



INFLUÊNCIA DOS MODELOS CONSTITUTIVOS EM FLUXO NO COMPORTAMENTO DE SISTEMAS DE COBERTURA COM BARREIRA HIDRÁULICA

Karla B. Souza

Christianne de L. Nogueira

Luiza F. Piuzana

karla.baeta@yahoo.com.br

chris@em.ufop.br

luizapiuzana@hotmail.com

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

Resumo. *Um sistema de cobertura pode ser definido como 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 muito utilizados no setor de mineração, em especial na mineração de minérios sulfetados ou minérios associados à rocha sulfetada, para cobertura de barragens de rejeito e pilhas de estéril, locais sujeitos ao surgimento da chamada drenagem ácida de mina (DAM). Assim, com o intuito de contribuir para o entendimento do processo de fluxo nos sistemas de cobertura, apresenta-se neste trabalho um estudo numérico, com base no método das diferenças finitas, de um problema de infiltração e drenagem de água num meio estratificado não saturado considerando diferentes modelos constitutivos para representar as curvas características dos materiais envolvidos. Os resultados das simulações numéricas, para uma mesma condição de contorno e inicial, ressaltam a influência dos modelos constitutivos na variação espacial e temporal da carga hidráulica de pressão ao longo das camadas de solo que constituem um sistema de cobertura com barreira hidráulica. Além disto, ressalta-se neste trabalho a importância da etapa da calibração dos modelos constitutivos a partir das curvas características dos solos a serem usados no sistema de cobertura e ainda a importância da utilização de um modelo numérico para previsão do comportamento hidráulico para fins de projeto.*

Palavras chave: *infiltração, algoritmo implícito, método da diferença finita, sistemas de cobertura, modelos constitutivos.*

1 INTRODUÇÃO

A mineração consiste em uma atividade essencial para a vida moderna, provendo matéria-prima para as mais diversas indústrias. No entanto, trata-se de uma atividade bastante modificadora do meio ambiente e que gera uma grande quantidade de resíduos (estéril ou rejeito). Estes resíduos devem ser estocados de forma segura a fim de diminuir os impactos negativos causados e promover a reabilitação da área após a finalização da atividade mineradora.

Um tipo de resíduo que requer maior cuidado são os compostos por minerais sulfetados, pois quando em contato com água e oxigênio estes geram uma solução aquosa ácida denominada drenagem ácida de mina (DAM). A DAM pode gerar um grande impacto ambiental, comprometendo a qualidade da água por um longo tempo e em regiões que se estendem além da área da mina.

Uma tecnologia que vêm sendo muito utilizada como proposta para o fechamento de reservatórios de rejeito e pilhas de estéril é o uso de sistemas de cobertura. Esses sistemas, caracterizados por perfis estratificados de solo, são dimensionados para que a quantidade de água da chuva e/ou a difusão de oxigênio para o interior do resíduo sejam minimizadas (Souza, 2015).

Neste trabalho apresenta-se um estudo numérico, com base no método das diferenças finitas, da influência do modelo constitutivo em fluxo na distribuição espacial e evolução temporal da carga hidráulica de pressão, do teor de umidade volumétrica e do grau de saturação num sistema de cobertura hidráulica constituída por duas camadas de solo submetidas a uma condição de fluxo prescrito, no topo da camada superior, equivalente a uma dada taxa pluviométrica; e, a uma condição de saturação completa na base da camada inferior.

2 MODELO MATEMÁTICO

A equação diferencial que representa o fluxo unidimensional de água em meio poroso homogêneo e não saturado pode ser escrita em termos da carga hidráulica de pressão (h_p) como (Freeze e Cherry, 1979):

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

em que

$$k' = \frac{dk}{dh_p} \quad (2)$$

representa a derivada da curva de condutividade hidráulica definida como $k=k(h_p)$, e

$$C = \frac{d\theta}{dh_p} \quad (3)$$

é a capacidade de retenção específica que representa a derivada da curva de retenção de água do solo definida como $\theta=\theta(h_p)$. A solução da Eq. (1) deverá atender às condições de contorno que podem ser em carga de pressão prescrita ($\bar{h}_p$):

$$h_p(z_1, t) = \bar{h}_p \quad (4)$$

ou em fluxo prescrito ($\bar{v}$)

$$\left(\frac{dh_p}{dz} \right)_{z=z_2} = -(\bar{v}/k + 1) \quad (5)$$

onde z_1 e z_2 são as coordenadas da base e do topo da camada de solo. A Eq. (1) deverá, ainda, atender à seguinte condição inicial:

$$h_p(z, 0) = \bar{h}_{p0}(z) \quad (6)$$

No caso de meios estratificados é necessário se definir a equação para a interface entre dois meios consecutivos, meio 1 e meio 2 (Fig.1). De acordo com a condição de continuidade, tem-se que a velocidade de fluxo na direção vertical (v) na saída do meio 2 é idêntica a velocidade de fluxo vertical de entrada no meio 1. Ou seja, no ponto da interface entre os dois meios vale a relação:

$$v_{\text{meio 1}} = v_{\text{meio 2}} \quad (7)$$

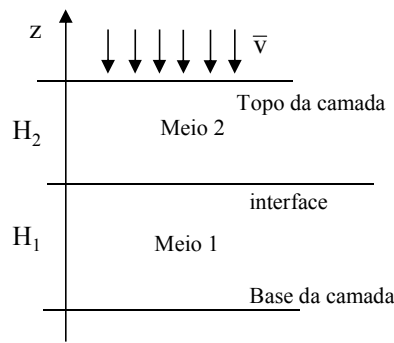


Figura 1. Idealização do problema físico – Solo estratificado (Souza, 2015)

Considerando o fluxo laminar e adotando a lei de Darcy chega-se à seguinte condição de continuidade para um ponto na interface entre os dois meios:

$$\left[k \left(1 + \frac{dh_p}{dz} \right) \right]_1 = \left[k \left(1 + \frac{dh_p}{dz} \right) \right]_2 \quad (8)$$

em que k é a condutividade hidráulica na direção vertical.

Segundo Duarte (2012) “o estudo da capacidade de retenção de umidade do solo é fundamental para se definir a capacidade de armazenamento de água da cobertura e a permeabilidade do solo em condições não saturadas, visto que a maioria dos sistemas de cobertura encontra-se, na maior parte do tempo, acima do lençol freático e, portanto, em condição não saturada”.

Daí a necessidade da determinação das curvas características do solo, condutividade hidráulica e retenção, que são dadas em função da carga hidráulica de pressão (h_p) ou da sucção mátrica ($\psi = \gamma_w h_p$, em que γ_w é o peso específico da água) do meio poroso. Alguns dos modelos que descrevem essa dependência entre a condutividade hidráulica e teor de

umidade volumétrica com o nível de sucção ou carga hidráulica de pressão são apresentados a seguir (Souza e Nogueira, 2012; Souza e Nogueira, 2013, 2014 e 2015).

2.1 Modelo BC

De acordo com o modelo BC (Brooks e Corey, 1964) o teor de umidade volumétrica (θ) pode ser escrito em função da carga hidráulica de pressão (h_p), para valores menores que a carga hidráulica de pressão correspondente à pressão de entrada de ar (h_p^e), tal como:

$$\theta(h_p) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(h_p / h_p^e \right)^{-N} \quad (9)$$

em que θ_r é o teor de umidade volumétrica na condição residual e θ_s é o teor de umidade volumétrica na condição saturada (que é igual à porosidade n do meio). Para valores de carga hidráulica de pressão maior que a carga hidráulica de pressão correspondente à pressão de entrada de ar, o teor de umidade volumétrica assume o valor do teor de umidade na saturação.

Para este modelo, a seguinte função de condutividade hidráulica é adotada:

$$k(h_p) = k_s \left(h_p / h_p^e \right)^{-M} \quad (10)$$

em que k_s é o coeficiente de permeabilidade saturada a qual é uma constante para um determinado tipo de solo. N e M são parâmetros ajustáveis relacionados à distribuição de tamanhos de poros.

De acordo com este modelo a capacidade de retenção específica $C(h_p)$, é dada por:

$$C(h_p) = \left[-N(\theta_s - \theta_r) / h_p^e \right] \left(h_p / h_p^e \right)^{-N-1} \quad (11)$$

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

$$k'(h_p) = k_s \left(-M / h_p^e \right) \left(h_p / h_p^e \right)^{-M-1} \quad (12)$$

2.2 Modelo VG

De acordo com o modelo VG (van Genuchten, 1980) a seguinte relação para curva de retenção pode ser obtida em termos da carga hidráulica de pressão:

$$\theta(h_p) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \theta_e \quad (13)$$

em que

$$\theta_e = \theta_n^{-m} \quad (14)$$

$$\theta_n = 1 + |\alpha h_p|^n \quad (15)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (16)$$

onde α e n são parâmetros a serem ajustados de acordo com o solo. A capacidade de retenção deste modelo é dada por:

$$C(h_p) = (\theta_s - \theta_r) \frac{d\theta_e}{d\theta_n} \frac{d\theta_n}{dh_p} \quad (17)$$

em que

$$\frac{d\theta_e}{d\theta_n} = -m\theta_n^{-m-1} \quad (18)$$

$$\frac{d\theta_n}{dh_p} = \alpha n |\alpha h_p|^{n-1} \quad (19)$$

De acordo com este modelo a função de condutividade hidráulica é dada por:

$$k(h_p) = k_s (\theta_e)^{0.5} (\theta_m)^2 \quad (20)$$

em que

$$\theta_m = 1 - \left[1 - \theta_e^{(1/m)} \right]^m \quad (21)$$

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

$$k'(h_p) = k_s \left\{ 0.5(\theta_e)^{-0.5} (\theta_m)^2 + 2(\theta_e)^{0.5} \theta_m \frac{d\theta_m}{d\theta_e} \right\} \frac{d\theta_e}{d\theta_n} \frac{d\theta_n}{dh_p} \quad (22)$$

em que

$$\frac{d\theta_m}{d\theta_e} = \theta_e^{(1/m-1)} \left[1 - \theta_e^{(1/m)} \right]^{m-1} \quad (23)$$

2.3 Modelo EX

O modelo exponencial utilizado por Srivastava e Yeh (1991) define a seguinte relação para o teor de umidade volumétrica:

$$\theta(h_p) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\alpha h_p} \quad (24)$$

em que α é um parâmetro que varia de acordo com o tipo de solo e representa a taxa de redução do teor de umidade volumétrica à medida que a carga de pressão diminui. A capacidade de retenção pode ser definida como sendo:

$$C(h_p) = \alpha(\theta_s - \theta_r) e^{\alpha h_p} \quad (25)$$

A função de condutividade hidráulica proposta por Srivastava e Yeh (1991) é também uma função exponencial e é dada por:

$$k(h_p) = k_s e^{\alpha h_p} \quad (26)$$

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

$$k'(h_p) = \alpha k_s e^{\alpha h_p} \quad (27)$$

3 MODELO NUMÉRICO

A solução analítica da equação diferencial parcial representada pela Eq. (1) não é trivial, fazendo, assim, necessário o uso de um método aproximado para transformar esta equação num sistema de equação algébrica.

Com base no método das diferenças finitas (MDF), adotando uma aproximação em diferença central (Nogueira et al 2014), pode-se escrever a equação diferencial, Eq. (1), na forma discreta, num ponto genérico i de uma malha de diferenças finitas (Fig. 2) no interior de uma dada camada de solo, tal como:

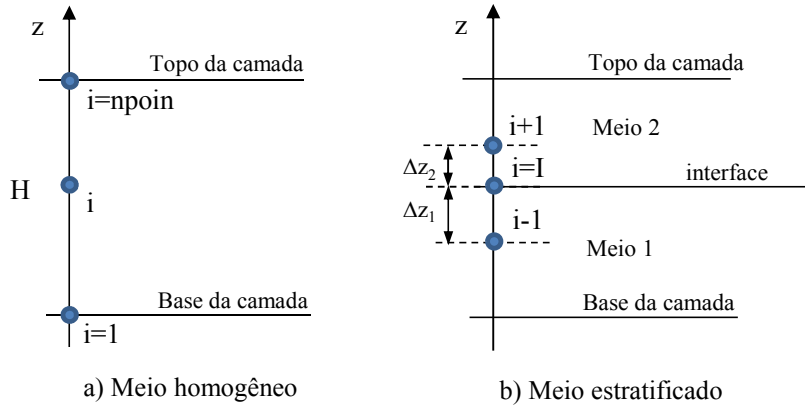


Figura 2. Discretização em diferenças finitas (Nogueira et al, 2014)

$$A_1^1 h_{p_{i-1,j+1}} + A_2^1 h_{p_{i,j+1}} + A_3^1 h_{p_{i+1,j+1}} = A_1^0 h_{p_{i-1,j}} + A_2^0 h_{p_{i,j}} + A_3^0 h_{p_{i+1,j}} + C_1 \quad (28)$$

em que

$$A_1^1 = \beta \Delta t (2k - k' h'_p \Delta z) \quad (29a)$$

$$A_2^1 = -4\beta k \Delta t - 2C \Delta z^2 \quad (29b)$$

$$A_3^1 = \beta \Delta t (2k + k' h'_p \Delta z) \quad (29c)$$

$$A_1^0 = -(1 - \beta) \Delta t (2k - k' h'_p \Delta z) \quad (29d)$$

$$A_2^0 = (1 - \beta) \Delta t 4k - 2C \Delta z^2 \quad (29e)$$

$$A_3^0 = -(1 - \beta) \Delta t (2k + k' h'_p \Delta z) \quad (29f)$$

$$C_1 = -2k' h'_p \Delta z^2 \Delta t \quad (29g)$$

em que 0 refere-se a um instante de tempo (t), 1 refere-se a um instante de tempo ($t + \Delta t$), 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 $\beta = 0$ tem-se um algoritmo explícito, para $\beta = 1$ tem-se um algoritmo puramente implícito e para $\beta = 0.5$ tem-se o algoritmo implícito de Crank-Nicholson.

No caso de meios estratificados é necessário se definir a equação para o ponto $i=I$ na interface entre dois meios consecutivos, meio 1 e meio 2, com base no MDF. Usando-se uma aproximação em avanço e em atraso para as derivadas da Eq. (8), obtém-se:

$$A_{II}^1 h_{p_{i-1}} + A_{I2}^1 h_{p_i} + A_{I3}^1 h_{p_{i+1}} = C_{II} + A_{II}^0 h_{p_{i-1}} + A_{I2}^0 h_{p_i} + A_{I3}^0 h_{p_{i+1}} \quad (30)$$

em que:

$$A_{II}^1 = \beta k_1 \Delta z_2 \quad (31a)$$

$$A_{I2}^1 = -\beta(k_1 \Delta z_2 + k_2 \Delta z_1) \quad (31b)$$

$$A_{I3}^1 = k_2 \beta \Delta z_1 \quad (31c)$$

$$A_{II}^0 = -(1-\beta)(k_1 \Delta z_2) \quad (31d)$$

$$A_{I2}^0 = (1-\beta)(k_2 \Delta z_1 + k_1 \Delta z_2) \quad (31e)$$

$$A_{I3}^0 = -(1-\beta)k_2 \Delta z_1 \quad (31f)$$

$$C_{II} = (k_1 - k_2) \Delta z_1 \Delta z_2 \quad (31g)$$

Para os nós no contorno do problema deve-se avaliar o tipo de condição de contorno a ser aplicada: natural ou essencial. A aproximação em diferenças finitas para os pontos situados no contorno do problema é dada respectivamente, pelas seguintes equações: para base ($i=1$)

$$A_{CC1}^1 h_{p_i} + A_{CC2}^1 h_{p_{i+1}} = A_{CC1}^0 h_{p_i} + A_{CC2}^0 h_{p_{i+1}} + CC_{1B} \quad (32)$$

e para o topo ($i=npoin$):

$$A_{CC1}^1 h_{p_i} + A_{CC2}^1 h_{p_{i-1}} = A_{CC1}^0 h_{p_i} + A_{CC2}^0 h_{p_{i-1}} + CC_{1T} \quad (33)$$

em que, para uma condição de contorno essencial em carga hidráulica de pressão prescrita, tem-se:

$$A_{CC1}^1 = 1 \quad (34a)$$

$$A_{CC2}^1 = 0 \quad (34b)$$

$$A_{CC1}^0 = 1 \quad (34c)$$

$$A_{CC2}^0 = 0 \quad (34d)$$

$$CC_{1B} = \bar{h}_p^B \quad (34e)$$

$$CC_{1T} = \bar{h}_p^T \quad (34f)$$

No caso de uma condição de contorno natural em fluxo prescrito, tem-se:

$$A_{CC1}^1 = -\beta \Delta t 4k - 2\Delta z^2 C \quad (35a)$$

$$A_{CC2}^1 = \beta \Delta t 4k \quad (35b)$$

$$A_{CC1}^0 = (1 - \beta)\Delta t 4k - 2\Delta z^2 C \quad (35c)$$

$$A_{CC2}^0 = -(1 - \beta)\Delta t 4k \quad (35d)$$

$$CC_{1B} = 2\Delta t \Delta z [-k'h'_p \Delta z + (q/k + 1)(k'h'_p \Delta z - 2k)] \quad (35e)$$

$$CC_{1T} = 2\Delta z \Delta t [-k'h'_p \Delta z + (q/k + 1)(\Delta z k'h'_p + 2k)] \quad (35e)$$

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:

$$A^1 h_p^1 = A^0 h_p^0 + D \quad (36)$$

em que,

$$[h_p^0]^T = [h_{p1} \quad h_{p2} \quad \dots \quad h_{p_{npoin-1}} \quad h_{p_{npoin}}]^0 \quad (37)$$

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

$$[h_p^1]^T = [h_{p1} \quad h_{p2} \quad \dots \quad h_{p_{npoin-1}} \quad h_{p_{npoin}}]^1 \quad (38)$$

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

$$A^1 = \begin{bmatrix} A_{CC1}^1 & A_{CC2}^1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{I1}^1 & A_{I2}^1 & A_{I3}^1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_1^1 & A_2^1 & A_3^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & A_{CC2}^1 & A_{CC1}^1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

e

$$A^0 = \begin{bmatrix} A_{CC1}^0 & A_{CC2}^0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & A_{I1}^0 & A_{I2}^0 & A_{I3}^0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & A_1^0 & A_2^0 & A_3^0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & A_{CC2}^0 & A_{CC1}^0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

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

$$\mathbf{D}^T = [\mathbf{CC}_{IB} \quad C_1 \quad C_1 \quad \dots \quad C_{II} \quad \dots \quad C_1 \quad C_1 \quad \mathbf{CC}_{IT}] \quad (41)$$

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. (36). Neste trabalho adota-se o método de Picard (Machado Jr. 2000; Souza, 2015).

4 APLICAÇÃO

A Figura 3 apresenta uma ilustração do sistema de cobertura que será avaliado neste trabalho. Este sistema é definido como evapotranspirativo com barreira hidráulica e é composto por duas camadas de solo de mesma espessura (50cm): uma camada de material siltoso sobreposta a uma camada de material argiloso. A camada de material siltoso funciona como uma camada de armazenamento de água no período de chuva e de liberação de água no período de estiagem.



Figura 3. Sistema de cobertura evapotranspirativa com barreira hidráulica (Souza, 2015)

A camada de barreira hidráulica constituída pelo material argiloso fica em contato com a camada de rejeito que é considerada em condição saturada ao longo de todo processo. Desta forma, a base da camada de barreira hidráulica é definida como um contorno drenante com carga hidráulica de pressão nula. Já o topo da camada superior, material granular, está sujeito às condições ambientais.

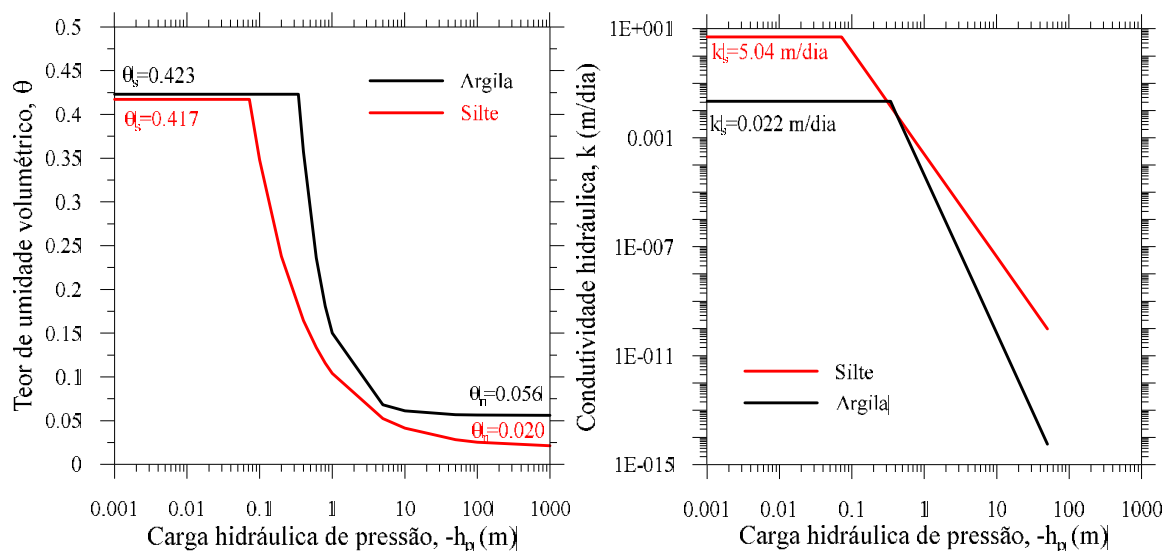
Na simulação numérica foi adotada uma discretização espacial com 101 pontos nodais ($\Delta z_1 = \Delta z_2 = 0.01\text{m}$); uma marcha puramente implícita ($\beta = 1.0$) de integração temporal e uma tolerância de 10^{-5} e um número máximo de iterações de 100 para o processo de iterativo. Uma distribuição linear de carga hidráulica de pressão ao longo do perfil, $h_p(z,0) = -z$, foi adotada como condição inicial.

Uma taxa de fluxo prescrito ($\bar{v}$) igual a 10mm/dia foi aplicado na superfície da camada de silte e mantida constante por 7 dias. Em seguida, esta taxa de fluxo prescrito foi removida e mantida constante por mais sete dias, simulando, assim, um período de estiagem após um período chuvoso.

A Figura 4 apresenta as curvas características adotadas para os dois materiais utilizados nas análises. Estas curvas foram geradas a partir dos parâmetros do modelo BC indicados na Tabela 1 e obtidos por Szymkiewicz e Helmig (2011).

Tabela 1. Parâmetros do modelo BC (Szymkiewicz e Helmig, 2011)

Material	N	h_p^e (m)
Silte	0.592	-0.0725
Argila	1.270	-0.3425

**Figura 4. Curvas características do silte e da argila**

A partir das curvas da Fig. 4, e usando-se uma técnica de programação matemática (Nascimento e Nogueira 2010), foi possível obter os parâmetros constitutivos dos modelos VG e EX indicados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros do modelo VG

Material	α (1/m)	n	h_p^e (m)	h_p^r (m)
Silte	-7.085	1.848	-0.01	-1000.0
Argila	-1.766	3.661	-0.10	-50.0

Tabela 3. Parâmetros do modelo EX

Material	α (1/m)	h_p^r (m)
Silte	2.067	-1000.0
Argila	0.963	-50.0

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, as curvas de retenção e de condutividade hidráulica, obtidas para cada modelo utilizando os parâmetros indicados nas Tabelas 1 a 3.

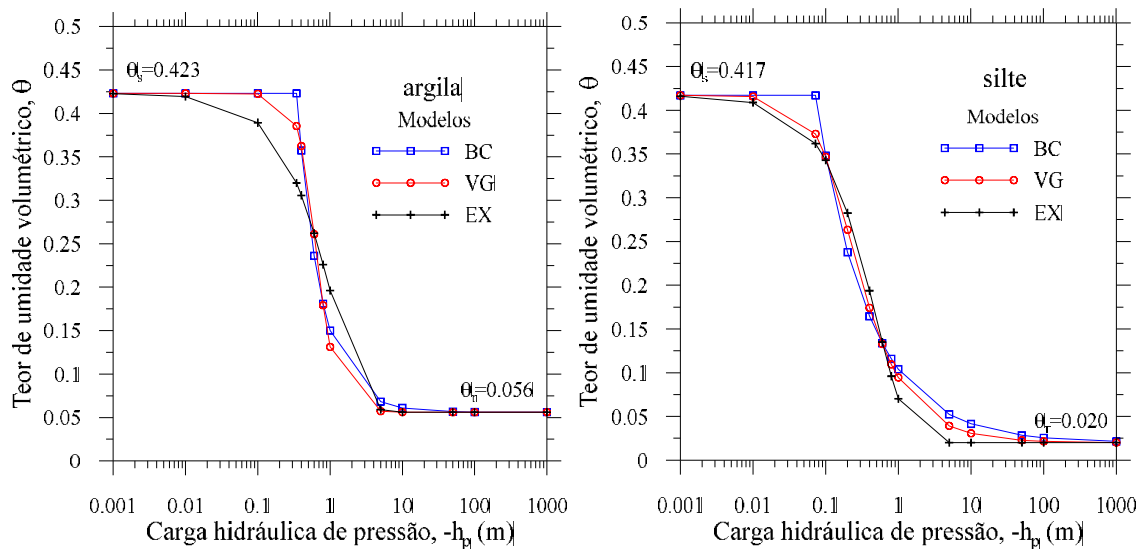


Figura 5. Curvas de retenção geradas

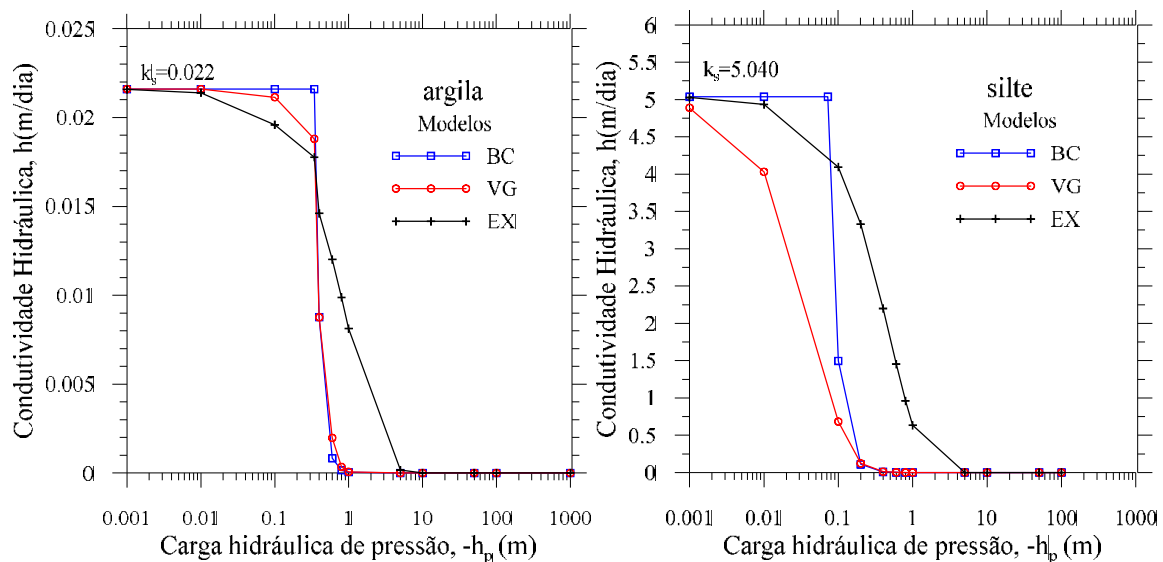


Figura 6. Curvas de condutividade hidráulica geradas

As curvas de retenção geradas (Fig. 5) para os modelos VG e EX apresentam uma boa aproximação com a curva do modelo BC tomada como referência para determinação dos parâmetros dos modelos constitutivos.

Com relação à condutividade hidráulica (Fig. 6), no entanto, para valores de carga hidráulica de pressão entre -0.01m e -0.30m (valores que correspondem aos valores iniciais ao longo da camada de argila) o modelo EX fornece uma condutividade hidráulica menor que a fornecida pelos modelos VG e BC. Para valores de carga hidráulica de pressão entre -0.30m e -1.0m (que correspondem aos valores iniciais na camada de silte) o modelo EX fornece uma condutividade hidráulica maior que a fornecida pelos modelos VG e BC.

A Figura 7 apresenta a evolução no tempo da distribuição de carga hidráulica de pressão ao longo das camadas para os três modelos considerados, durante os períodos de análise referentes ao período chuvoso (até 7 dias) e ao período de estiagem (de 8 a 14 dias). Como pode ser observado, a distribuição espacial e temporal da carga hidráulica de pressão varia com o modelo constitutivo adotado, no entanto, os modelos BC e VG apresentam resultados

semelhantes e bastantes diferentes dos resultados do modelo EX, como já era esperado. O modelo EX fornece resultados compatíveis com o de um material mais permeável na camada superior induzindo um aumento da carga hidráulica de pressão na interface entre as camadas mais rapidamente. No final do período chuvoso, no entanto, a carga hidráulica de pressão entre as camadas é praticamente a mesma, independente do modelo.

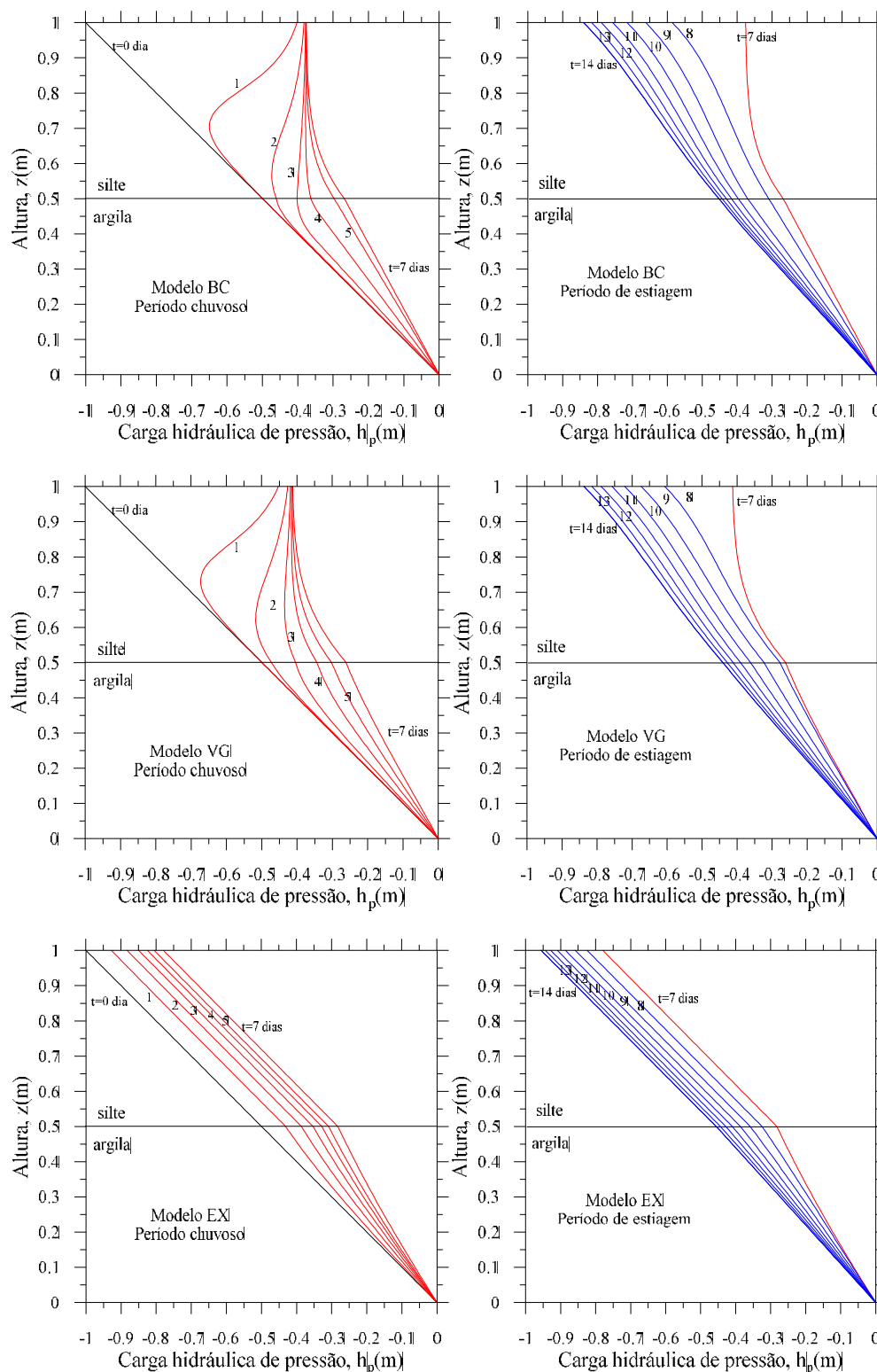


Figura 7. Evolução no tempo da distribuição espacial da carga hidráulica de pressão

A Figura 8 apresenta a evolução do tempo da distribuição do teor de umidade volumétrica ao longo das camadas para os modelos de BC, VG e EX. De acordo com os modelos BC e VG a camada inferior de argila encontrava-se inicialmente saturada até uma altura correspondente a 35cm e 20cm, respectivamente. Ao final do período chuvoso, observa-se a saturação completa da camada de argila, de acordo com estes modelos. A análise realizada com o modelo EX não conduz a saturação da camada de argila.

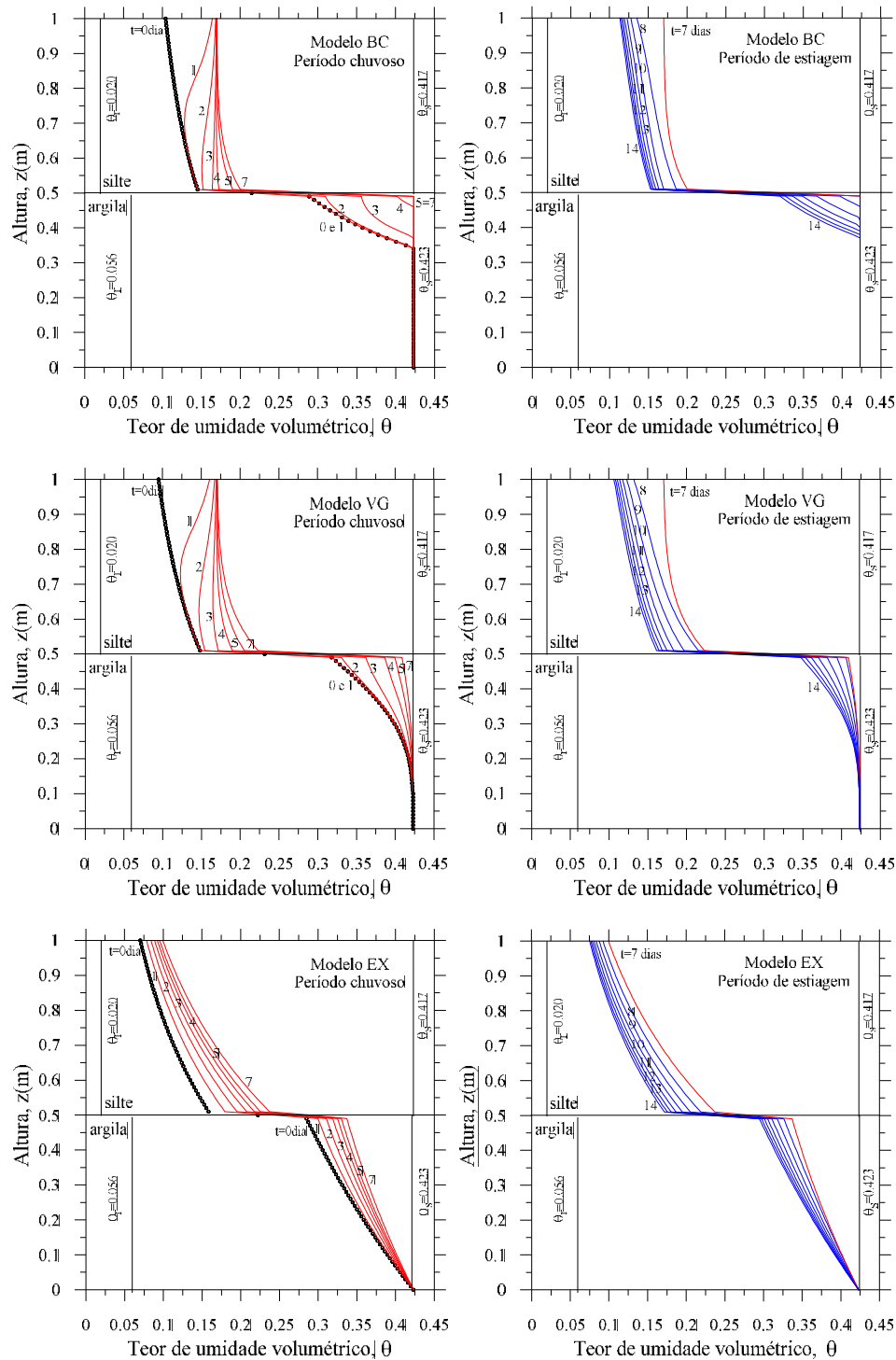


Figura 8. Evolução no tempo da distribuição espacial do teor de umidade volumétrica

Um ponto importante a ser levado em conta na avaliação da eficiência de um sistema de cobertura, sobretudo para aqueles relacionados com possibilidade de geração da DAM, é a garantia da mínima disponibilidade de oxigênio. Desta forma, sugere-se (Amorim, 2008) que a camada de barreira hidráulica mantenha um grau de saturação ($S=\theta/\theta_s$) maior que 80%.

A Figura 9 apresenta a evolução no tempo da distribuição do grau de saturação ao longo das camadas para cada modelo constitutivo. Como pode ser observado, nenhum dos modelos atendem a exigência citada por Amorim (2008) de manter, ao longo de todo processo, um grau de saturação acima de 80% ao longo de toda camada de barreira hidráulica.

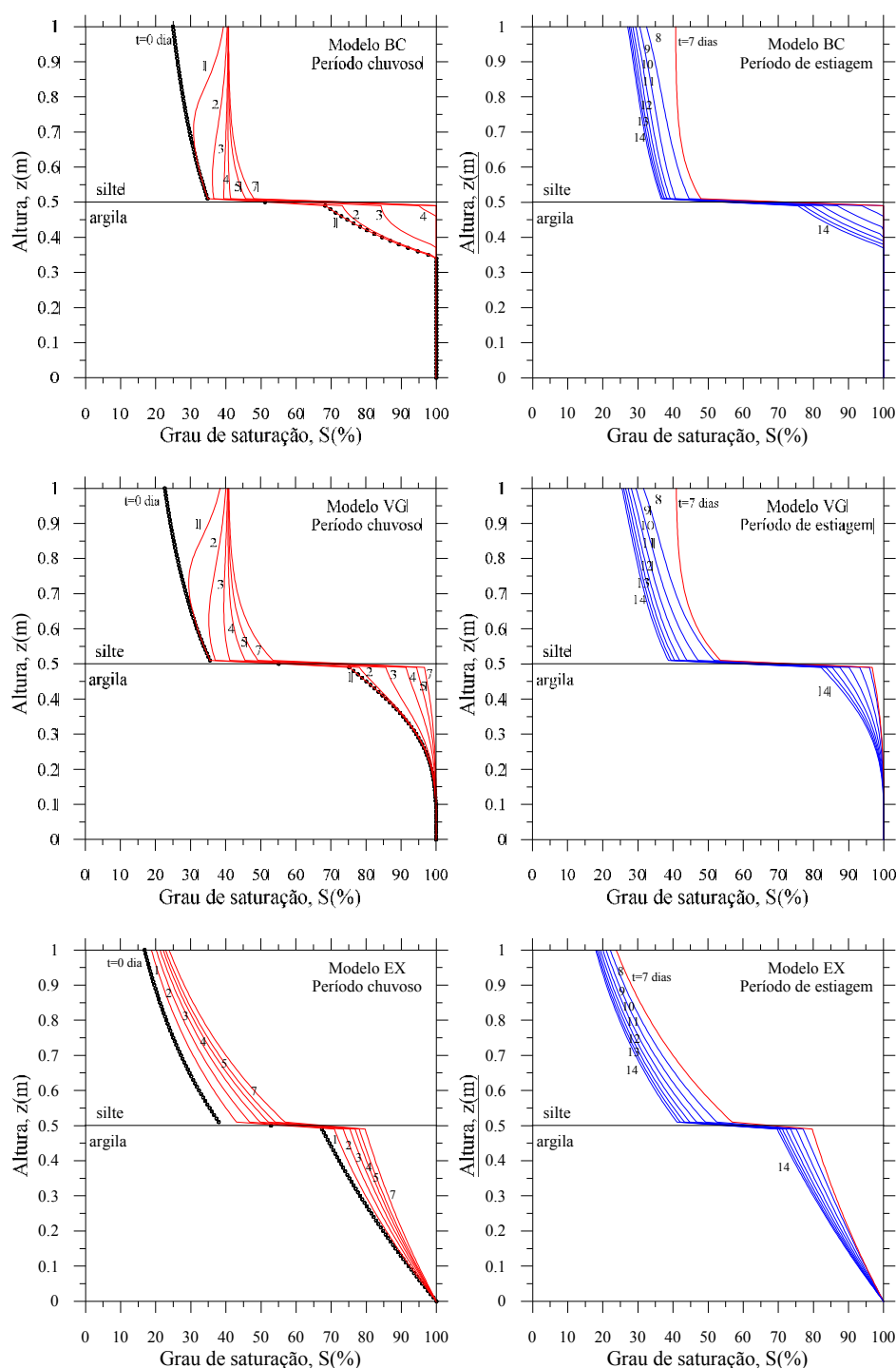


Figura 9. Evolução no tempo da distribuição espacial do grau de saturação

Outro ponto importante a ser levado em conta na avaliação da eficiência de um sistema de cobertura, é a quantidade de água que atravessa a camada de base e alcança a camada de rejeito. Esta quantidade deve ser a menor possível. Assim, avaliando-se a velocidade de fluxo na base da camada inferior do sistema de cobertura poderemos observar se o sistema está ou não funcionando.

A Figura 10 apresenta a evolução no tempo da velocidade de fluxo na base da camada de argila, que deveria funcionar como uma barreira hidráulica à passagem da água. Como pode ser observado, todas as análises conduzem a fluxo para camada de rejeito indicando que a barreira hidráulica não está funcionando. Neste caso, o material adotado para compor a barreira hidráulica deveria ser substituído.

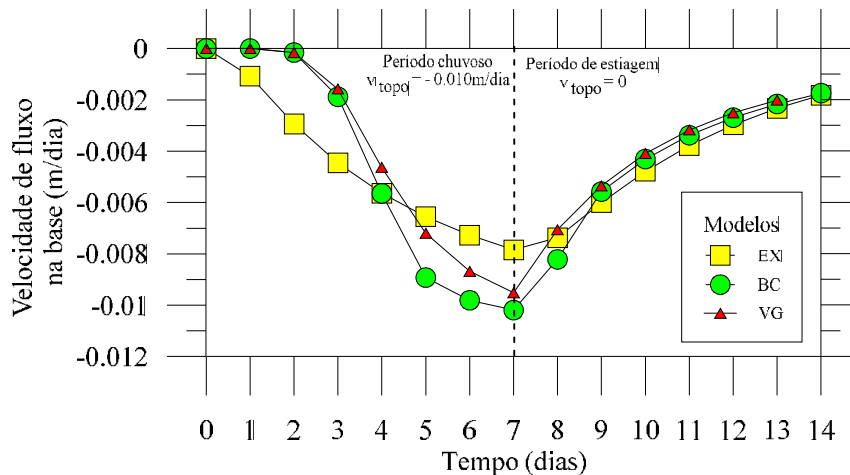


Figura 10. Evolução no tempo da velocidade de fluxo na base da camada de argila

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse trabalho mostram a influência do modelo constitutivo em fluxo na variação temporal e espacial da carga hidráulica de pressão, do teor de umidade volumétrica e do grau de saturação ao longo das camadas de solo que compõem um sistema de cobertura com barreira hidráulica. Apresenta-se ainda a evolução temporal da velocidade de fluxo na base da camada de barreira hidráulica. A definição dos parâmetros de cada modelo constitutivo constitui um passo muito importante na análise do problema de fluxo em meio poroso não saturado. Um mesmo material, pode apresentar características distintas em função da metodologia adotada para obtenção dos parâmetros constitutivos. Um esforço grande deve ser adotado no sentido de produzir curvas características (retenção e condutividade hidráulica) analíticas as mais próximas possíveis das curvas características obtidas experimentalmente. O modelo numérico apresentado neste trabalho constitui uma ferramenta de previsão de comportamento hidráulico útil para aplicação em projetos de sistemas de cobertura auxiliando o engenheiro na escolha do material a ser adotado. No caso de situações em que o material a ser adotado não possa ser alterado, o modelo numérico pode ser adotado para definir a espessura da barreira hidráulica de modo a atender os critérios de grau de saturação mínimo de 80% ao longo da camada e a velocidade de fluxo mínima na base desta camada.

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

- 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.
- Brooks, R. H. & Corey, A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State University Hydrology Papers*, 3,1–27.
- 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.
- 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.
- Nascimento, S. C. & Nogueira, C. L., 2010. *Determinação automática de parâmetros constitutivos de modelos para problemas de fluxo em meio poroso não saturado*. 2010. 36f. Relatório Técnico-Científico Final PIP/2009-2010. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- 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, A. B. M. & Nogueira, C. L., 2012. *Modelagem numérica via MDF do processo de infiltração da água em meios porosos*. Relatório técnico-científico final – PROBIC 2011-2012.
- Souza, K. B. & Nogueira, C. L., 2013. *Modelagem numérica via MDF do processo de infiltração da água em meios porosos*. Relatório técnico-científico final – PROBIC 2012-2013.
- Souza, K. B. & Nogueira, C. L., 2014. *Modelagem numérica via MDF do processo de infiltração da água em meios porosos*. Relatório técnico-científico final – PROBIC 2013-2014, 56f.

- Souza, K. B. & Nogueira, C. L., 2015. *Modelagem numérica via MDF do processo de infiltração da água em meios porosos*. Relatório técnico-científico final – PROBIC 2014-2015, 37f.
- Srivastava, R. & Yeh, T-C. J., 1991. Analytical Solutions for One-Dimensional, Transient Infiltration Toward the Water Table in Homogeneous Layered Soils, *Water Resources Research*, 27(5), 753-726.
- Szymkiewicz, A. & Helmig, R., 2011. Comparison of conductivity averaging methods for one-dimensional unsaturated flow in layered soils. *Advances in water resources*, 34, 8, 1012-1025.
- 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.
- Yanful, E. K.; Mousavi, S. M. & deSouza, L-P., 2006. A numerical study of soil cover performance. *Journal of Environmental Management*, 81: 72-92.