

Análise Hidro-Mecânica Acoplada do Efeito da Infiltração da Chuva nos Movimentos e na Estabilidade dos Taludes

Ileana Nóbrega Justiniano

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: ileananobrega@gmail.com

Lícia Mouta da Costa

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: licia@ufpe.br

Ivaldo Dario da Silva Pontes

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, E-mail: ivaldo@ufpe.br

RESUMO: Análise de estabilidade de taludes é um problema geotécnico clássico, que objetiva caracterizar a superfície de ruptura e o fator de segurança para uma dada geometria e condições de carregamento. Do ponto de vista mecânico, a análise é realizada para verificar a condição de ruptura do talude, e pode ser desenvolvida por métodos analíticos, experimentais e numéricos. Alguns métodos utilizados na literatura como o método de equilíbrio, o método de Bishop modificado, Morgenstern e Price, entre outros, consideram os parâmetros do solo obtidos em amostras na condição saturada. Entretanto, nem sempre a condição de saturação está presente nos taludes. Problemas de instabilidade de taludes devido à infiltração de chuva têm sido verificados com bastante frequência em diversas regiões de solos não saturados, destacando a necessidade de ampliar as análises para considerar estes efeitos. Na condição não saturada o solo apresenta um determinado valor de sucção, o qual fornece um acréscimo de rigidez e resistência ao cisalhamento do material. A infiltração da água no solo provoca uma diminuição no valor da sucção e consequentemente, uma redução na resistência ao cisalhamento e na rigidez do solo, o que pode produzir deslocamentos, deformações e até mesmo a ruptura do talude. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o problema de estabilidade de taludes, através da aplicação de uma formulação hidro-mecânica acoplada para meios porosos não saturados. Esta formulação, implementada no código de elementos finitos CODE_BRIGHT, é aplicada a exemplos de análise de taludes visando avaliar o efeito da infiltração da chuva nos movimentos e na estabilidade. Nos solos não saturados o coeficiente de permeabilidade, que para a condição saturada geralmente é admitido constante, é função não linear do índice de vazios e do grau de saturação. O grau de saturação, por sua vez, é controlado pelo valor da sucção. A relação entre o grau de saturação e a sucção é representada através da curva de retenção. Desta forma as propriedades hidráulicas do solo não saturado são descritas pela permeabilidade intrínseca, permeabilidade relativa e pela curva de retenção. Simulações foram realizadas a fim de avaliar a influência de fatores relevantes nas análises, tais como propriedades do solo, curva de retenção e intensidade da chuva.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação numérica, Análise hidro-mecânica acoplada, Estabilidade de talude.

1 INTRODUÇÃO

Análise de estabilidade de taludes é um problema geotécnico clássico, que objetiva

caracterizar a superfície de ruptura e o fator de segurança para uma dada geometria e condições de carregamento. Do ponto de vista mecânico, a análise é realizada para verificar a condição de

ruptura do talude, e pode ser desenvolvida por métodos analíticos, experimentais e numéricos. Griffiths e Lane (1999) apontam alguns métodos utilizados na literatura como o método de equilíbrio, o método de Bishop modificado, Morgenstern e Price, entre outros, os quais consideram os parâmetros do solo obtidos em amostras na condição saturada. Entretanto, nem sempre a condição de saturação está presente nos taludes. Problemas de instabilidade de taludes devido à infiltração de chuva têm sido verificados com bastante frequência em diversas regiões de solos não saturados, destacando a necessidade de ampliar as análises para considerar estes efeitos.

Atualmente, cada vez mais, os estudos referentes a solos não saturados têm ganhado destaque devido à ocorrência de desastres acarretados pelos deslizamentos de terras. Aliada a outros fatores como a urbanização não planejada das encostas e ao desmatamento, a chuva pode ser uma das principais causas desses processos de deslizamento. Na condição não saturada, o solo apresenta um determinado valor de sucção, o qual fornece um acréscimo de rigidez e resistência ao cisalhamento do material. A infiltração da água no solo provoca uma diminuição no valor da sucção e consequentemente, uma redução na resistência ao cisalhamento e na rigidez do solo, o que pode produzir deslocamentos, deformações e até mesmo a ruptura do talude.

2 FORMULAÇÃO NUMÉRICA

As análises numéricas realizadas neste trabalho utilizaram o programa de elementos finitos CODE_BRIGHT (COupled DEformation of Brine Gas and Heat Transport) desenvolvido por Olivella et al. (1996) e Guimarães (2002), no qual para o acoplamento hidro-mecânico, as equações do problema hidráulico são resolvidas simultaneamente com as equações de equilíbrio de tensões do problema mecânico

2.1 Modelo Hidráulico

O problema hidráulico é caracterizado pela equação de conservação de massa de água, usando a Lei Darcy e a adição do termo

mecânico do acoplamento, dada por

$$\frac{\partial(\phi\rho_w)}{\partial t} + \nabla(\rho_w\mathbf{q}_w + \phi\rho_w\dot{\mathbf{u}}) = 0 \quad (1)$$

onde ρ_w é a densidade da água e ϕ é a porosidade do solo. No termo de fluxo a componente de deformação do meio poroso é descrita pela velocidade da fase sólida, $\dot{\mathbf{u}}$ e o fluxo de água em relação à fase sólida é descrita pela lei de Darcy, dada por

$$\mathbf{q}_w = -\frac{K_w}{\mu_w}(\nabla p_w - \rho_w\tilde{\mathbf{g}}) \quad (2)$$

onde $\tilde{\mathbf{g}}$ é o vetor de gravidade, ∇p_w é gradiente de pressão da água e K_w é o coeficiente de permeabilidade da água, dado por

$$K_w = \frac{\mathbf{k}k_{rw}}{\mu_w} \quad (3)$$

onde $\mathbf{k}$, é o tensor de permeabilidade intrínseca do solo (considerado isotrópico no presente trabalho), μ_w é a viscosidade da água e k_{rw} a permeabilidade relativa, que neste trabalho é calculada por

$$k_{rw} = S_e^3 \quad (4)$$

onde S_e é o grau de saturação efetivo.

A relação entre o grau de saturação em um meio poroso e a sucção, denominada curva de retenção, é de fundamental importância para a caracterização de um solo não saturado.

Existem diversos modelos matemáticos desenvolvidos para o ajuste de dados experimentais, com o objetivo de representar a curva de retenção. Marinho (2015) cita alguns dos mais conhecidos tais como Brooks & Corey (1964); Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994). No presente trabalho será utilizado o modelo de Van Genuchten, o qual é descrito segundo a equação

$$S_e = \frac{S - S_r}{S_s - S_r} = \left[1 + \left(\frac{p_a - p_w}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (5)$$

onde S_e corresponde ao grau de saturação efetivo, S é grau de saturação para um determinado valor de sucção, S_r é a saturação residual, S_s , o grau de saturação máximo; P_0 e λ são parâmetros obtidos a partir do ajuste de dados experimentais.

A porosidade e a permeabilidade intrínseca são propriedades do solo, que podem ser definidas como variáveis de acoplamento, uma vez que eles são atualizados pelo modelo mecânico e introduzem o efeito da deformação na equação de fluxo.

2.2 Modelo Mecânico

Em solos não saturados o comportamento mecânico requer a utilização de duas variáveis de tensão independentes. No presente trabalho são consideradas a tensão excedente sobre a pressão do ar e a sucção, descritas respectivamente pelas expressões

$$\sigma = \sigma_t - \mathbf{I} \cdot p_a \quad (6)$$

$$s = p_a - p_w \quad (7)$$

O modelo constitutivo mecânico utilizado neste trabalho é o BBM (Alonso et al., 1990), formulado com base na elastoplasticidade com endurecimento, introduzindo o efeito da sucção, que é considerado de duas maneiras: o valor da sucção afeta o tamanho da superfície de escoamento e o valor do potencial plástico, enquanto sua variação produz deformação volumétrica elástica. O BBM também contempla a possibilidade de desenvolvimento de deformações plásticas quando a sucção ultrapassa um dado patamar. Quando a sucção é nula, o BBM se reduz ao Modelo Cam-Clay Modificado.

Os incrementos de deformação elástica $d\epsilon_{ij}^e$ são formados por duas componentes, uma devido a variações de tensão e outra devido a variações de sucção, segundo a equação

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{2G-3K}{6KG} dp \delta_{ij} + \frac{1}{2G} d\sigma''_{ij} + \frac{1}{3K^s} ds \delta_{ij} \quad (8)$$

em que

$$K = \frac{(1+e)p}{\kappa} \quad (9)$$

$$K^s = \frac{(1+e)(s + p_{atm})}{\kappa_s} \quad (10)$$

onde e é o índice de vazios, p é a tensão média, p_{atm} é a pressão atmosférica, κ é a inclinação da linha de descarregamento-recarregamento na curva e -log(p), κ_s é a inclinação da linha de umedecimento-drenagem na curva e -log($s + p_{atm}$) e G é o módulo cisalhante.

A dependência da sucção pode ser representada por uma superfície de escoamento tridimensional no espaço p - J - s . Considerando o ângulo de Lode constante, sua expressão é dada por

$$F^{LC} = J^2 - \frac{M^2}{3} (p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (11)$$

com

$$p_0 = p_c \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (12)$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r] \quad (13)$$

$$p_s = k_s s \quad (14)$$

onde J é a raiz quadrada do segundo invariante do tensor de tensões, M é inclinação da linha dos estados críticos, relacionada ao ângulo de atrito do material, p_0^* é uma variável de história, e corresponde a tensão de pré-adensamento, $\lambda(0)$ é a inclinação da linha e -ln(p) durante carregamento plástico isotrópico, p_c , r e β são parâmetros do material. k_s descreve o aumento da coesão com a sucção.

3 SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações realizadas no presente trabalho tratam de análises hidro-mecânicas acopladas de um talude hipotético, visando à verificação da influência das propriedades hidráulicas do solo sobre a estabilidade do talude.

Para utilização do CODE_BRIGHT, foi necessário o uso prévio de uma ferramenta de pré-processamento, para definição da geometria, geração da malha de elementos finitos e definição das propriedades dos materiais, condições iniciais e de contorno. Neste trabalho utilizou-se o GID, não só na fase de pré-processamento, mas também no pós-processamento para análise dos resultados obtidos.

O modelo estudado consiste em um talude de 10 metros de altura e com uma inclinação 2:1 horizontal e vertical, respectivamente. A geometria adotada é apresentada na figura 1, onde também é ilustrada a malha de elementos finitos utilizada, composta por 1608 nós e 3040 elementos (triângulos lineares).

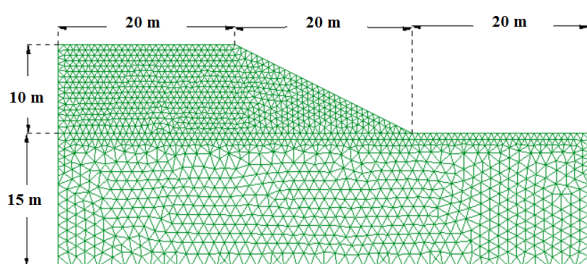


Figura 1 – Geometria e malha de elementos finitos adotada.

As condições de contorno são indicadas na figura 2. As extremidades direita e esquerda do domínio apresentam restrição de deslocamento horizontal, enquanto a face inferior, além de indeslocável é considerada uma fronteira de fluxo nulo. Observa-se ainda a condição de contorno de fluxo utilizada para simular a chuva no talude, descrita através de uma vazão prescrita nos contornos indicados, equivalente a 10mm/h.

Como condição inicial tem-se que o talude se encontra não saturado, sob uma sucção de 2,0 MPa, e o nível d'água foi admitido coincidente com a base do talude.

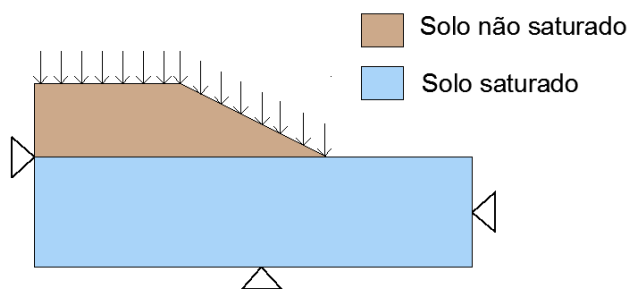


Figura 2 – Condições de contorno.

Os parâmetros mecânicos utilizados no modelo BBM foram obtidos de Cezano (2012) e são apresentados na tabela 1. Observa-se que a tensão de pré-adensamento p_0^* apresenta valores distintos nas duas regiões do modelo, sendo considerada 0,2 Mpa na região não saturada e 2,0 MPa para o solo saturado.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo mecânico, BBM

$\lambda(0)$	r	β	k	k_s	p_c (Mpa)
0,098	0,8	3,0	0,028	0,0001	0,0001

Para as propriedades hidráulicas foram analisadas duas situações distintas, identificadas como solo 1 e solo 2. O solo 1 considera os parâmetros de Cezano (2012), em que a permeabilidade intrínseca é igual a $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. Já o solo 2, com permeabilidade intrínseca igual a $5,5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, corresponde a uma argila siltosa estudada por Hamdhan and Schweiger (2011). Utilizando o modelo de Van Genuchten para as curvas de retenção foram obtidos, através de uma rotina elaborada em Matlab, os parâmetros indicados na tabela 2 e as curvas ilustradas na figura 3.

Tabela 2 – Parâmetros das curvas de retenção

Solo	λ	P_0 (Mpa)	S_{rl}	S_{ls}
Solo 1	0,35	0,05	0,00	1,00
Solo 2	0,082	0,02	0,01	0,99

As figuras 4 e 5 ilustram os resultados obtidos da pressão de líquido e grau de saturação, respectivamente, para o Solo 1. Já as figuras 6 e 7 ilustram os resultados para o Solo 2.

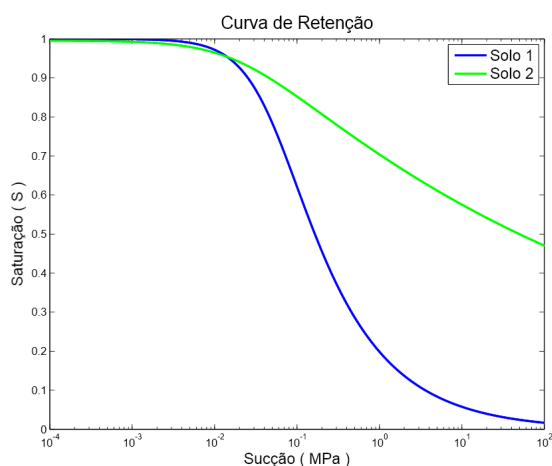


Figura 3 – Curvas de retenção dos solos 1 e 2.

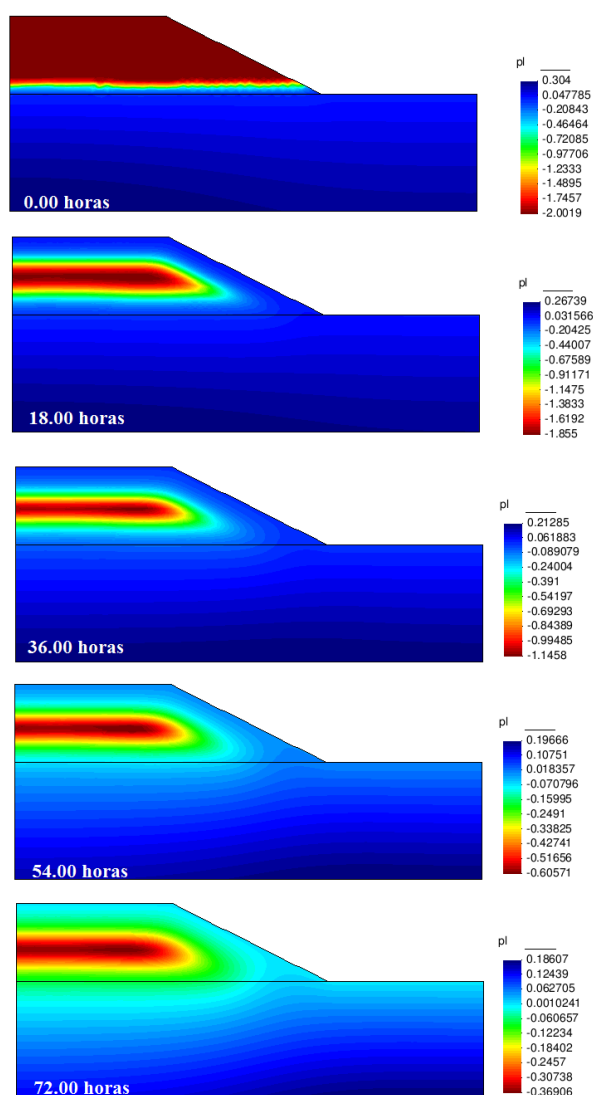


Figura 4 – Evolução da pressão de líquido para o solo 1.

Como esperado, a infiltração da água no solo provocou uma diminuição na sucção e, consequentemente, um aumento no grau de saturação. Após 72 horas de chuva, o solo 1

alcançou um grau de saturação mínimo igual a 34% enquanto que o solo 2 obteve um valor de 75%. Este resultado pode ser entendido devido ao formato das curvas de retenção para esses dois solos. Como ilustrado na figura 3, percebe-se que para um mesmo valor de sucção o solo 2 apresenta valores de grau de saturação mais elevados que o solo 1, para sucção acima de 0,1 MPa, ou seja, desde o início da análise, quando o solo 1 apresenta um grau de saturação de 13,5% enquanto que no solo 2 corresponde a 66%.

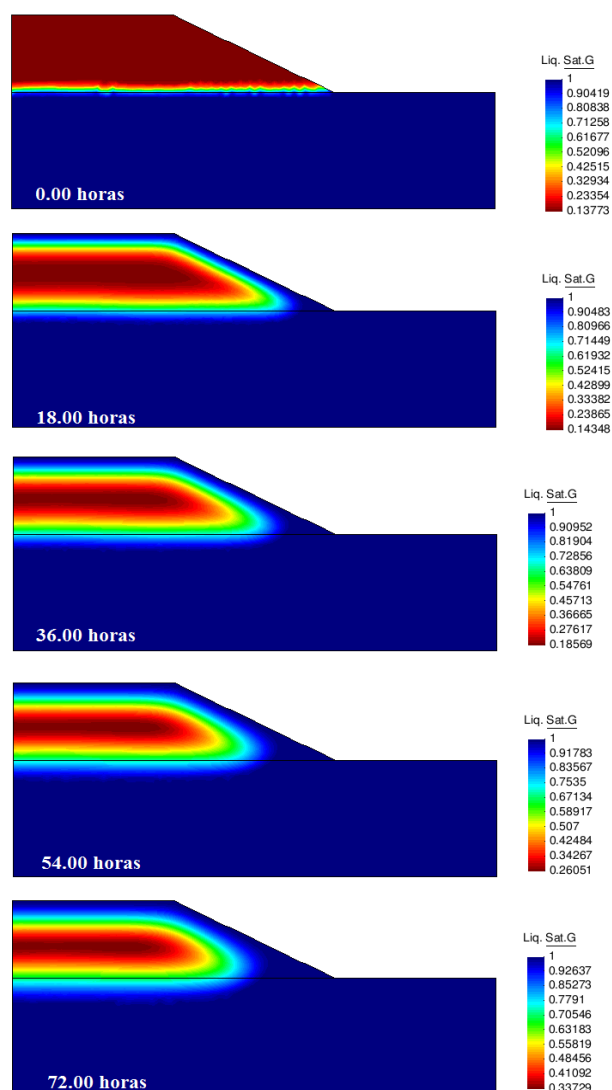


Figura 5 – Evolução do grau de saturação para o solo 1

Observa-se ainda que a taxa de aumento do grau de saturação também está relacionada ao formato da curva. Para o solo 2 a inclinação da curva é mais suave apresentando, assim, uma variação uniforme. Enquanto que no solo 1 a variação do grau de saturação foi mais

acentuada.

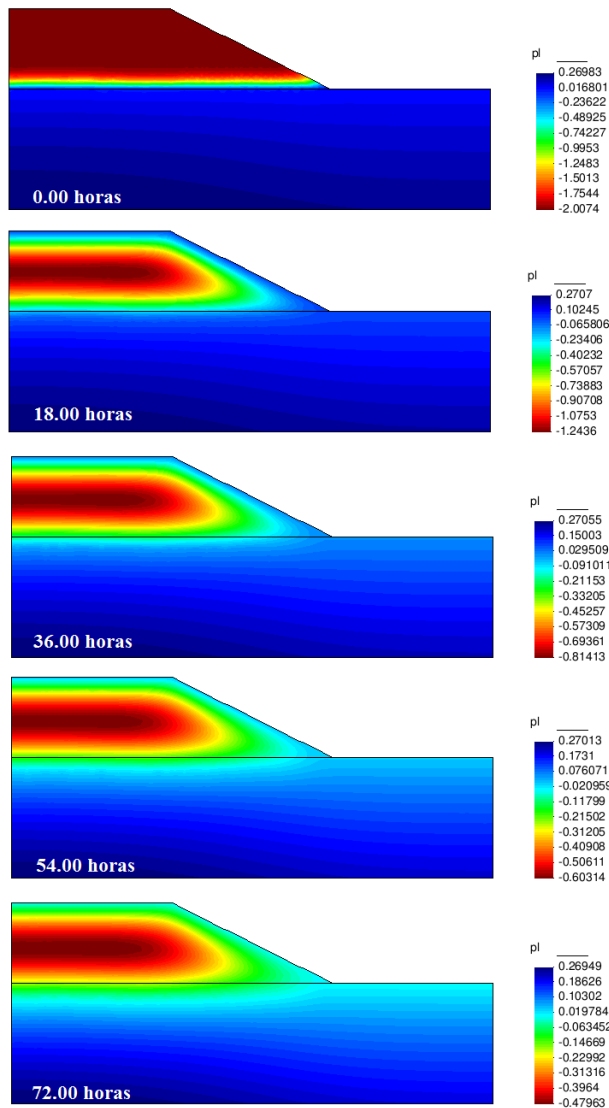


Figura 6 – Evolução da pressão de líquido para o solo 2

Do ponto de vista mecânico, observa-se que a medida que há uma diminuição da sucção, há um aumento nas deformações. Os deslocamentos alcançados nas duas situações estão ilustrados na figura 8.

A sucção oferece um acréscimo de resistência e rigidez ao solo, de forma que, com a redução do seu valor ocorre um aumento das deformações. Verifica-se que para o solo 1 a taxa de variação da sucção foi maior em relação ao solo 2. Em consequência, o solo 1 apresentou maiores deformações.

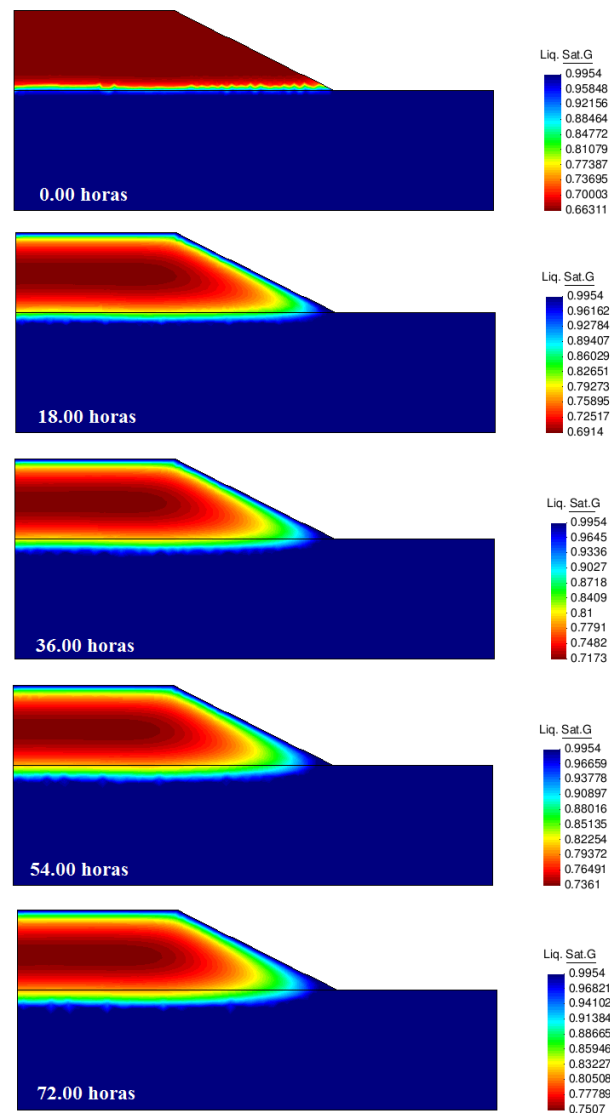


Figura 7 – Resultados do Grau de Saturação para o solo 2.

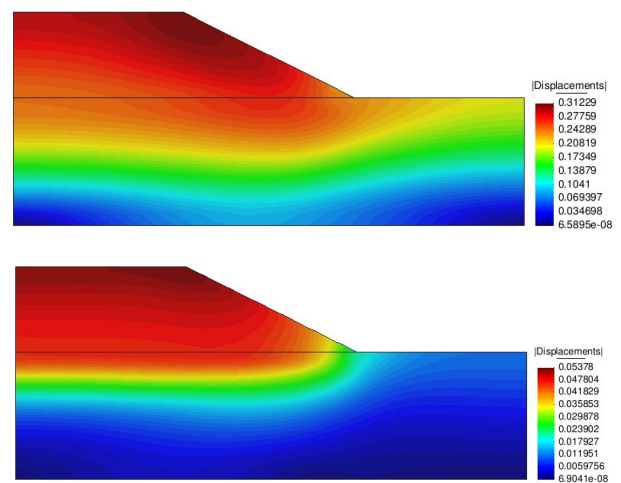


Figura 8 – Deslocamentos no tempo final: a) solo 1; b) solo 2.

A estabilidade de um talude, cujo solo encontra-se na condição não saturado, é afetada pela variação da sucção, apresentando redução de resistência e aumento de deslocamentos à medida que a sucção diminui. Diferentes parâmetros hidráulicos geram diferentes distribuições de saturação. As análises realizadas mostraram que o formato da curva de retenção pode ter grande importância no comportamento de taludes não saturados submetidos a ação de chuvas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio concedido pelo CNPq

REFERÊNCIAS

- Alonso, E.E; Gens, A.; Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soil. *Géotechnique*, 40, no 3, p. 405-430.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T., 1964, Hydraulic properties of porous media: *Hydrology Papers*, Colorado State University, 24 p.
- Cezano, M. T. L. (2012) *Aplicação de modelo constitutivo para solos não saturados: análise hidromecânica acoplada*, Trabalho de Conclusão de Curso Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.
- Fredlund, D. G., and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotech. Journal*, 31, 533-546.
- Griffiths, D V, Lane P A (1999). Slope Stability Analysis by Finite Element. *Geotechnique*, 49(3):387-403
- Guimarães, L. do N. (2002). *Análisis multi-componente no isoterma en medio poroso deformable no saturado*. Phd Thesis, Geotechnical Engineering Department, Technical University of Catalunya, Spain.
- Hamdhan, N. I.; Schweiger F. Helmut. (2011) Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil with Fully Coupled Flow-Deformation Analysis. IAMG 2011.
- Marinho, F. A. M. (2005) *Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados*. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Olivella S, Gens A, Carrera J, Alonso EE. (1996) Numerical formulation for a simulator (CODE-BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*, vol. 13, no 7: 87-112
- Van Genuchten, M. T. (1980), A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of American*