

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/254

## Um Estudo Numérico da Influência de Fraturas no Regime de Fluxo em Taludes

Tamires da Silva Campos

Engenheira Geotécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, tamiresscamos@gmail.com

Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Professor Pesquisador, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, vargas@puc-rio.br

Raquel Quadros Velloso

Professora Pesquisadora, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, raquelveloso@puc-rio.br

**RESUMO:** A instabilidade de taludes está relacionada, muitas vezes, ao aumento das pressões de água nos meios porosos e/ou fraturados, como também na região de interface entre solo e rocha. A água tende a percorrer caminhos preferenciais favorecidos pela gravidade e pela presença de fraturas nas rochas, sendo o fluxo de águas subterrâneas um processo extremamente complexo e heterogêneo. Neste sentido, este trabalho tem como propósito principal contribuir na identificação de propriedades das fraturas e do solo que influenciam no desenvolvimento de poropressões na região de contato entre essas feições, por meio da modelagem numérica, com o software FEFLOW, do fluxo em uma encosta hipotética, composta por maciço rochoso, fratura e camada de solo coluvionar, submetida a eventos pluviométricos de longa e curta duração. Um estudo paramétrico é realizado para determinação da carga de pressão no ponto de interseção da fratura com o solo, em função da abertura da fratura e da permeabilidade do solo. A conectividade de um sistema com mais de uma fratura e processos de infiltração, além de exfiltração, pelas descontinuidades também são estudados. A dinâmica de fluxo em cada caso é apresentada e os resultados mostram que as poropressões na interface são, na maioria das vezes, crescentes com o aumento da abertura da fratura, até que se atinja a carga hidrostática máxima na região, sendo este comportamento menos sensível em solos menos permeáveis, os quais tendem a criar uma resistência à passagem de fluxo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluxo em Meios Porosos, Meios Fraturados, Solos Não-Saturados, Estabilidade de Taludes.

**ABSTRACT:** Slope instability is often related to increased water pressure in porous and/or fractured media, as well as in the interface region between soil and rock. Water tends to follow preferential paths favored by gravity and the presence of fractures in the rocks, with groundwater flow being an extremely complex and heterogeneous process. In this sense, the main purpose of this work is to contribute to the identification of fracture and soil properties that influence the development of pore pressures in the contact region between these features, through numerical modeling, with the FEFLOW software, of the flow on a hypothetical slope, composed of rock mass, fracture and colluvial soil layer, subjected to long and short-term rainfall events. A parametric study is carried out to determine the pressure load at the point of intersection of the fracture with the soil, depending on the fracture opening and soil permeability. The connectivity of a system with more than one fracture and infiltration processes, in addition to exfiltration, through discontinuities are also studied. The flow dynamics in each case are presented and the results show that the pore pressures at the interface are, in most cases, increasing with the increase in the fracture opening, until the maximum hydrostatic load in the region is reached, this behavior being less sensitive. in less permeable soils, which tend to create resistance to flow passage.

**KEYWORDS:** Flow in Porous Media, Fractures, Unsaturated Soil, Slope Stability.

## 1 INTRODUÇÃO

Precipitações de alta intensidade e de longa duração são conhecidas por serem gatilhos importantes de escorregamentos de encostas, os quais causam inúmeros problemas de ordem sócio-econômica e ambiental. Devido a incertezas geológicas, geotécnicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, normalmente é muito difícil prever como e quando um deslizamento pode ocorrer a partir apenas da observação do estado atual do talude.

A infiltração da água de chuva em terrenos íngremes gera um aumento na poropressão do solo, o que reduz a tensão efetiva e, conseqüentemente, resulta na redução da resistência ao cisalhamento do solo (IVERSON, 2000; LAMBE & WHITMAN, 1969). Esses fatores podem induzir a ruptura do taludes, como observado repetidamente na cidade do Rio de Janeiro e em outras regiões montanhosas do estado do Rio de Janeiro (GERSCOVICH et al., 2006) e do mundo (EVERETT, 1979; KOSUGI et al., 2006; MATHEWSON; JEFFREY; SANTI, 1990; ONDA et al., 2004).

Muitos estudos de estabilidade de talude concentram-se em processos hidrológicos que ocorrem na camada do solo e assumem que o maciço rochoso é um limite quase impermeável abaixo da camada do solo (BEVEN; GERMANN, 1982; WANG; SASSA, 2003). O leito rochoso permeável, incluindo processos de percolação profunda ou exfiltração (saída de água do meio), geralmente não é levado em consideração em modelos de estabilidade de taludes, o que pode levar a grande erros na avaliação do desenvolvimento de poropressões na interface solo-rocha (MEERVELD & WEILER, 2008; VARGAS et al., 1990). A ocorrência de fluxo de água subterrânea através do maciço rochoso fraturado durante eventos chuvosos é um processo comum (MCDONNELL, 2003) que contribui diretamente no regime de fluxo subsuperficial e na instabilidade de taludes (KOSUGI et al., 2006; ONDA et al., 2004).

O maciço rochoso fraturado pode atuar como sumidouro ou como fonte para a dinâmica das águas subterrâneas, dependendo da condutividade hidráulica da litologia, do grau de fraturamento, da presença de macroporos, da carga hidráulica e do grau de saturação (BRONNIMANN et al., 2013).

O processo de exfiltração de água pelo maciço rochoso é controlado pela duração e intensidade de precipitações de curto e longo prazo (MONTGOMERY et al., 2002; UCHIDA et al., 2003). Observações realizadas por Uchida et al. (2002) mostram que fortes chuvas combinadas a condições antecedentes úmidas formam um cenário favorável para que ocorra saída de água do maciço fraturado em direção a camada de solo que o sobrepõe. Dessa forma, além do aumento de poropressão no solo decorrente da infiltração de chuva em contato direto com a superfície do solo do talude, há também um aumento de poropressão do solo ao redor da região fraturada em função da saída de água pelo maciço rochoso.

Por sua vez, quando há a infiltração de água para dentro de fraturas presentes no maciço rochoso, pode haver a formação de aquíferos confinados rasos (BRONNIMANN et al., 2013) que podem induzir pressões excessivas nos poros ou mesmo contribuir na descarga em outro ponto à montante do talude.

Ambos os processos de exfiltração e infiltração podem resultar em deslizamentos de taludes (EVERETT, 1979; MATHEWSON et al., 1990). Como explicitado por Vieira (2004), frequentemente são observadas cicatrizes de deslizamento no limite entre a camada de tálus/colúvio ou de solo residual maduro e o leito rochoso fraturado. Assim, torna-se necessário o melhor entendimento do fluxo em meios fraturados e do estado de poropressões gerados no contato entre a região da fratura e o solo saturado ou parcialmente saturado sobreposto ao maciço rochoso.

Diante do exposto, neste artigo, é realizado um estudo numérico paramétrico para análise da influência de fraturas no regime de fluxo de taludes, com ênfase na interface entre maciço fraturado e solo, a partir de modelos hipotéticos de encosta analisados com o auxílio do software FEFLOW. A carga de pressão na interface é determinada em função da abertura da fratura e da permeabilidade do solo e o regime de fluxo é avaliado em cada caso. A conectividade de um sistema com mais de uma fratura e processos de infiltração, além de exfiltração, pelas descontinuidades também são estudados.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Caso histórico

A cidade do Rio de Janeiro apresenta relevo acidentado e clima tropical. Os processos intempéricos que ocorrem na litologia geram os solos residuais e coluvionares. Um grande problema associado ao Rio de Janeiro

são os movimentos de massa, alguns deles catastróficos, como os ocorridos em 1966/67, 1976, 1988, 1996, 2010 e 2019. Estes movimentos são dos mais variados tipos, dentre eles, translacionais rasos, rotacionais ou grandes corridas de detritos. Ao longo dos anos tem-se estudado que a maioria dos movimentos de massa da cidade do Rio de Janeiro estão relacionados à perda de sucção mátrica do solo (DELGADO, 1993 apud SOARES, 1999).

Em 1988, uma série de escorregamentos em taludes compostos por solos residuais e coluvionares ocorreram próximos à Vista Chinesa, no Rio de Janeiro. Essa área está situada dentro do Parque Nacional da Tijuca, na vertente marítima da Serra da Carioca, que juntamente com a Serra da Tijuca, compõem o Maciço da Tijuca, localizado a sudoeste do município do Rio de Janeiro.

As bacias hidrográficas dessa região, por apresentarem altas declividades e densidade de eixos de concavidade, possuem alta eficiência de escoamento e estão associadas a maior tendência de deslizamentos (FERNANDES, 2006 apud SOMBRA, 2021). Parte da drenagem acontece pelas falhas, fraturas e juntas de alívio, as quais influenciam o intemperismo das rochas.

A estação pluviométrica considerada como fonte dos índices pluviométricos na região dos escorregamentos é a estação Capela Mayrink (código ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico: 2243239), localizada no Parque Nacional da Tijuca, nas coordenadas -22°57'28" S e -43°16'40" W, altitude de 460 m.

A distribuição de precipitação diária acumulada em fevereiro de 1988 é apresentada na Figura 1. No período, cujo acumulado do mês chegou a 967,7 mm, ocorreram alturas pluviométricas diárias superiores a 60 mm nos dias 3, 5, 12, 19, 20, 21 e 22, chegando-se a registrar no dia 20 de fevereiro um valor de 177,6 mm de precipitação. É possível observar também que, no período de 19 a 23 de fevereiro, a soma da concentração pluviométrica diária atingiu 465,40 mm, ou seja, quase 50% do total acumulado das chuvas para aquele mês. Ressalta-se que os acidentes registrados na região da Vista Chinesa ocorreram entre os dias 18 e 22 de fevereiro de 1988.

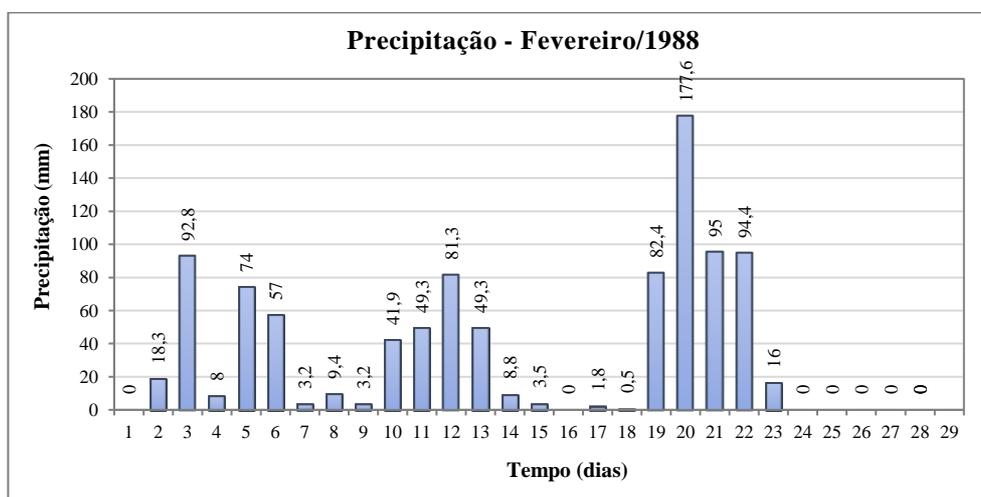


Figura 1. Precipitação diária (mm) em fevereiro de 1988.

## 2.2 Análise de Fluxo

Com o objetivo de compreender o regime de fluxo no maciço rochoso e no solo, foram desenvolvidos dois modelos geométricos hipotéticos característicos da região. Para realização da modelagem hidrogeológica e avaliação do regime de fluxo por meio de um estudo paramétrico, foram definidas, inicialmente, as condicionantes geológicas fixas – geometria da seção geológico-geotécnica do talude representativo, quantidade de fraturas e propriedades dos meios porosos (com exceção da condutividade hidráulica, a qual varia). Adicionalmente, foram definidos os condicionantes hidráulicos como área e processos de recarga e descargas, sendo variável o nível d'água e as condições de fluxo.

Para a realização da análise de fluxo associadas ao presente trabalho, foram consideradas as relações sucção umidade obtidas por Delgado (1993). Os parâmetros referentes às equações do modelo de Van

Genuchten para solos não saturados, utilizados como valores de entrada no FEFLOW, estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de entrada utilizados no FEFLOW - solo.

$\alpha$ (m <sup>-1</sup> )	n	K <sub>Sat</sub> (m/s)	S <sub>r</sub>	S <sub>s</sub>	n (porosidade)
4,71	2,87	1.2E-5 e 1.2E-6	0,6367	1	0,256

Para o maciço rochoso, foram utilizados os valores *default* do programa, considerando um material de baixíssima permeabilidade, de forma a representar que o fluxo que percorre as fraturas não se disperse pelo meio rochoso. O valor de permeabilidade adotado, bem como os outros parâmetros utilizados para o maciço rochoso estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de entrada utilizados no FEFLOW - maciço rochoso.

$\alpha$ (m <sup>-1</sup> )	n	K <sub>Sat</sub> (m/s)	S <sub>r</sub>	S <sub>s</sub>	n (porosidade)
4,75	2,8	1.0E-13	0,6	1	0,2

De forma geral, o estudo de fluxo em um meio que contém um sistema de fraturas requer o entendimento os mecanismos que controlam o fluxo por uma única fratura. Dessa forma, foi realizada a análise, por meio da modelagem numérica, com o software FEFLOW, do fluxo em uma encosta hipotética, composta por maciço rochoso, fratura e camada de solo coluvionar, submetida a eventos pluviométricos curta duração. Um estudo paramétrico é realizado para determinação da carga de pressão no ponto de interseção da fratura com o solo, em função da abertura da fratura e da permeabilidade do solo. A conectividade de um sistema com mais de uma fratura e processos de infiltração, além de exfiltração, pelas descontinuidades também foram avaliados.

Os modelos desenvolvidos para representação do maciço rochoso com a presença de uma fratura e com um sistema de fraturas estão apresentados na Figura 2. O modelo hipotético com presença de fratura paralela á superfície do terreno e juntas de alívio que contribuem na condução da recarga pelo maciço rochoso representa uma encosta comumente encontrada no Rio de Janeiro.

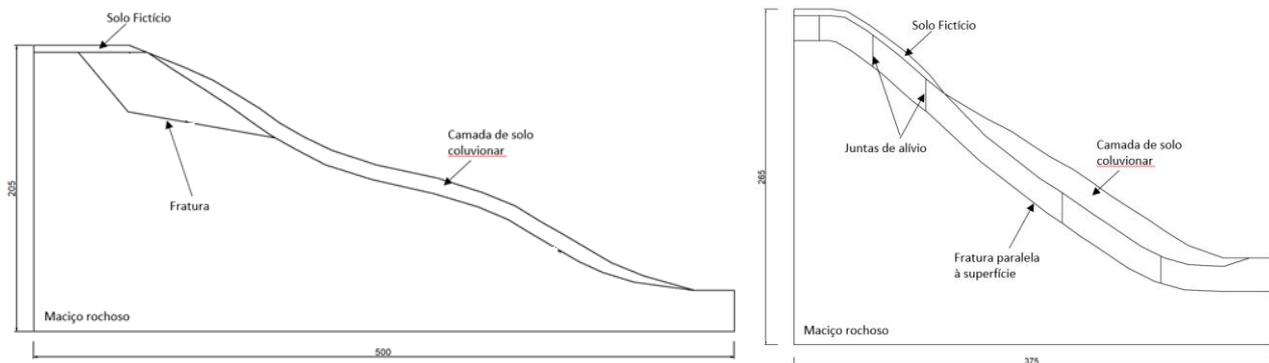


Figura 2. Modelo Hipotético desenvolvido para representação de uma fratura e de um talude com sistema sistema de fraturas (juntas de alívio). Dimensões em metros. Fonte: Autores (2024).

Quanto à condição inicial no talude foi considerada carga de pressão constante por todo o modelo, no valor de  $\psi = -10$  kPa. Foi realizado um *spin-up* de 365 dias de precipitação para calibração da condição inicial do modelo. Para simular uma condição de chuva intensa, assumiu-se que a superfície do topo do talude (região identificada como solo fictício) satura imediatamente, mantendo-se assim uma poropressão nula à superfície, constante ao longo da análise. Não foram consideradas evaporação e influência da vegetação nos valores de precipitação utilizados. Ao longo do talude, considerou-se os valores de precipitação registrados na Estação Capela Mayrink apresentados na Figura 1 para o talude com apenas 1 fratura. Para o talude com juntas de alívio, por ser um sistema mais complexo e para permitir uma visualização mais clara do regime de fluxo, considerou-se o abastecimento do sistema pela recarga constante no topo. A cada iteração verificou-se o valor da carga de pressão nestes nós. No caso da carga de pressão ser maior ou igual a zero, a condição de vazão

imposta foi transformada em carga imposta ( $h = 0$ ). Na Figura 3, estão representadas as condições iniciais e de contorno adotadas para os taludes hipotéticos estudados neste trabalho.

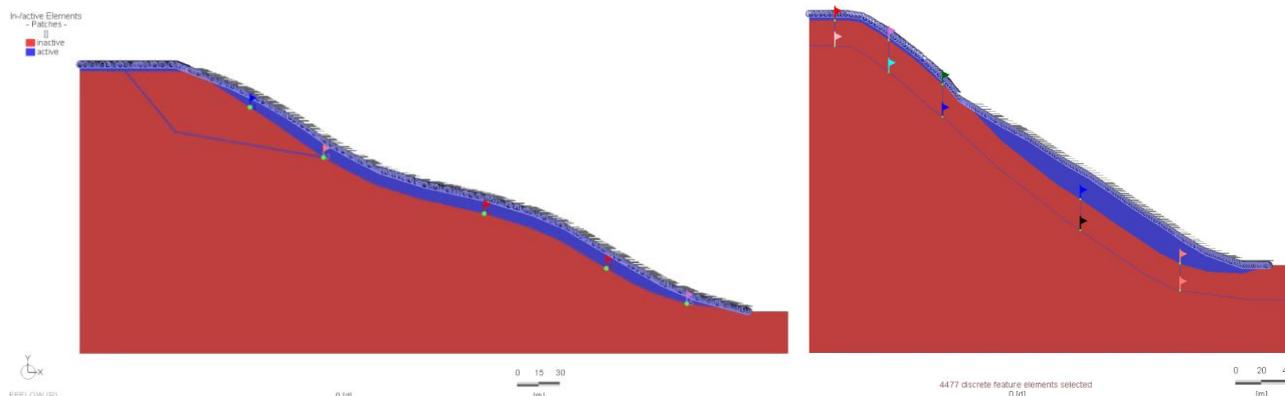


Figura 3. Condições Iniciais e de Contorno – Talude com uma fratura e de um talude com sistema sistema de fraturas (juntas de alívio). Fonte: Autores (2024).

Definidas as condições, foi realizado um estudo paramétrico para determinação da carga de pressão no ponto de interseção da fratura com o solo, em função da abertura da fratura e da permeabilidade do solo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando o cenário de presença de apenas uma fratura, foram realizadas análises variando a abertura da fratura, a citar: 0,5mm, 1,0mm, 5,0mm e 10,0mm. Ademais, foi avaliada a influência da condutividade hidráulica ( $k$ ) do solo no desenvolvimento de poropressão na interface solo-rocha, sendo analisados os valores apresentados na Tabela 1 ( $1,2E-5$  m/s e  $1,2E-6$  m/s). Na Figura 4 e Figura 5, são apresentados, para o cenário de talude com uma única fratura, os resultados obtidos nas análises realizadas após o *spin-up* de 365 dias, para cada abertura de fratura, para os solos com permeabilidade de  $k=1,2E-5$  m/s e  $k=1,2E-6$  m/s, respectivamente.

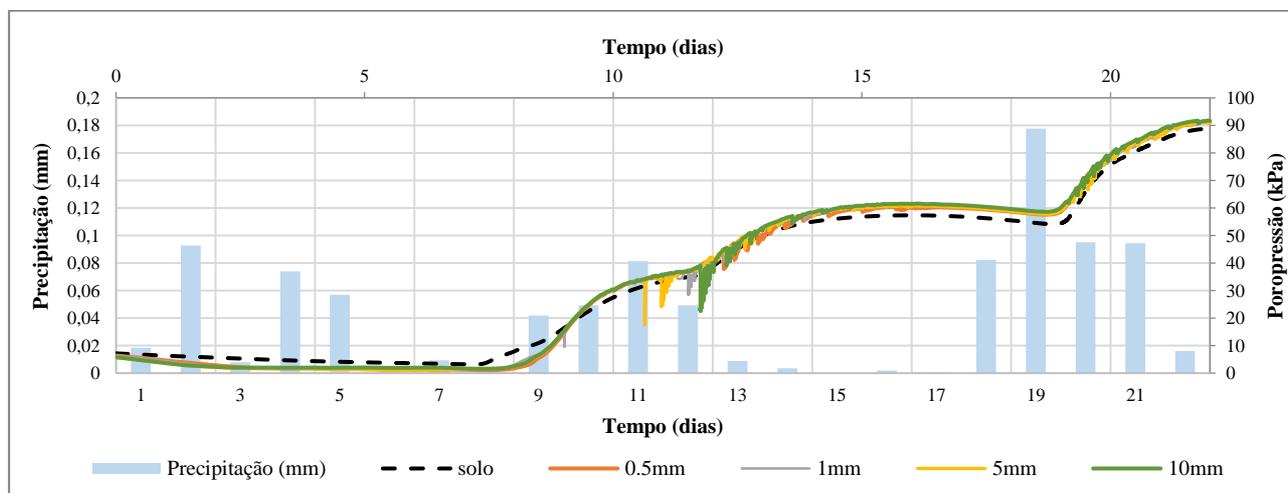


Figura 4. Variação da poropressão na interface - 1 fratura –  $k=1,2E-5$  m/s - Ponto de observação P2. Fonte: Autores (2024).

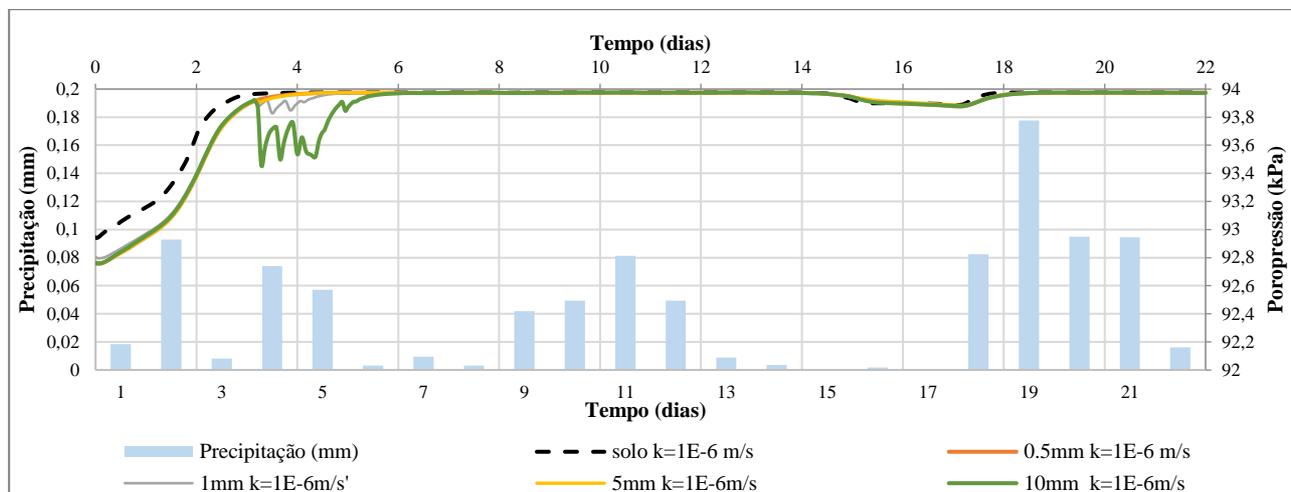


Figura 5. Variação da poropressão na interface -1 fratura –  $k=1,2E-6$  m/s - Ponto de observação P2. Fonte: Autores (2024).

Em nenhuma análise, considerando a recarga e geometria definida para condição de maciço rochoso com presença de uma fratura, há a contribuição de recarga no solo pela fratura. A condição de precipitação não é suficiente para saturação da fratura. Assim, nessas análises foi avaliado o processo de infiltração – fluxo de fora para dentro da fratura.

Como observado na Figura 4 e Figura 5, a poropressão inicial, após 365 dias, é superior no talude ensaiado sem presença de fraturas, identificado nas figuras como “solo” em linha tracejada. Isso ocorre porque, neste momento, o solo na interface solo-rocha já está saturado e apresenta poropressão positiva, enquanto a fratura ainda está seca. Devido ao gradiente hidráulico gerado, na situação com fratura, a água infiltra para dentro dela, reduzindo a pressão no ponto de interface solo/rocha/fratura.

Para as análises realizadas considerando a condutividade hidráulica do solo equivalente a  $1,2 \times 10^{-5}$  m/s, observa-se que, a partir de 7,5 dias, há um aumento de poropressão na região do ponto de análise devido à elevação do nível freático. Após 9,1 dias, aproximadamente, a carga hidráulica gerada no interior da fratura reflete no aumento de poropressão na região de interface, fazendo com que a poropressão seja superior à observada no talude sem fratura. Quanto à variação da abertura da fratura, observa-se que quanto maior a abertura da fratura, maior a vazão (função da permeabilidade e da abertura) que passa por ela, maior o volume de água dentro dela e maior a pressão na região de interface. No entanto, uma vez que esta poropressão está relacionada à carga hidráulica dentro da fratura, esta variação quanto à abertura não é tão significativa.

Por sua vez, para as análises realizadas considerando a condutividade hidráulica do solo equivalente a  $1,2 \times 10^{-6}$  m/s, a poropressão inicial na região da interface é superior quando comparada àquela encontrada para o solo com  $k=1,2 \times 10^{-6}$  m/s, uma vez que solos menos permeáveis possuem poros menores. Quanto menor os poros, maior a pressão neles e maior a sucção necessária para que haja a movimentação de fluxo naquela região, no caso de um período de estiagem. Uma vez que a pressão nesta região já é próxima ou igual à pressão hidrostática, não há variação significativa de poropressão quanto ao aumento da abertura da fratura.

Como mencionado no item 2, foi considerado também o cenário de um talude com um sistema de fraturas (juntas de alívio). Foram realizadas análises variando a abertura da fratura, a citar: 0,5m e 1,0mm, e foi avaliada a influência da condutividade hidráulica do solo ( $k=1,2E-5$  m/s e  $k=1,2E-6$  m/s) no desenvolvimento de poropressão na interface solo-rocha. Na Figura 6, são apresentados, para o cenário de talude com sistema de fraturas, os resultados obtidos nas análises realizadas após o *spin-up* de 365 dias, para cada abertura de fratura, para os solos com permeabilidade de  $k=1,2E-5$  m/s e  $k=1,2E-6$  m/s, respectivamente.

Conforme Figura 6, percebe-se que, quanto maior a abertura da fratura, maior a permeabilidade da fratura, maior a velocidade, e, conseqüentemente, menor o tempo necessário para chegada da frente de saturação no contato com o solo. Além disso, a vazão (função de permeabilidade e abertura) que passa pela fratura é diretamente proporcional à abertura dela. Maiores vazões geram maiores poropressões na região de interface solo/rocha/fratura. A pressão no ponto localizado na interface é crescente com o aumento da abertura até que se atinja à pressão máxima referente ao estado permanente.

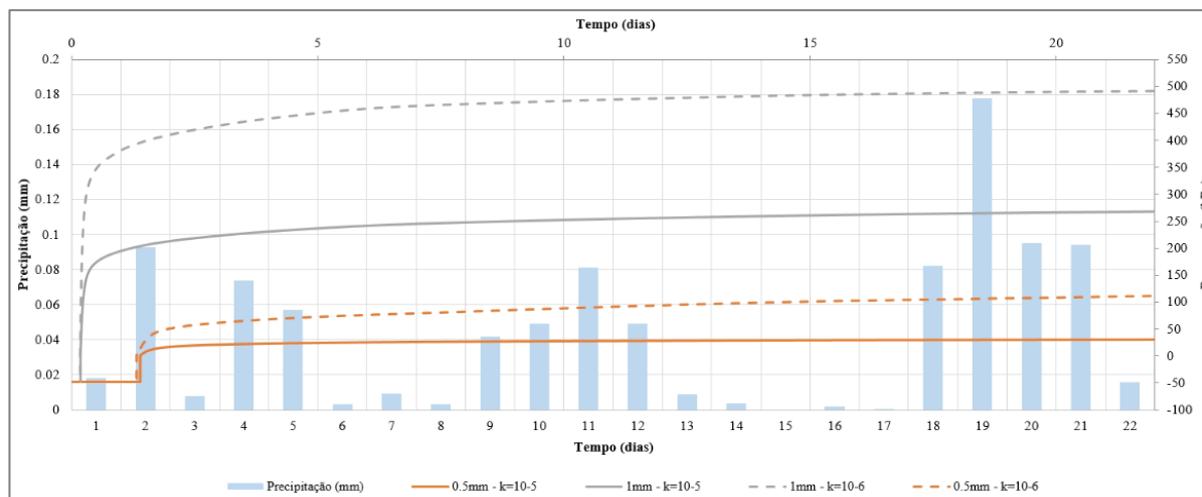


Figura 6. Variação da poropressão na interface – Juntas de alívio – Ponto de observação P2 -  $k=1E-5m/s$  e  $1E-6m/s$ . Fonte: Autores (2024).

Para as análises realizadas considerando a condutividade hidráulica do solo equivalente a  $1,2 \times 10^{-6} m/s$ , observa-se que o ponto localizado na interface solo/fratura atinge a saturação mais rapidamente quando comparado à mesma abertura e  $k=1,2 \times 10^{-5} m/s$ . Isso ocorre pelo fato do solo com menor permeabilidade apresentar poros menores que contribuem para o desenvolvimento de forças de capilaridade. Além disso, a pressão na interface é maior quando considerado solo com condutividade hidráulica de  $1,2 \times 10^{-6} m/s$ , uma vez que solos menos permeáveis são mais resistentes à passagem do fluxo, condição também relacionada ao tamanho dos poros do solo.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises numéricas apresentadas neste artigo expõem a complexidade da modelagem de fluxo de infiltração de chuva em taludes de solo não saturado sotopostos a uma maciço rochoso fraturado. Observa-se que as propriedades das fraturas que mais influenciam o processo de fluxo em taludes são o comprimento e a frequência das fraturas, relacionado à condição geométrica, bem como a abertura delas, e que tanto as características do meio poroso como do fraturado devem ser levadas em consideração, principalmente na região de contato entre os meios. Destacam-se ainda os processos de infiltração e exfiltração que podem ocorrer na interface entre solo e rocha e fratura, os quais estão associados à condição geométrica do talude, frequência e orientação das fraturas, bem como ao volume de recarga do modelo.

Os resultados mostram que há o desenvolvimento de poropressões na interface, as quais são, na maioria das vezes, crescentes com o aumento da abertura da fratura, até que se atinja a carga hidrostática máxima na região, sendo este comportamento menos sensível em solos menos permeáveis, os quais tendem a criar uma resistência à passagem de fluxo. Ainda a respeito da relação entre condutividade hidráulica do solo sotoposto ao maciço rochoso fraturado e as poropressões geradas na interface, constata-se que estas são superiores no caso de solos menos permeáveis, os quais apresentam poros menores quando comparados a solos de maiores condutividade hidráulica.

Os resultados apresentados neste artigo geraram um bom entendimento da dinâmica das águas subterrâneas ao longo das encostas hipotéticas consideradas. No entanto, para trabalhos futuros, sugere-se a completção das análises de fluxo com análises de estabilidade, de forma a estimar a pressão da água nas fraturas do leito rochoso necessária para desestabilização do talude e qual a intensidade e duração da chuva seriam necessárias para atingir essa pressão crítica da água nos poros.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das pesquisas desenvolvidas no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bronnimann, C., Stahli, M., Schneider, P., Seward, L., & Springman, S. (2013). Bedrock exfiltration as a triggering mechanism for shallow landslides. *Water Resources Research*, 49(9), 5155–5167. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20386>
- Delgado, C. W. C. (1993). *Resistência ao Cisalhamento dos Solos Coluvionares e Residuais Não Saturados da Vista Chinesa*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Everett, A. G. (1979). Secondary permeability as a possible factor in the origin of debris avalanches associated with heavy rainfall. *Developments in Water Science*, 12(C), 347–354. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(09\)70025-5](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(09)70025-5)
- Fernandes, M. C.; Avelar, A. S.; Coelho Netto, A. L. (2006). Domínios Geohidroecológicos do Maciço da Tijuca/RJ. *Anuário Do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso)*, 122–148.
- Gerscovich, D. M. S., Vargas, E. A., & de Campos, T. M. P. (2006). On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil. *Engineering Geology*, 88(1–2), 23–40. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.008>
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36(7), 1897–1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Kosugi, K., Katsura, S., Katsuyama, M., & Mizuyama, T. (2006). Water flow processes in weathered granitic bedrock and their effects on runoff generation in a small headwater catchment. *Water Resources Research*, 42(2). <https://doi.org/10.1029/2005WR004275>
- Lambe, T. W., & Whitman, R. v. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- MATHEWSON, C. C., JEFFREY, R. K., & SANTI, P. M. (1990). Role of bedrock groundwater in the initiation of debris flows and sustained post-flow stream discharge. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, XXVII(1), 73–83.
- McDonnell, J. J. (2003). Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological Processes*, 17(9), 1869–1875. <https://doi.org/10.1002/HYP.5132>
- Meerveld, I. T. van, & Weiler, M. (2008). Hillslope dynamics modeled with increasing complexity. *Journal of Hydrology*, 361(1–2), 24–40. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.07.019>
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., & Hefner, J. T. (2002). *Piezometric response in shallow bedrock at CB1: Implications for runoff generation and landsliding*. <https://doi.org/10.1029/2002WR001429>
- Onda, Y., Tsujimura, M., & Tabuchi, H. (2004). The role of subsurface water flow paths on hillslope hydrological processes, landslides and landform development in steep mountains of Japan. *Process*, 18, 637–650. <https://doi.org/10.1002/hyp.1362>
- Soares, A. P. A. L. (1999). *Avaliação Do Mecanismo De Ruptura Em Solo Não Saturado Da Encosta Da Vista Chinesa*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Sombra, Y. B. da S. (2021). *Cartografia Geomorfológica e Geodiversidade Aplicada ao Geoturismo do Parque Nacional da Tijuca (RJ)*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Uchida, T., Asano, Y., Ohte, N., & Mizuyama, T. (2003). Seepage area and rate of bedrock groundwater discharge at a granitic unchanneled hillslope. *Water Resources Research*, 39(1). <https://doi.org/10.1029/2002WR001298>
- Uchida, T., Kosugi, K., & Mizuyama, T. (2002). Effects of pipe flow and bedrock groundwater on runoff generation in a steep headwater catchment in Ashiu, Central Japan. *Water Resources Research*, 38(7), 24-1-24–14. <https://doi.org/10.1029/2001WR000261>
- Vargas, E. A., Velloso, R. C., de Campos, T. M. P., & Costa Filho, L. M. (1990). Saturated-unsaturated analysis of water flow in slopes of Rio de Janeiro, Brazil. *Computers and Geotechnics*, 10(3), 247–261. [https://doi.org/10.1016/0266-352X\(90\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0266-352X(90)90038-W)
- Vieira, B. C., & Fernandes, N. F. (2004). Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes*, 18(4), 791–805. <https://doi.org/10.1002/HYP.1363>
- Wang, G., & Sassa, K. (2003). Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, 69(1–2), 109–125. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00268-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00268-5)