq. (21) e (22):

$$A_{CC1}^I = -\beta\Delta t 4k - 2\Delta z^2 C \quad (24a)$$

$$A_{CC2}^I = \beta\Delta t 4k \quad (24b)$$

$$A_{CC1}^0 = (1-\beta)\Delta t 4k - 2\Delta z^2 C \quad (24c)$$

$$A_{CC2}^0 = -(1-\beta)\Delta t 4k \quad (24d)$$

$$CC_{IB} = 2\Delta t \Delta z [-k' h_p' \Delta z + (q/k + I)(k' h_p' \Delta z - 2k)] \quad (24e)$$

$$CC_{IT} = 2\Delta t \Delta z [-k' h_p' \Delta z + (q/k + I)(k' h_p' \Delta z + 2k)] \quad (24f)$$

Fazendo o arranjo global para todos os pontos nodais da malha, chega-se à seguinte equação matricial que representa a condição de continuidade de fluxo no meio poroso:

$$A^I h_p^I = A^0 h_p^0 + D \quad (25)$$

em que,

$$[h_p^0]^T = [h_{p1} \quad h_{p2} \quad \dots \quad h_{p_{npoin-1}} \quad h_{p_{npoin}}] \quad (26)$$

representa o vetor de carga hidráulica de pressão nodal no instante t no início de um incremento e,

$$[h_p^I]^T = [h_{p1} \quad h_{p2} \quad \dots \quad h_{p_{npoin-1}} \quad h_{p_{npoin}}] \quad (27)$$

representa o vetor de carga hidráulica de pressão nodal no instante t+Δt no final de um incremento;

$$A^1 = \begin{bmatrix} A_{CC1}^1 & A_{CC2}^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{II}^1 & A_{I2}^1 & A_{I3}^1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & A_{CC2}^1 & A_{CC1}^1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

e

$$A^0 = \begin{bmatrix} A_{CC1}^0 & A_{CC2}^0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{II}^0 & A_{I2}^0 & A_{I3}^0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & A_{CC2}^0 & A_{CC1}^0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

são matrizes tri-diagonais cujos coeficiente são avaliados nos instantes $t+\Delta t$ e t , respectivamente, no final e no início de um dado incremento de tempo Δt , e por fim,

$$D^T = [CC_{IB} \quad C_I \quad C_I \quad \cdots \quad C_{II} \quad \cdots \quad C_I \quad C_I \quad CC_{IT}] \quad (30)$$

é o vetor de termos independentes e das condições de contorno.

Devido à natureza não linear das curvas características é necessária a adoção de um procedimento iterativo para obtenção da solução da Eq. (25). Neste trabalho adota-se o método de Picard (Machado Jr., 2000; Souza, 2015).

5 ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE COBERTURA COM BARREIRA CAPILAR

A Figura 4 apresenta uma ilustração do sistema de cobertura que será avaliado neste trabalho. Este sistema é definido como evapotranspirativo com barreira capilar e é composto por duas camadas de solo, uma camada de argila sobreposta a uma camada de silte. A função da camada de material fino (argila) é armazenar água no período de chuvas e liberá-la, através da evapotranspiração, durante o período de estiagem, sendo, portanto, chamada de camada de armazenamento-e-liberação. Já a função da camada de material mais grosseiro (silte) é criar uma quebra da condutividade hidráulica tal que impeça a infiltração de água para as camadas subjacentes.

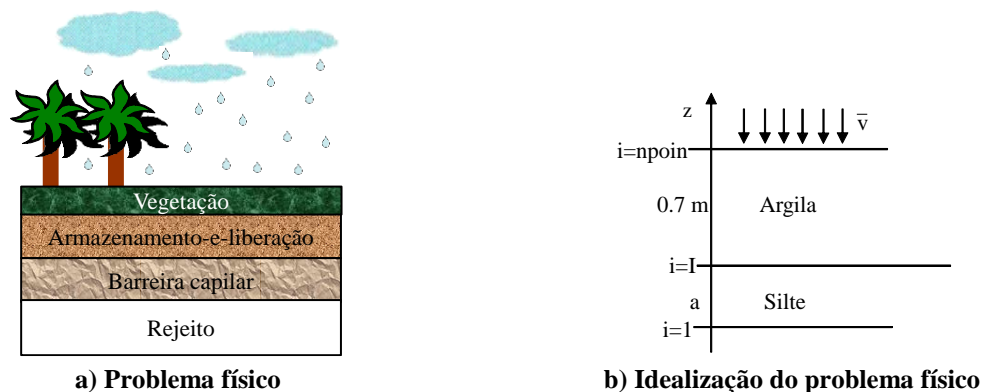


Figura 4. Sistema de cobertura evapotranspirativa com barreira capilar

A camada de barreira capilar constituída pelo silte encontra-se em contato com a camada de rejeito que é mantida saturada ao longo de todo processo. Desta forma, a base da camada de barreira capilar é definida como um contorno drenante com carga hidráulica de pressão nula. A condição inicial imposta ao sistema de cobertura foi considerada como sendo uma condição de fluxo nulo ao longo da camada. Ou seja, uma distribuição uniforme de carga hidráulica total nula o que conduz a uma distribuição linear da carga hidráulica de pressão ($\bar{h}_{p0}(z) = -z$) ao longo da camada.

Na simulação numérica foi adotada uma discretização espacial (Δz) de 0.01m; uma marcha puramente implícita ($\beta=1.0$) de integração temporal; uma discretização temporal (Δt) de 0.01dia; e, uma tolerância de 10^{-4} e um número máximo de iterações de 100 para o processo de iterativo de Picard.

A Figura 5 apresenta as curvas características adotadas para os dois materiais utilizados nas análises considerando os parâmetros da Tabela 1 de acordo com o modelo de van Genuchten. Observa-se na curva de condutividade hidráulica da Fig. 5b, o valor da carga hidráulica de pressão que corresponde à sucção de quebra da barreira ($h_p^{BC} = -0.25m$). Neste caso, para valores de carga hidráulica de pressão maiores que $-0.25m$ temos-se a quebra da barreira capilar, e a condutividade hidráulica da camada de armazenamento-e-liberação (argila) fica menor do que a da barreira capilar (silte). Nesta circunstância, a barreira capilar passa a ser um contorno mais drenante, facilitando a passagem da água nas camadas subjacentes.

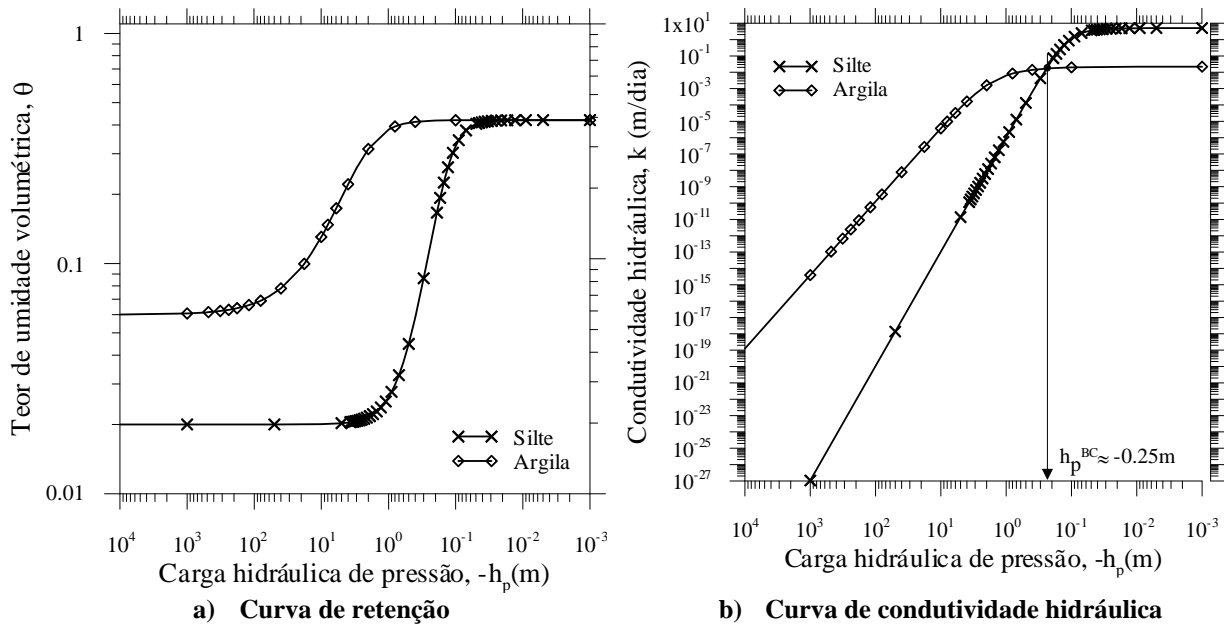


Figura 5. Curvas características do silte e da argila

Tabela 1. Parâmetros constitutivos do modelo van Genuchten

Material	k_{sat} (m/dia)	θ_s	θ_r	α (1/m)	n	h_p^c (m)	h_p^r (m)
Silte	5.04	0.42	0.02	-8.0	3.0	-0.07	-0.35
Argila	0.02	0.42	0.06	-0.5	2.0	-0.08	-2.80

A condição de contorno no topo da camada superior do sistema de cobertura foi definida com o intuito de simular a condição de precipitação numa região de clima semi-árido do Brasil. Assim, adotou-se uma precipitação acumulada de 800mm ao longo de 151 dias durante os meses de dezembro a abril (Moura et al., 2007). Com base nestes valores adotou-se uma taxa de infiltração na superfície do sistema de cobertura (\bar{v}) igual a 5.3mm/dia, a qual foi mantida constante durante 7 dias.

Mantendo-se constante a espessura da camada de argila de 70cm, avaliou-se a evolução no tempo da distribuição da carga hidráulica de pressão ao longo do sistema de cobertura (Fig. 6), variando-se a espessura (a) da camada de barreira capilar (Fig. 4b) entre 20, 30 e 40cm. A Tabela 2 apresenta um resumo com os valores da carga hidráulica de pressão na interface argila-silte do sistema de cobertura no final de 7 dias.

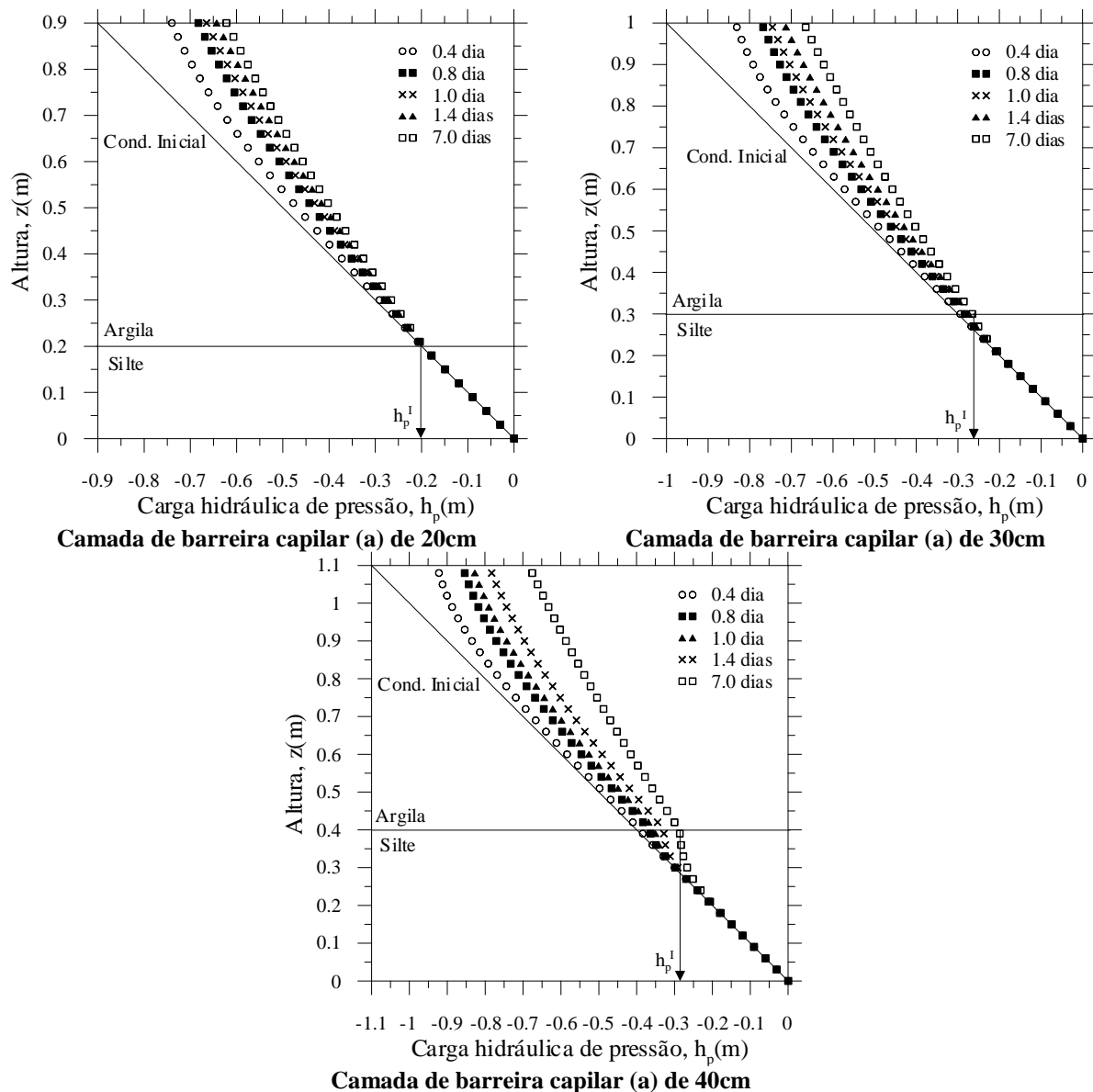


Figura 6. Evolução no tempo da distribuição espacial da carga hidráulica de pressão ($\bar{v}=5.3\text{mm/dia}$)

Tabela 2. Carga hidráulica de pressão na interface argila-silte (h_p^I) para $t=7$ dias

a (cm)	h_p^I (m)
20	-0.20
30	-0.27
40	-0.29

Observa-se que para uma mesma condição inicial e mesma taxa de infiltração houve rompimento da barreira capilar para a situação em que a camada de silte media 20cm. Neste caso, a carga hidráulica de pressão na interface argila-silte superou a carga hidráulica de quebra da barreira de -0.25m.

As outras configurações de barreira capilar com espessura de 30 e 40cm, tiveram um bom desempenho ($h_p^I < h_p^{BC} = -0.25\text{m}$), garantindo a quebra de condutividade hidráulica durante todo o período de análise. Validando, assim, o uso dessas configurações como sistemas de cobertura evapotranspirativas.

É importante ressaltar, ainda, que esta é uma conclusão que depende fortemente das condições ambientais, que são representadas neste trabalho pela taxa de fluxo prescrito na superfície do sistema de cobertura. Portanto, é correto afirmar que para uma taxa de infiltração menor ou igual a 5.3mm/dia as coberturas com barreiras capilares de espessura maior que 30cm são eficientes.

Assim, afim de se avaliar o desempenho dos sistemas de cobertura que se mostraram eficientes ($a=30$ e 40cm) para uma taxa de infiltração de 5.3mm/dia foi feita novas análise variando-se a intensidade da precipitação e mantendo-se constante o período de análise de 7 dias.

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial da carga hidráulica de pressão ao longo do sistema de cobertura ao final do sétimo dia, para valores de taxa de infiltração na superfície do sistema de cobertura (\bar{v}) de 5.3; 10 e 20mm/dia. A Tabela 3 apresenta um resumo com os valores da carga hidráulica de pressão na interface argila-silte do sistema de cobertura no final de 7 dias em função da taxa de infiltração na superfície.

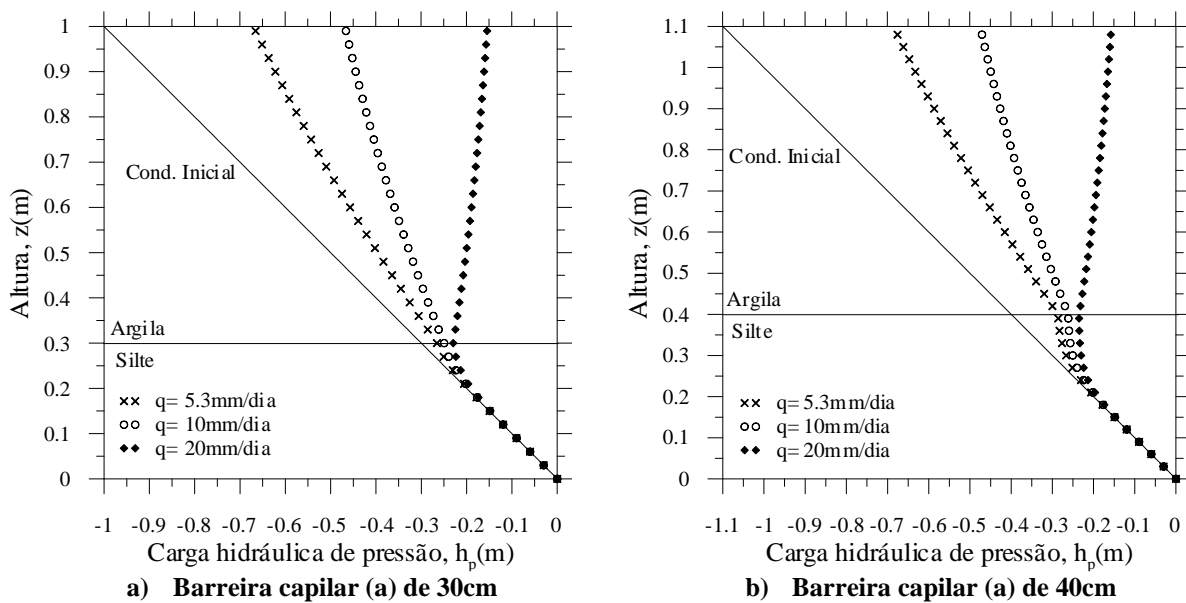


Figura 7. Distribuição espacial da carga hidráulica de pressão para diferentes taxas de infiltração

Tabela 3. Carga hidráulica de pressão na interface argila-silte (h_p^I) para $t=7$ dias

a (cm)	\bar{v} (mm/dia)		
	5.3	10	20
30	-0.27	-0.25	-0.23
40	-0.29	-0.27	-0.23

Observa-se na Fig.7 e na Tabela 3 que para taxa de fluxo prescrito igual a 20mm/dia os sistemas de cobertura não foram eficiente. Observa-se que para um período de tempo de 7 dias houve a quebra da barreira hidráulica, independentemente da espessura da camada de silte. É possível, também, observar que a eficiência de um sistema de cobertura com a camada de barreira capilar de 30cm é limitado por uma taxa de fluxo prescrito de 10mm/dia. Para essa taxa o ponto referente a interface encontra-se exatamente no nível de pressão limite para que haja a quebra da barreira capilar.

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho ressaltam a importância da análise numérica na avaliação do desempenho do sistema de cobertura evapotranspirativa. Observa-se que a definição da carga hidráulica de pressão correspondente à sucção mátrica de quebra de barreira capilar é fundamental para o dimensionamento inicial da espessura da camada de barreira capilar. Além disto, vários cenários devem ser avaliados no que diz respeito à condição de fluxo prescrito na superfície. Os resultados apresentados neste trabalho apontam para a potencialidade do modelo gerado como ferramenta de projeto, auxiliando o engenheiro na escolha do cenário que mais se adequa às condições do local onde se pretende implementar o sistema de cobertura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFOP, à Fundação Gorceix, ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG pelo auxílio financeiro recebido para o desenvolvimento dos projetos de pesquisas associados a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abichou, T.; Liu, X.; Tawfiq, K. *Design of cost effective lysimeters for alternative landfill cover demonstrations projects*. Florida, Center for Solid and Hazardous Waste Management, Report, p. 04-0232007, 2004.
- Amorim, N. R., 2008. *Avaliação do desempenho de sistemas de cobertura na mina Rio Paracatu Mineração (RPM)*. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFV.
- Borma, L. S. & Soares, P. S. M., 2002. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração. In: *Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. Cap.10. Rio de Janeiro: CETEM/MCT*, p.253-276.
- Duarte, L. B., 2012. *Avaliação numérica do dimensionamento de sistemas de cobertura para reservatórios de disposição de resíduos de mineração*. Dissertação de mestrado, Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Escola de Engenharia, UFMG.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- GARD/INAP. *Global Acid Rock Drainage Guide*. The International Network for Acid Prevention. <http://www.gardguide.com> Acesso em 12 de maio de 2015.

Machado Jr. J. C., 2000. *Análise de Problemas de Fluxo em Meio Poroso não Saturado pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PROPEC, UFOP-EM, 120p.

Moura, M. S. B., Galvinctio, J. D., Brito, L. T. L., Souza, L. S. B., Sá, I. I. S., & Silva, T. G. F., 2007. Clima e água de chuva no Semi-Árido. In: *Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semi-Árido. Cap. 2, p. 37-59.

Nogueira, C.L., Souza, K.B., Armond, D. M., Cordeiro, C. S. & Souza, A. B. M., 2014. Modelagem numérica de problemas de fluxo não saturado em sistemas de cobertura. In: *Cilamce 2014 - XXXV Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Fortaleza/CE, v. 1. p. 1-13.

Souza, K. B., 2015. *Modelagem numérica de problemas de fluxo não saturado em sistemas de cobertura*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 58f.

Souza, K.B., Nogueira, C.L. & Piuzana, L.F., 2015. Influência dos modelos constitutivos em fluxo no comportamento de sistemas de cobertura com barreira hidráulica. In: *Cilamce 2015 - XXXVI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering* Rio de Janeiro. v. 1. p. 1-12.

van Genuchten, M. T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

Vieira, A. M., 2005. *Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos*. 265f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.