

Importância da Estratigrafia do Perfil Geológico para o Tempo De Ruptura de Vertentes Naturais Sob Condição De Chuva Transiente

Valéria Vaz Alonso

Engenheira, Souza Floriano Engenharia Diferenciada, Porto Alegre, Brasil, valeria@souzafloriano.com

Lázaro Valentin Zuquette

Professor, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, Brasil, lazarus1@sc.usp.br

RESUMO:

O presente trabalho apresenta os resultados de uma simulação da infiltração da chuva em dois perfis geológicos distintos, a fim de observar a influência da estratigrafia na redistribuição da água e, consequentemente, na estabilidade das vertentes. Para isso, foram considerados um perfil majoritariamente granular e um com uma camada intermediária com maior teor de fração fina. Além disso, foram considerados dois cenários para condição de umidade inicial, seco (umidade volumétrica similar ao ponto de murchamento, sucção aproximadamente a 1500kPa) e úmido (umidade volumétrica similar a capacidade de campo, sucção aproximadamente a 10kPa). Em ambos cenários, foi simulado um mês de chuva antecedente. Os resultados obtidos destacam a geração de uma barreira capilar no perfil com material fino e a drenagem gravitacional no perfil granular. A estimativa do fator de segurança considerando coesão e peso específico natural como variáveis da umidade demonstra que o tempo de ruptura de uma vertente é menor no perfil com material fino devido à elevada umidade e queda no valor da coesão. No cenário de material inicialmente úmido, o avanço da frente de molhamento ocorre mais rápido quando comparado a condição seca. A chuva antecedente apresentou papel fundamental no umedecimento dos materiais inconsolidados o que colabora para a ruptura durante o evento principal de precipitação.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Talude; Infiltração; Umidade Volumétrica; Coesão

ABSTRACT:

This study presents the results of a rainfall infiltration simulation conducted on two distinct geological profiles, aiming to evaluate the influence of stratigraphy on water redistribution and, consequently, on slope stability. To achieve this, two profiles were considered: one predominantly granular and another containing an intermediate layer with a higher fine fraction content. Additionally, two initial moisture condition scenarios were analyzed: dry (volumetric water content similar to the wilting point, suction approximately 1500 kPa) and wet (volumetric water content similar to field capacity, suction approximately 10 kPa). In both scenarios, one month of antecedent rainfall was simulate. The results highlight the formation of a capillary barrier in the profile containing fine material and gravitational drainage in the granular profile. The safety factor estimates, considering cohesion and natural unit weight as moisture-dependent variables, show that the failure time of a slope is shorter in the profile with fine material due to higher moisture content and the resulting decrease in cohesion. Under initially wet conditions, the wetting front advances more rapidly compared to the dry condition. Antecedent rainfall played a key role in increasing the moisture content of the unconsolidated materials, contributing to failure during the main rainfall event

KEYWORDS: Slope Stability, Infiltration; Volumetric Moisture, Cohesion

1. INTRODUÇÃO

Movimentos de massa gravitacionais (MMG) são processos geológicos considerados naturais da dinâmica das vertentes. Entretanto, quando essas massas atingem áreas ocupadas os MMG são caracterizados como um evento perigoso, uma vez que colocam em risco a vida dessas populações. Não só o Brasil, mas também diversos países, foram testemunhas de inúmeras tragédias, principalmente devido aos extremos eventos climáticos que vêm se tornando cada vez mais frequentes. Entre os municípios brasileiros afetados

por esse fenômeno, Campos do Jordão (SP) é local de frequentes escorregamentos translacionais. A tragédia mais recente ocorreu em janeiro de 2000, resultando em 10 mortes, 3 feridos e mais de 423 casas em risco de desabamento (MENDES *et al.*, 2018)."

Diante disso, entende-se a importância dos estudos voltados para a ruptura de encostas induzida pela chuva. Dois principais mecanismos podem levar uma vertente à ruptura. Segundo Enoki *et al.* (1999), no caso de uma camada de solo mais permeável sobrepondo uma camada menos permeável a água da chuva que infiltra no solo percola pelo limite entre as camadas em direção ao pé da encosta. Consequentemente, o nível freático e as pressões a jusante aumentam, acarretando na ruptura do material. Já Zhang *et al.* (2011), explicam que no caso dos solos não saturados o umedecimento do solo causado pela infiltração da água da chuva reduz a sucção nos poros, o que resulta na queda da resistência ao cisalhamento do material e leva à ruptura da encosta.

Nesse contexto, é importante compreender como ocorre a redistribuição da água no interior do maciço do solo e como o perfil geológico e os diferentes materiais que o compõem afetam esse fluxo. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a redistribuição da água da chuva infiltrada e a influência no tempo estimado de ruptura para vertentes naturais em uma região do município de Campos do Jordão (SP), considerando a variação da umidade volumétrica dos materiais inconsolidados em função do tempo de simulação e da profundidade em dois perfis geológicos característicos da região.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de Campos do Jordão (22° 44.451'S e 45° 35.663'O) situa-se no Vale do Paraíba Paulista e está à 182 km da capital do estado, São Paulo. A área de estudo do presente trabalho abrange quatro bairros do município, totalizando aproximadamente 1 km². Por fazer parte do Planalto Campos do Jordão, a cidade apresenta altos valores de altitude, entre 1580 m e 1730 m e grande número de encostas com declividade superior a 25°. A pluviosidade anual média é superior a 1.600 mm, baseado em dados de 1937 a 2023 disponíveis no Departamento de Água e Energia (DAEE). O período mais chuvoso é entre os meses de outubro e março, representando quase 80% da precipitação anual.

Ahrendt (2005) caracterizou os materiais inconsolidados encontrados na área de estudo, possibilitando a identificação de onze unidades diferentes baseado nos perfis característicos. Ao todo, a autora apresenta duas classes de solo residuais alterados (I-R e II-R), três classes de saprolito (III-S, IV-S e V-S), duas classes de aterros (VI-A e VII-A) e uma classe de solo coluvionar (VIII-T). A Tabela 1 apresenta a caracterização dos materiais.

Tabela 1. Caracterização dos materiais inconsolidados. Fonte: Ahrendt (2005)

Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)
I-R	5	40	55	27,03	13,5
II-R	33	28	39	27,92	14,3
III-S	38	28	31	26,69	12,8
IV-S	0	45	55	27,13	12,5
V-S	19	36	45	27,06	12,5
VI-A/VII-SA	9	31	60	27,19	11,6
VIII-T	33	28	39	30,78	11,0

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Por se tratar de uma área muito extensa, o presente trabalho tem foco em duas unidades de materiais inconsolidados principais, os quais possuem perfis geológicos representativos das demais unidades identificadas na região. A Unidade 1, formada pelos materiais VI-A, I-R e II-R representa os perfis compostos majoritariamente por materiais de granulometria mais grossa. Por outro lado, a Unidade 4 é composta pelos materiais I-R, II-R e V-S e representa os perfis com presença de material mais fino. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados nas análises dos materiais inconsolidados em questão.

Tabela 2. Propriedades hidráulicas das unidades analisadas. Fonte: Ahrendt (2005)

Unidades	Materiais	K_{sat} (m/s)	θ_r	θ_{sat}	α (cm ⁻¹)	n
U1	VI-A	5,43x10 ⁻⁵	0,02	0,55	0,138	1,592
	I-R	5,19x10 ⁻⁵	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	3,51x10 ⁻⁵	0,108	0,485	0,034	1,168
U4	I-R	7,78x10 ⁻⁵	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	9,82x10 ⁻⁵	0,109	0,485	0,034	1,168
	V-S	1,95x10 ⁻⁵	0,02	0,52	0,138	1,592

No *software Hydrus 1D*, foi simulado a infiltração da água da chuva registrada nos meses de dezembro de 1999 e janeiro de 2000, período em que foram observados escorregamentos translacionais na área de estudo. Para isso, foram utilizados dados de precipitação cedidas pelo Departamento de Água e Energia (DAEE) do estado de São Paulo. Como resultado, o programa retorna a variação da umidade volumétrica ao longo do período simulado e profundidade do perfil, os quais foram padronizados com 3 m de espessura. A partir dessas informações foram estimados os fatores de segurança (FS) das vertentes situadas na região estudada por meio da equação do talude infinito, apresentada na Equação 1, na qual c é a coesão [kPa], γ é o peso específico natural [kN/m³], β é a declividade da encosta [°] e ϕ é o ângulo de atrito interno [°].

$$FS = \frac{c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2(\beta)) \cdot \tan(\phi)}{\gamma \cdot z \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\beta)} \quad (1)$$

Para incluir a infiltração da água da chuva na equação do FS foram consideradas como variáveis a coesão e o peso específico natural dos materiais inconsolidados em função da umidade volumétrica. Baseado em estudos anteriores, os quais afirmam que a coesão varia exponencialmente em função da umidade (Matsushi e Matsukura, 2006; He *et al.*, 2022), foram obtidas equações que relacionam esses dois parâmetros por meio de regressão não linear dos dados de Silva (2009). O peso específico natural foi estimado por meio de relação entre os índices físicos.

Por fim, foram considerados dois cenários distintos quanto a umidade inicial dos materiais inconsolidados durante o período considerado. Para isso, foram utilizados os conceitos de umidade de ponto de murchamento e umidade de capacidade de campo os quais representaram, respectivamente, a condição seca e úmida inicial. A umidade do ponto de murchamento é definida como o limite inferior de armazenamento de água pelo solo, nessa umidade considera-se que não há mais água disponível para plantas. Geralmente está associado ao potencial mátrico igual ou inferior a 1500 kPa (Zonta *et al.*, 2016). Por outro lado, a umidade da capacidade de campo refere-se a quantidade de água retida no solo após o excesso de água ter sido drenado e a taxa de movimento descendente da água ter diminuído (Veihmeyer e Heindrickson, 1949). De acordo com Zonta *et al.*, 2016, essa umidade é obtida quando a tensão no solo é igual a -10 kPa, em solos arenosos, ou -30 kPa, em solos argilosos. Esses parâmetros foram estimados por meio das equações de pedotransferência de Arruda *et al.* (1987) que se baseiam no teor de silte e argila dos materiais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De forma geral, a umidade volumétrica dos materiais inconsolidados varia de acordo com a precipitação. Nos períodos de chuva mais intensa o solo umedece rapidamente, principalmente nas camadas mais superficiais. Enquanto, durante os dias secos ocorre o processo de drenagem na água em direção ao interior do perfil, de forma que a umidade diminua nas menores profundidades e aumente nas camadas mais profundas. A Figura 1 apresenta os gráficos da variação da umidade volumétrica ao longo da profundidade durante o período simulado na condição inicial seca da Unidade 1, a qual representa os perfis com maior teor de material granular. Nos gráficos, a condição inicial está representada pela linha preta.

Observa-se, que no limite entre as camadas, profundidade das potenciais superfícies de ruptura (SR), ocorre um decréscimo da umidade logo acima do contato entre os materiais e o acréscimo da umidade logo abaixo, formando um patamar no gráfico que permanece durante toda simulação. Entende-se que esse efeito

é resultado da rápida drenagem gravitacional logo após a infiltração cessar, a qual se mantém à medida que a redistribuição avança. Dingman (2015) explica que essa situação ocorre quando a força gravitacional é significativa, ou seja, o teor de água acima da frente inicial de umedecimento excede a capacidade de campo, característico de solos granulares. Além disso, esse comportamento também pode estar relacionado à diferença entre parâmetros hidráulicos, textura e estrutura dos diferentes materiais inconsolidados que compõem o perfil. Como resultado a umidade nessas profundidades se mantém menores que o restante da camada durante todo o período simulado, consequentemente a coesão dos materiais no potencial SR é maior.

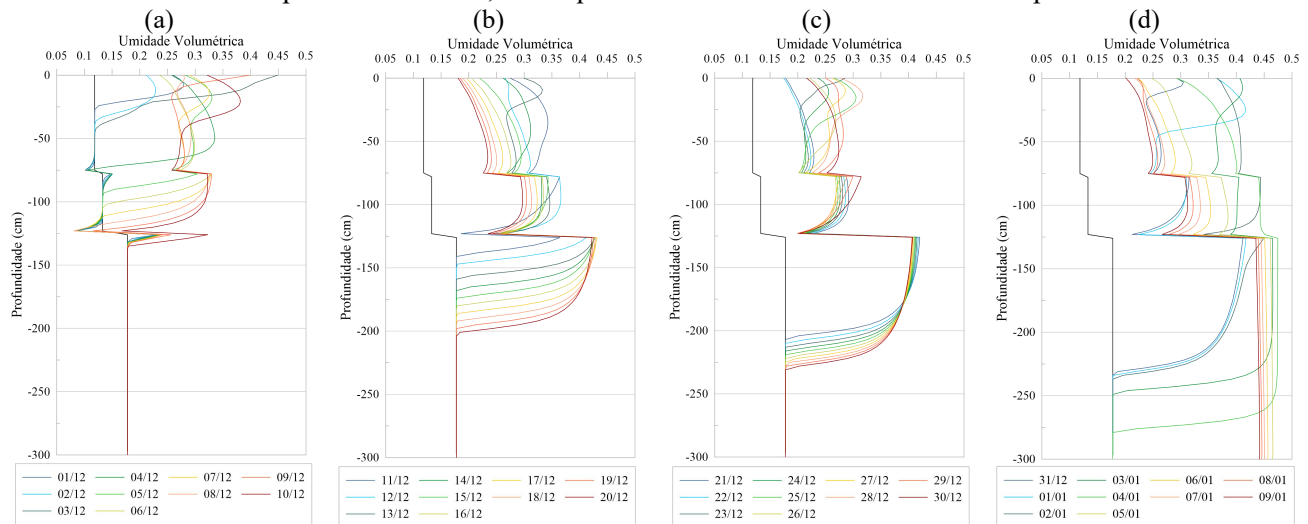


Figura 1. Gráfico umidade x profundidade para U1 nos períodos: (a) 01/12 até 10/12; (b) 11/12 até 20/12; (c) 21/12 até 30/12; e (d) 31/12 até 09/01 na condição seca. Fonte: Autores.

Quando comparada com a condição inicial úmida (Figura 2) a redistribuição da água respeita os mesmos padrões da condição seca, entretanto a frente de molhamento avança mais rapidamente. Altos valores de umidade são atingidos em menores tempos uma vez que a infiltração é facilitada devido a maior presença de água nos poros a qual eleva a condutividade hidráulica do material e influencia diretamente na taxa de infiltração (DINGMAN, 2015).

Nota-se que, quando o solo encontra-se inicialmente úmido a frente de molhamento alcança a SR1 um dia antes do que na situação seca, quatro dias antes quando se trata da SR2 e dezenove dias antes na base do perfil simulado, em 3 m de profundidade. O que indica que a condição inicial do solo, anteriormente a um evento de precipitação pode condicionar ou acelerar uma ruptura. O mesmo pode ser ponderado para a chuva antecedente ao evento principal de precipitação. Os escorregamentos observados na área de estudo ocorreram entre os dias 01 e 04 de janeiro de 2000. Entretanto, os gráficos mostram, para as duas condições de umidade inicial, que as chuvas do mês de dezembro foram responsáveis pelo umedecimento prévio dos materiais inconsolidados, de forma que na data do evento principal de precipitação encontravam-se já com umidade elevada. Nesse sentido, um mesmo evento de precipitação pode ou não induzir um MMG, dependendo dos eventos anteriores e de como ocorreu o processo de redistribuição da água no perfil.

(a)

(b)

(c)

(d)

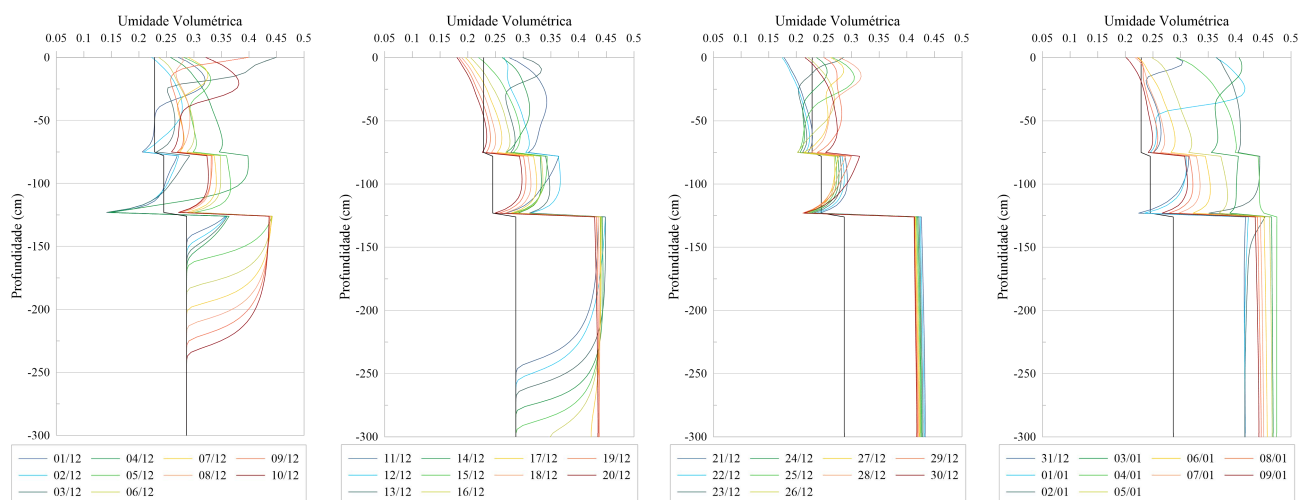


Figura 2. Gráfico umidade x profundidade para U1 nos períodos: (a) 01/12 até 10/12; (b) 11/12 até 20/12; (c) 21/12 até 30/12; e (d) 31/12 até 09/01 na condição úmida. Fonte: Autores.

Em relação à Unidade 4, os gráficos apresentados na Figura 3 mostram que a redistribuição da água no perfil geológico apresenta o comportamento oposto ao que foi observado na Unidade 1. Em 1,50 m de profundidade, onde ocorre o contato entre os materiais II-R e V-S, segunda potencial SR, há a elevação da umidade volumétrica na base da camada II-R concomitantemente à redução da umidade no topo da camada V-S. Esse comportamento resulta na elevação da umidade volumétrica em toda camada II-R do início ao fim do tempo simulado, O que causa a queda no valor da coesão desse material e, consequentemente, afeta a estabilidade das vertentes dessa unidade de material inconsolidado.

Ao analisar as pressões e o fluxo da água ao longo do perfil (Figura 4), entende-se que nesta profundidade desenvolveu-se o fenômeno de capilaridade, no qual a água flui da camada V-S, onde a pressão é maior, em direção à camada II-R, onde a pressão é inferior aos demais materiais. O material II-R é composto principalmente por solo de fração fina (33% argila e 28% silte) enquanto o material V-S tem quase metade da sua massa formada por areia (45%), essa diferença de textura justifica a formação de uma barreira capilar de acordo com Morel-Seytoux (1993).

De forma análoga à Unidade 1, no cenário úmido da Unidade 4 a redistribuição da água ocorre da mesma forma que o cenário seco, entretanto a água avança mais rapidamente. Nessa condição, a frente de molhamento alcança a primeira SR um dia antes, a segunda SR oito dias antes e a base do perfil vinte e um dias antes do que foi observado na condição seca, como mostra a Figura 5, corroborando com a importância da consideração da umidade inicial nas análises de estabilidade de talude.

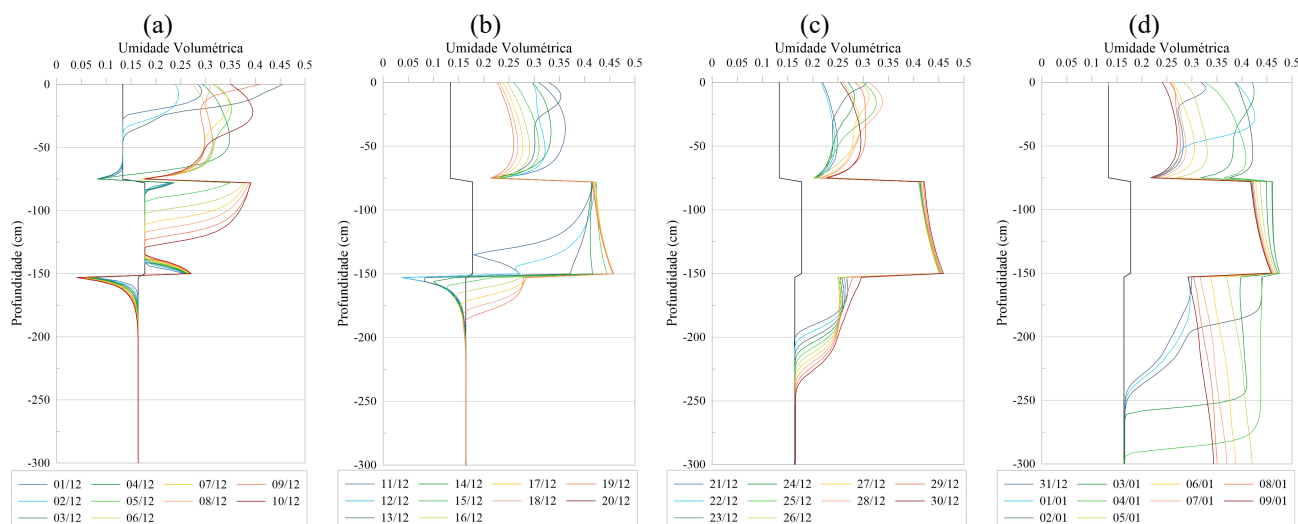


Figura 3. Gráfico umidade x profundidade para U4 nos períodos: (a) 01/12 até 10/12; (b) 11/12 até 20/12; (c) 21/12 até 30/12; e (d) 31/12 até 09/01 na condição seca. Fonte: Autores.

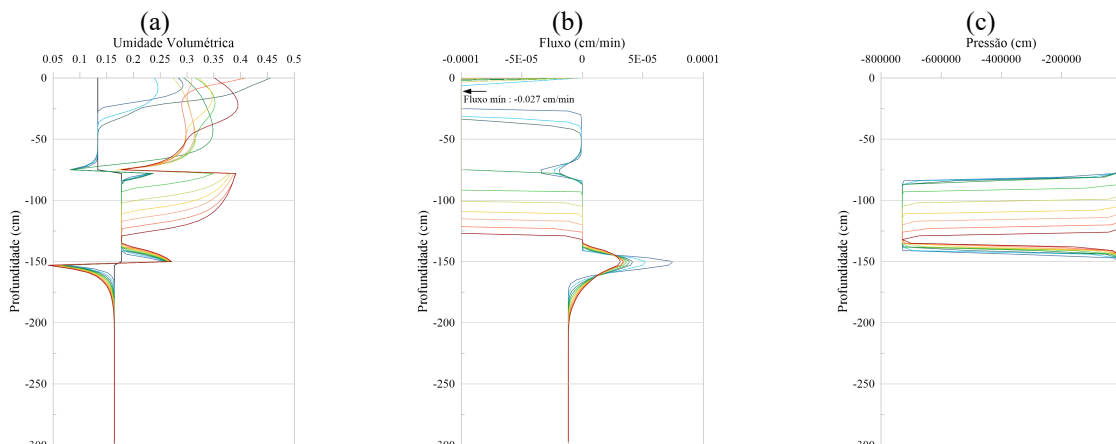


Figura 4. Variação ao longo da profundidade da (a) Umidade volumétrica; (b) Fluxo, e (c) Pressão para Unidade 4 na condição seca entre 01/12 até 10/12. Fonte: Autores.

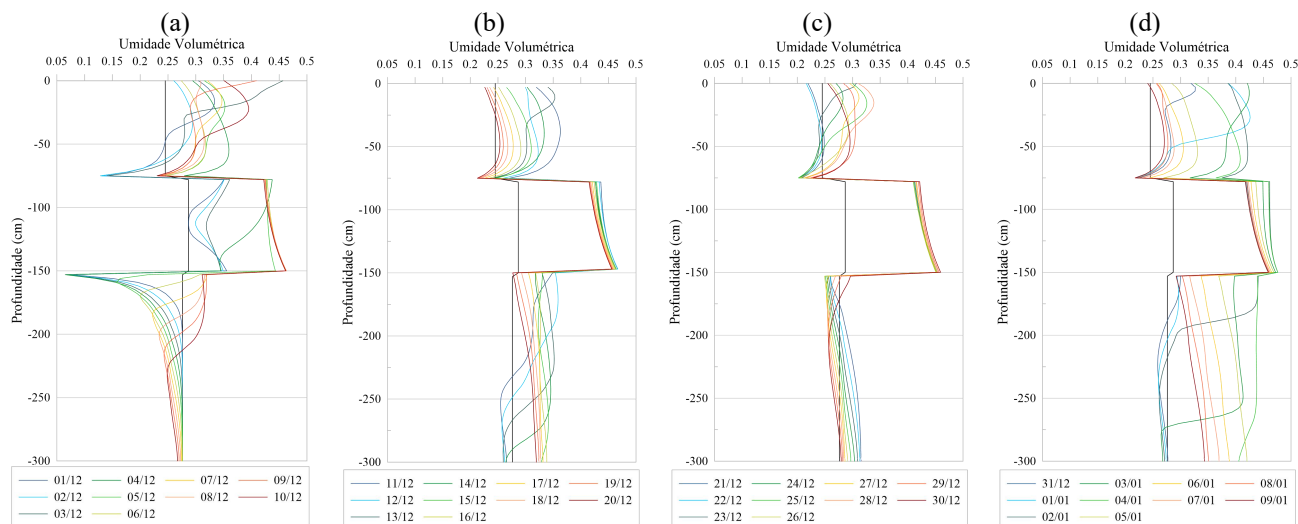


Figura 5. Gráfico umidade x profundidade para U4 nos períodos: (a) 01/12 até 10/12; (b) 11/12 até 20/12; (c) 21/12 até 30/12; e (d) 31/12 até 09/01 na condição úmida. Fonte: Autores.

Diante dos resultados obtidos, percebe-se que a umidade volumétrica ao longo de um perfil geológico varia consideravelmente não só em função da chuva, mas principalmente em função dos materiais inconsolidados que compõe o perfil estratigráfico. Consequentemente, essa variação afeta a coesão dos materiais, como mostra a Figura 6. A variação da coesão é um reflexo da variação da umidade volumétrica, entretanto quando a umidade atinge valores muito elevados a coesão reduz consideravelmente para todos os materiais inconsolidados analisados, de forma que os valores convergem para um mesmo valor entre 1 e 3 kPa. Isso pode ser observado entre os dias 30 e 35 no gráfico da condição seca, quando a coesão dos materiais VI-A da Unidade 1 e I-R da Unidade 4 atingem os menores valores. Além disso, é possível observar que as maiores variações entre os dois cenários de umidade inicial ocorrem nos primeiros dias de simulação, logo após os valores de coesão se aproximam. Isso demonstra o papel da chuva antecedente de umedecer o solo previamente ao evento principal de precipitação, responsável pelo desencadeamento de MMG.

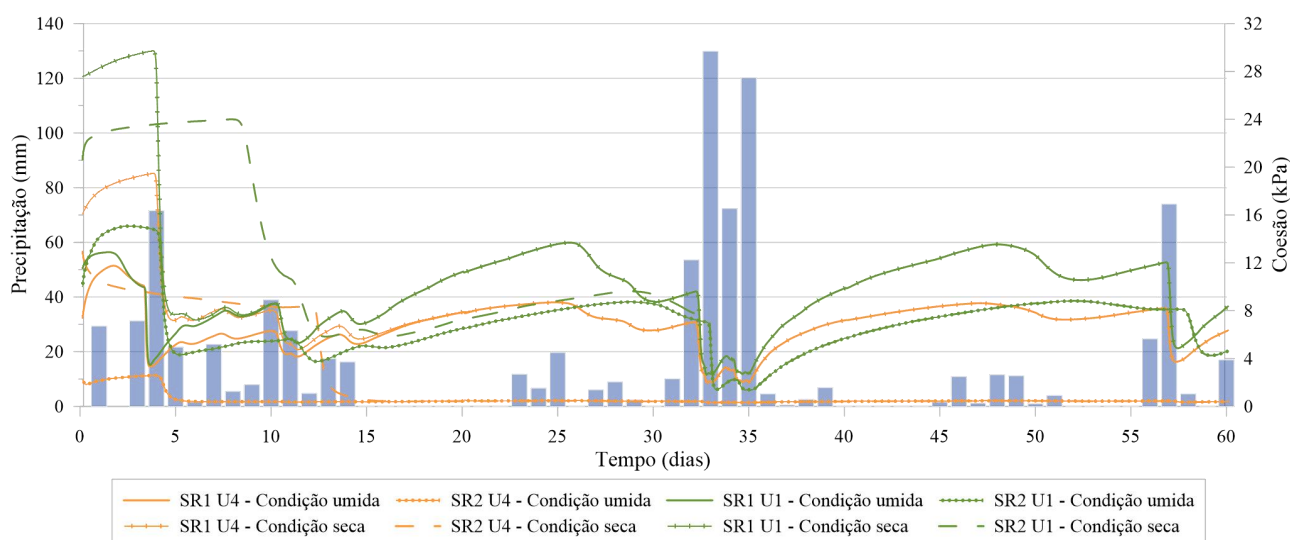


Figura 6. Variação da coesão durante o tempo simulado. Fonte: Autores.

No que tange o tempo de ruptura das vertentes, foi estimado o FS para uma encosta com declividade de 40° por representar parte das vertentes mais críticas das áreas de estudo. Os valores de ângulo de atrito dos materiais VI-A, I-R e II-R são respectivamente 29° , 30° e 28° , obtidos em Silva (2009). Durante o tempo simulado os valores de FS estimados variam de forma semelhante à variação da coesão uma vez que, com exceção do peso específico natural, o qual também é função da umidade volumétrica, os demais parâmetros são fixos. Nesse sentido os resultados obtidos indicam instabilidade apenas para a segunda SR da Unidade 4, com menor tempo de ruptura para a condição úmida.

Nesse sentido, é possível observar a influência do perfil estratigráfico na estabilidade de talude. A presença de uma espessa camada de material de textura mais fina afeta o fluxo da água com o desenvolvimento de uma barreira capilar. O acréscimo da umidade nessa profundidade reduz rapidamente a coesão e induz a ruptura da vertente logo nos primeiros dias de simulação. Isso evidencia a importância da investigação geológica-geotécnica detalhada durante análises de estabilidade de talude pois permite o conhecimento dos materiais que compõem a encosta.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos destacam que os diferentes materiais que compõem um perfil geológico influenciam na redistribuição da água da chuva infiltrada. De forma geral, a umidade dos materiais inconsolidados varia de acordo com a intensidade da chuva, porém nas profundidades de contato entre diferentes camadas foram observados dois comportamentos distintos. No perfil formado por materiais mais granulares foi desenvolvido um patamar de redução da umidade nos limites entre as diferentes camadas devido ao processo de drenagem gravitacional. Por outro lado, no perfil que possui camada de material de textura mais fina foi observado a formação de uma barreira capilar devido a diferença da textura e das propriedades hidráulicas dos materiais. Como consequência, a camada de material fino mantém-se elevada durante todo o tempo simulado o que afeta a coesão desse material e a estabilidade da encosta. A estimativa do FS para uma vertente com declividade de 40° demonstra que o tempo de ruptura é menor para a Unidade 4, na qual foi observado esse fenômeno.

Além disso, merece destaque a consideração de dois cenários para a umidade inicial e da chuva antecedente nas simulações de infiltração. Os resultados mostram que o cenário úmido inicial afeta a velocidade do avanço da frente de molhamento, fazendo com que maiores profundidades atinjam valores mais elevados de umidade em menor tempo. Já a chuva antecedente apresentou papel fundamental no umedecimento prévio dos materiais colaborando para a ruptura induzida pelo evento principal de precipitação. Nesse sentido, um evento de precipitação pode ser responsável pela ruptura de uma vertente dependendo das condições em que esse material se encontra antes do início da chuva.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsa, essencial para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahrendt, A. *Movimentos de Massa Gravitacionais - Proposta de um Sistema de Previsão: Aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP.* (2005) Tese de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP
- Arruda, F. B.; Zul Lo, J.; Oliveira, J. B. (1987) Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 11, p. 11- 15.
- Dingman, S. L. *Physical Hydrology*. 3 ed. Long Grove: Waveland Press, 2015.
- Enoki, M.; Kokubu, A. A.; Ikeda, Y. (1999) Infiltration of rainwater and slope failure. In: Griffiths, Stokes; Thomas (eds) *Landslides*. Balkema, Rotterdam. p. 27-35.
- He, Y.; Yu, Z.; Zhang, Z.; Chen, B.; Zhang, K. (2022) Effects of Rainfall on Mechanical Behaviors of Residual-Soil Landslide. *Frontiers in Earth Science*, 10.
- Matsushi, Y.; Matsukura, Y. (2006) Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, p. 449-455.
- Mendes, R. M.; Andrade, M. R. M.; Tomasella, J.; Moraes, A. E.; Scofield, G. B. (2018) Understanding shallow landslide in Campos do Jordão municipality - Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. *Natural Hazards and Eartg System Sciences*, 18, p. 15-30.
- Orel-Seytoux, H. J.(1993) Capillary Barrier at the Interface of Two Layers. In: Russo, D.; Dagan, G. (eds.) *Water Flow and Solute Transport in Soils: Developments and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, p.136-15.
- Silva, A. F. (2009) *Estudo de previsão de escorregamento a partir do fator de segurança 3D: Campos do Jordão-SP*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP
- Veihmeyer, F. J.; Hendrickson, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil Science*, v. 68, n. 1, p. 75-94, 1949.
- Zhang, L. L.; Zhang, J.; Zhang, L. M.; Tang, W. H. (2011) Stability analysis of rainfallinduced slope failure: a review. *Geotechnical Engineering*, 164, p. 299-316.
- Zonta, J. H.; Bezerra, J. R C.; Pereira, J. R.; Sofiatti, V. Manejo da Irrigação do Algodoeiro. *Circular Técnica*, v. 139, 2016.