

Avaliação da Estabilidade de Talude sob Diferentes Cenários de Precipitação no Monte Florido, Petrópolis (RJ)

Stefany Cristina Costa Gomes

Mestranda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, stegomes.pea2022@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br

Wagner Nahas Ribeiro

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, wagnernahas@poli.ufrj.br

Maria Carmo Reis Cavalcanti

Professora, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, carminhacavalcanti@poli.ufrj.br

RESUMO: A Região Serrana do Rio de Janeiro é altamente suscetível a deslizamentos, em razão da forte pluviosidade, relevo acidentado, condições geológico-geotécnicas e ações antropogênicas nocivas a estabilidade das encostas. Esses fatores resultam em recorrentes deslizamentos translacionais rasos, com graves consequências humanas e materiais, tornando essencial o entendimento desses processos para ações preventivas e corretivas e definição de limiares pluviométricos de alerta. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo modelar e analisar a estabilidade da encosta tendo como caso de estudo o Monte Florido, representando um perfil típico de taludes da região do 1º distrito de Petrópolis (RJ). O perfil geológico é caracterizado, de uma forma geral, por uma camada delgada de solo sobre um maciço fraturado. O estudo realizou análises transientes de fluxo e de estabilidade através de modelagem numérica por método dos elementos finitos usando o software RS2 da Rocscience. Foram avaliadas as condições de estabilidade do talude para diferentes cenários de precipitação de 10, 40 e 90 mm/d, distribuídos em sete (7) estágios de 12 horas cada. Os resultados mostraram que maiores permeabilidades do maciço rochoso aumentam a velocidade da saturação do solo e, conseqüentemente, o aumento de poropressão, antecipando a ruptura do talude. A ruptura ocorreu mais cedo com 90 mm/d e $k=10^{-1}$ m/s, enquanto não houve ruptura em nenhum cenário com $k=10^{-3}$ m/s, destacando a influência da permeabilidade no comportamento do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Modelagem Numérica, Deslizamentos, Percolação.

ABSTRACT: The mountainous region of Rio de Janeiro is highly susceptible to landslides due to intense rainfall, steep topography, geotechnical-geological conditions, and anthropogenic actions harmful to slope stability. These factors result in recurrent shallow translational landslides, with serious human and material consequences, making it essential to understand these processes for preventive and corrective actions and for defining rainfall alert thresholds. In this context, the present study aims to model and analyze slope stability using Monte Florido as a case study, representing a typical slope profile in the first district of Petrópolis (RJ). The geological profile is generally characterized by a thin layer of soil over a fractured rock mass. The study performed transient flow and stability analyses through numerical modeling using the finite element method in the RS2 software by Rocscience. Slope stability conditions were evaluated for different rainfall scenarios (10, 40, and 90 mm/d), distributed over seven (7) stages of 12 hours each. The results showed that higher rock mass permeabilities increase the rate of soil saturation and, consequently, pore pressure buildup, anticipating slope failure. Failure occurred earlier under 90 mm/d with $K = 10^{-1}$ m/s, while no failure was observed in any scenario with $K = 10^{-3}$ m/s, highlighting the influence of permeability on slope behavior.

KEYWORDS: Slope Stability, Numerical Modeling, Landslides, Seepage.

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Petrópolis, localizada na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro, tem sido historicamente afetada por deslizamentos de grande magnitude, resultantes da combinação entre fatores naturais e antropogênicos. A elevada pluviosidade, associada ao relevo acidentado e à ocupação urbana desordenada, torna o município suscetível à ocorrência de deslizamentos, sobretudo em encostas compostas por solos residuais sobre maciços rochosos fraturados (COSTA NUNES *et al.*, 1990). Destaca-se que o deslizamento translacional raso é o tipo de movimento de massa mais frequente na Serra do Mar, onde se insere a região serrana do Rio de Janeiro (LACERDA, 2007; AVELAR *et al.*, 2013).

Esse cenário tem se materializado em desastres sucessivos em Petrópolis, como os de 1988, 2011 e 2022, quando chuvas extremas em curto intervalo deflagraram centenas de deslizamentos, principalmente no 1º Distrito (CEMADEN, 2022). Assim, é fundamental compreender fatores de instabilidade para embasar medidas preventivas e corretivas envolvendo não somente obras de estabilização, mas também sistema de alerta precoce, que depende do conhecimento dos limiares pluviométricos deflagradores de tais eventos.

A avaliação da estabilidade de taludes requer uma abordagem integrada, considerando tanto os condicionantes geomecânicos quanto os hidrológicos. A geometria do talude, a estratigrafia, o grau de fraturamento e a condutividade hidráulica do maciço influenciam diretamente a formação de zonas de saturação e poropressões na interface solo-rocha, regiões críticas que não podem ser identificadas apenas pela topografia superficial (LANNI *et al.*, 2013). Essas poropressões elevam-se durante episódios de chuva, alimentadas pelo fluxo através das descontinuidades da rocha, e reduzem a resistência ao cisalhamento, favorecendo a ocorrência de deslizamentos rasos, mesmo sob precipitações de intensidade moderada (COSTA NUNES *et al.*, 1990). A intensidade e os tipos de parâmetros pluviométricos dos quais depende a deflagração dos deslizamentos variam com as condições geohidrológicas locais (GONZALEZ *et al.*, 2024), sendo, portanto, importante, a modelagem do processo físico para o melhor entendimento da relação entre chuva e o tipo de movimento de massa.

O perfil do Monte Florido, em Petrópolis, evidencia a compartimentação do maciço granítico da Serra dos Órgãos em blocos fraturados. Essas estruturas atuam como condutos preferenciais para o escoamento e armazenamento de água no interior do maciço, possibilitando a ascensão de fluxos e o aumento da poropressão na base do regolito (COSTA NUNES *et al.*, 1990). A condutividade hidráulica de maciços rochosos fraturados é fortemente influenciada pela densidade, continuidade e abertura de suas descontinuidades estruturais (HOEK e BRAY, 1981), sendo um parâmetro chave na análise de estabilidade.

Neste contexto, o presente trabalho avalia a influência da condutividade hidráulica das fraturas, simulada através da adoção de diferentes permeabilidades para o maciço rochoso, na análise da estabilidade de uma encosta típica, o Monte Florido, em Petrópolis (RJ). Foi utilizado o software RS2 para simulações de fluxo transiente e tensão-deformação em um perfil com solo residual delgado sobre rocha fraturada. Três (3) cenários de precipitação (10, 40 e 90 mm/d) foram aplicados para avaliar a variação da geração de poropressões e a, consequente influência, no fator de segurança à estabilidade do talude ao longo do tempo. Avaliou-se também a influência a variação da permeabilidade do maciço, relacionada ao seu grau de fraturamento, na estabilidade.

2 METODOLOGIA

2.1 Etapas de estudo

A metodologia consistiu na criação de um modelo numérico representativo da encosta do Monte Florido, Petrópolis (RJ), com base em dados geotécnicos ajustados ao contexto local. O modelo foi implementado no software RS2, que permite análises bidimensionais acopladas de fluxo transiente e estabilidade. A estabilidade foi avaliada pelo método de Redução da Resistência ao Cisalhamento – SSR (*Shear Strength Reduction*), que reduz progressivamente os parâmetros de resistência até a não convergência, definindo o Fator de Redução de Resistência – SRF (*Strength Reduction Factor*) como fator de segurança. A Figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas do estudo.

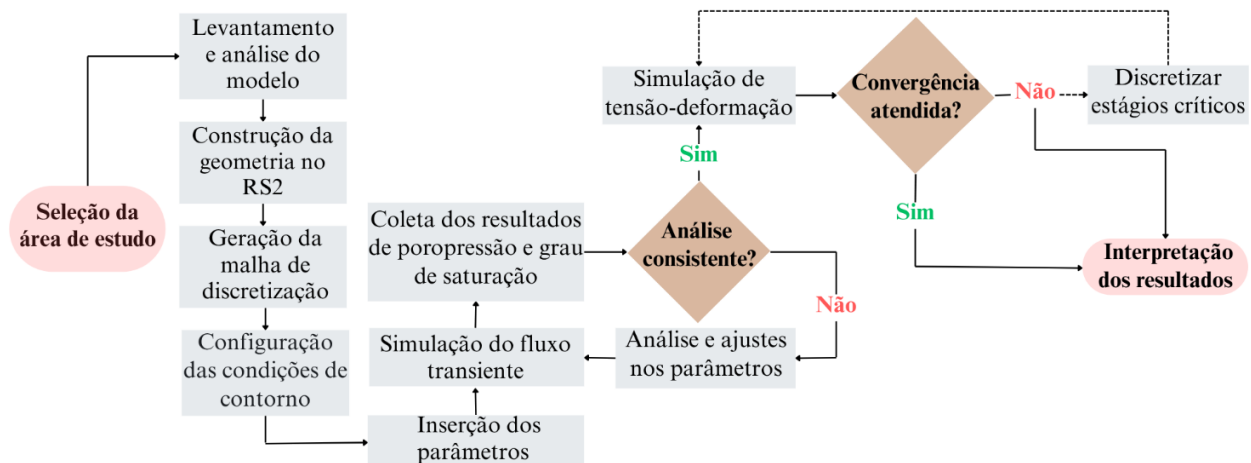


Figura 1. Etapas de execução da simulação numérica

2.2 Concepção do modelo geológico

A geometria da encosta simulada representa um perfil típico da região estudada, o Monte Florido, em Petrópolis (RJ), com base no perfil altimétrico extraído do *Google Earth*. A configuração solo sobre rocha foi definida a partir do modelo geológico apresentado por Costa Nunes *et al.* (1990), que indica a presença de uma camada delgada de solo residual sobre o maciço granítico da Serra dos Órgãos, com topo aflorante característico. A Figura 2 ilustra, à esquerda, o perfil topográfico utilizado como base geométrica, e à direita, a adaptação do modelo de Costa Nunes *et al.* (1990), destacando a relação típica entre solo e rocha.

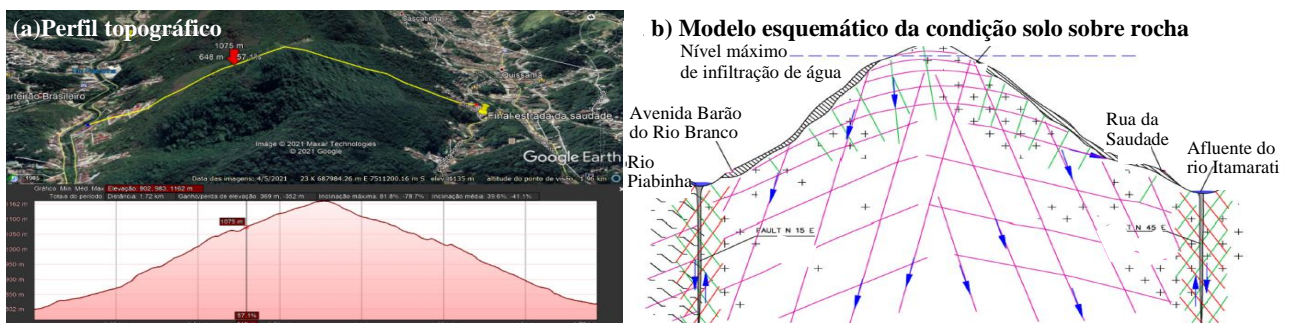


Figura 2. Monte Florido. (a) Perfil topográfico utilizado como base geométrica para o modelo (Fonte: *Google Earth*). (b) Modelo esquemático da condição geológica (Fonte: Adaptado de Mendonça *et al.*, 2020).

A presença de fraturas com diferentes inclinações e espaçamentos segmenta o maciço granítico da Serra dos Órgãos em blocos com potencial de armazenamento hídrico, contribuindo para a circulação interna de água e influenciando a condição de instabilidade do rególito, especialmente na interface solo-rocha (COSTA NUNES *et al.*, 1990). Para representar numericamente a variação na condutividade hidráulica dessas discontinuidades, foram adotados coeficientes de permeabilidade do maciço de 10^{-1} , 10^{-2} e 10^{-3} m/s, com base na correlação gráfica proposta por Hoek e Bray (1981), que associa valores de k (permeabilidade) a diferentes espaçamentos entre fraturas paralelas com abertura de 1 mm. Esses valores representam, respectivamente, cenários com fraturas espaçadas em 1 cm, 10 cm e 100 cm. Não foram aplicadas variações na direção do fluxo ou no ângulo das fraturas, uma vez que o objetivo do estudo se concentrou na análise da influência da magnitude da condutividade hidráulica na resposta hidromecânica do talude.

2.3 Condições da modelagem e seleção de parâmetros geológicos

O interior do maciço rochoso foi considerado hidráulica e mecanicamente inativo para otimizar o desempenho computacional. O modelo numérico foi utilizado com malha uniforme, composta por elementos quadriláteros de oito (8) nós, com aproximadamente 1000 elementos distribuídos no domínio analisado. Para maior precisão na interface solo-rocha, a malha foi refinada nessa região (linha verde na Figura 3), onde acima

está o solo e abaixo, o maciço rochoso. As restrições de deslocamento foram aplicadas apenas na base do modelo.

A Figura 3 apresenta a configuração do modelo numérico, incluindo a aplicação das condições de contorno utilizadas na análise de fluxo. A condição de infiltração foi simulada por meio de um fluxo constante aplicado de forma uniforme sobre a superfície do modelo, representando cenários de precipitação com intensidades de 10, 40 e 90 mm/d. Nas extremidades da base, adotou-se a condição de carga hidráulica total – H (Total Head) fixa, com valores de 95 m à esquerda e 93 m à direita, sendo iguais as respectivas cargas altimétricas do terreno. Essa configuração permitiu representar o gradiente hidráulico inicial ao longo da encosta e avaliar a redistribuição da água no perfil ao longo do tempo.

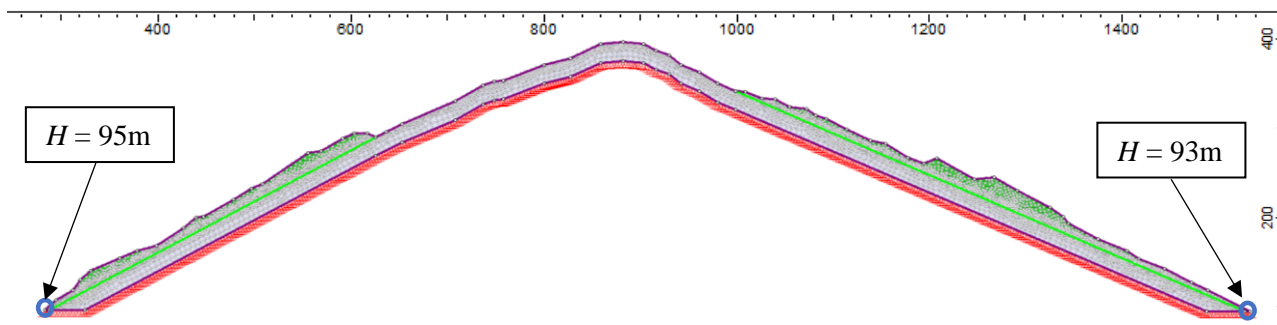


Figura 3. Configuração do modelo numérico com malha refinada, restrições e contorno aplicados.

Para representar o comportamento hidráulico do solo não saturado, foi utilizado o modelo de Van Genuchten, que descreve de forma contínua a relação entre saturação e sucção. Os parâmetros foram definidos com base em uma das curvas granulométricas de Silva (2006), que estudou solos suscetíveis a deslizamentos no 1º distrito de Petrópolis. Adotou-se o solo acinzentado, considerado o mais vulnerável hidráulica e mecanicamente, classificado como areia silto-argilosa. Essa caracterização permitiu enquadrá-lo na classe *Topsoil: Medium* da tabela de Wösten *et al.* (1999), com argila inferior a 18% e areia entre 15% e 65%, representando solos com retenção moderada de umidade. Os dados usados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de Van Genuchten adotados: α (1/m), parâmetro de inverso da pressão de entrada de ar; n e m , parâmetros empíricos de forma; θ_r , teor de umidade residual e θ_s , teor de umidade na saturação.

α (1/m)	n	m	θ_r	θ_s
0,0314	1,1804	0,1528	0,010	0,439

A permeabilidade hidráulica foi fixada em $8,75 \times 10^{-6}$ m/s, valor obtido a partir de ensaio de permeâmetro de carga variável realizado com amostra indeformada, apresentado por Silva (2006). Com base nos mesmos dados, adotou-se um peso específico médio de 15,04 kN/m³ e parâmetros de resistência (coesão de 5,5 kPa e ângulo de atrito de 39°) obtidos por ensaio de cisalhamento direto do solo acinzentado. O módulo de elasticidade foi calculado em 11,75 MPa, a partir da equação empírica proposta por Ribeiro (2013), e o coeficiente de *Poisson* foi fixado em 0,3, conforme valor de referência utilizado por Schmertmann (1988).

Para o maciço rochoso, adotou-se uma condição estrutural intermediária compatível com a Classe III do sistema *Rock Mass Rating* (RMR), conforme proposto por Bieniawski (1989), representando maciços graníticos de qualidade média. Foram utilizados coesão de 300 kPa e ângulo de atrito de 35°, com os demais parâmetros mantidos conforme os valores padrão do RS2.

2.4 Análises de fluxo e de estabilidade

Após a definição da configuração do modelo, foi realizada a simulação de fluxo transiente em sete (7) estágios sucessivos de 12 horas cada, definidos no RS2 como incrementos de tempo. O primeiro representa a condição inicial (zero hora), e os seguintes, a evolução do fluxo até completar 72 horas. A Figura 4 apresenta os três cenários e as respectivas condições de precipitação simuladas, consistindo em intensidades de precipitações constantes de 10, 40 e 90 mm/d sem interrupção, juntamente com a respectiva precipitação acumulada ao longo do intervalo de simulação.

Nos casos em que as simulações apresentaram comportamento não consistente, ou seja, poropressões sem evolução, estáticas ou com padrões incoerentes, foram realizados ajustes no modelo. Esses ajustes incluíram a revisão das condições de contorno, refinamento ou reconfiguração da malha e atualização dos parâmetros hidráulicos. Novas simulações foram realizadas até que os resultados mostrassem comportamento consistente, refletindo a progressão esperada da infiltração. Após a verificação de consistência, o modelo foi submetido à análise de estabilidade pelo método SSR para determinar o SRF.

Para esse método, em cada cenário, a simulação de estabilidade foi conduzida sequencialmente nos sete estágios, um por um, permitindo avaliar a variação do SRF ao longo do tempo. Quando todos os estágios apresentavam convergência, o SRF final era registrado. Nos casos de não convergência, o intervalo crítico entre o último estágio estável e o primeiro instável era discretizado, inserindo-se um estágio intermediário de 6 horas. Persistindo a indefinição, aplicava-se nova discretização de 3 horas para maior precisão. Os resultados foram então comparados entre os cenários.

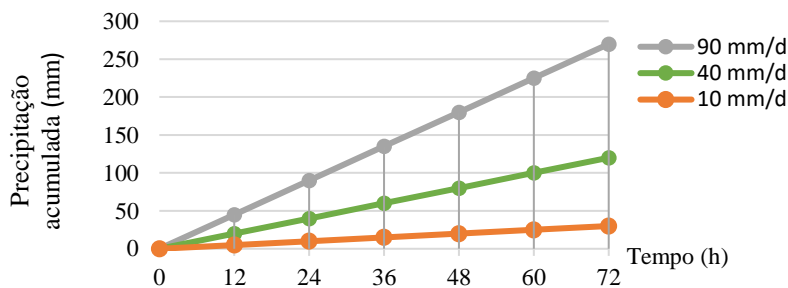


Figura 4. Cenários de precipitação considerados nas simulações.

3 RESULTADOS

3.1 Análise de Fluxo

As figuras 5a e b apresentam, respectivamente, a distribuição do grau de saturação e da poropressão no primeiro estágio simulado, correspondente ao tempo zero. Essas representações permitem visualizar a condição hidrológica inicial da encosta, antes da consideração dos três diferentes cenários de precipitação.

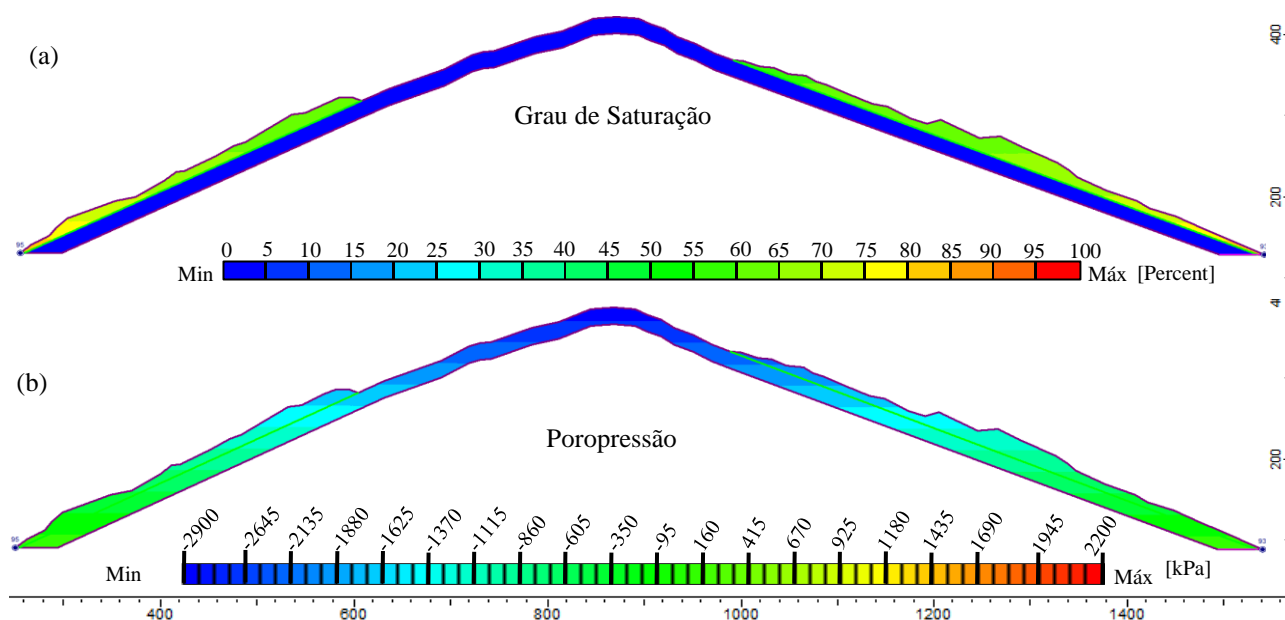


Figura 5. Distribuição inicial do grau de saturação (a) e da poropressão (b) no modelo, correspondente ao tempo zero da simulação (estágio S1), antes da aplicação das chuvas.

Os resultados de fluxo mostraram que, quanto maior a permeabilidade do maciço, maior foi a elevação das poropressões na base do regolito (Fig. 6), estabilizando-se nos estágios finais. Nos modelos com

$k=10^{-1}$ m/s, tanto para 40 quanto para 90 mm/d, observou-se comportamento semelhante, pois a estabilização ocorreu em razão de a poropressão já ter atingido seu limite em estágios anteriores. Já os modelos com $k=10^{-3}$ m/s apresentaram resposta mais lenta, com menor aumento de poropressão e sem atingir seu limite. Esses resultados evidenciam a influência da condutividade hidráulica na evolução da instabilidade. A Figura 6 apresenta os mapas de poropressão no sétimo estágio, para 40 e 90 mm/d e diferentes permeabilidades do maciço, exibidos apenas no estágio final para destacar a condição final dos modelos. O cenário de 10 mm/d foi omitido por não apresentar variações significativas.

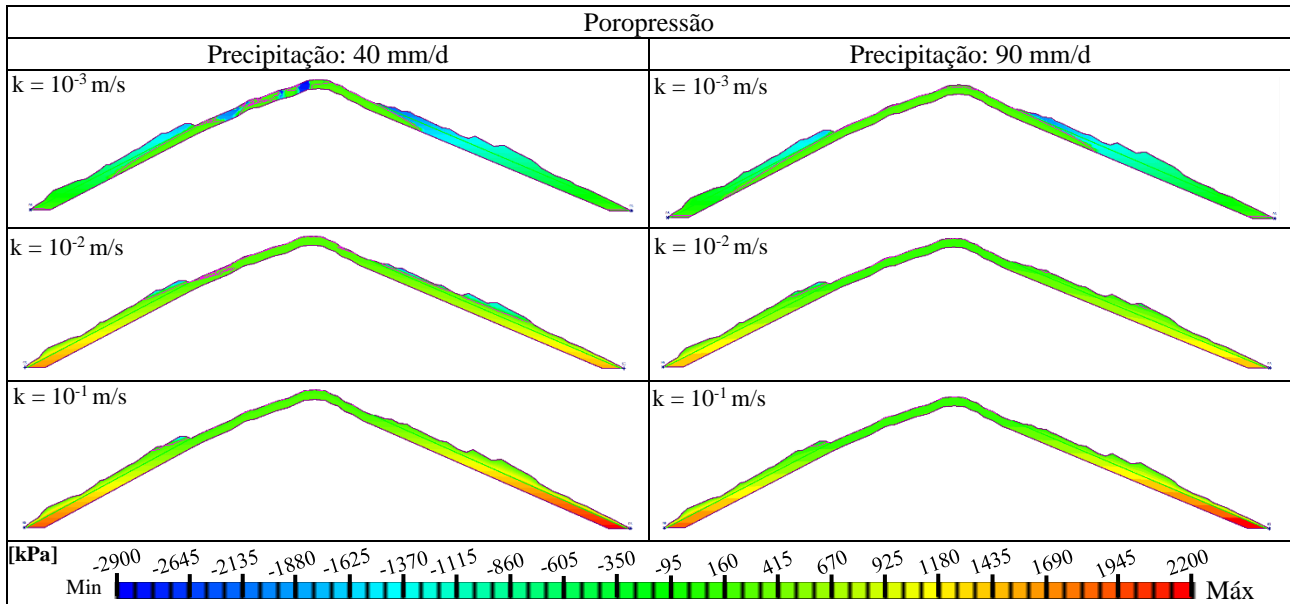


Figura 6. Distribuição da poropressão no estágio 7 (final), para diferentes intensidades de precipitação e valores de permeabilidade do maciço (k).

A Figura 7 apresenta os mapas de grau de saturação nos estágios a partir dos quais ocorreram alterações significativas na base do modelo, indicativas de instabilização, para os cenários de 40 e 90 mm/d, considerando os três (3) valores de permeabilidade do maciço. Cada imagem mostra o estágio em que o modelo atingiu essa mudança relevante. Nos casos em que aparece o estágio 7, o modelo manteve estabilidade em todos os estágios até o fim da análise.

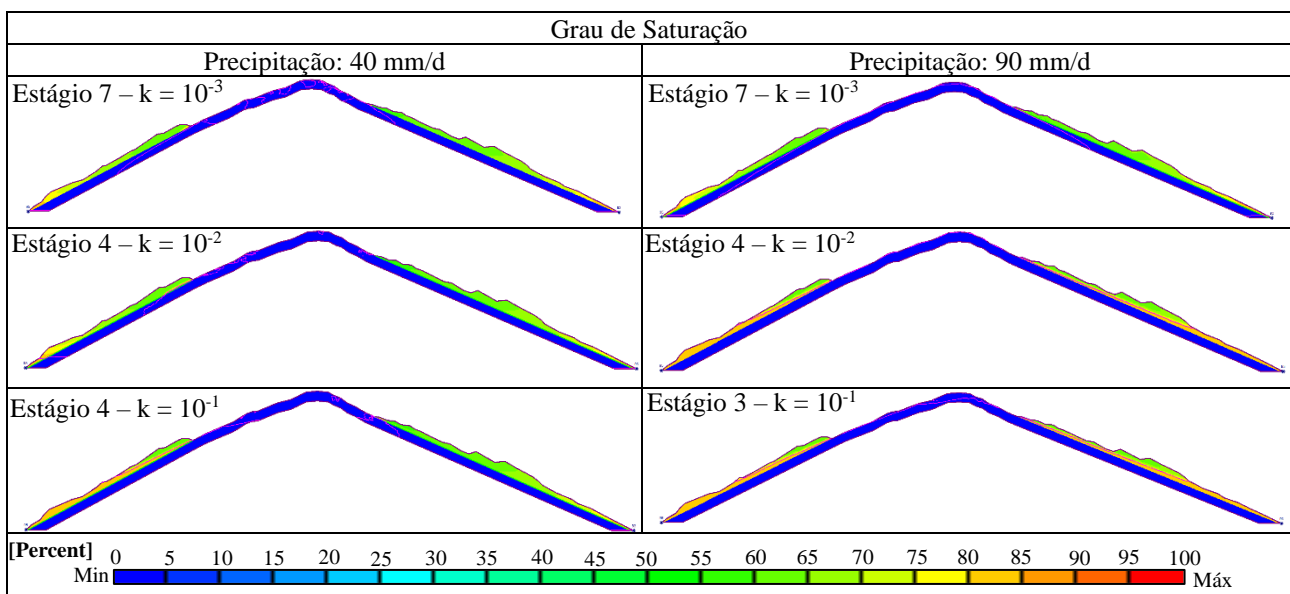


Figura 7. Distribuição do grau de saturação nos últimos estágios que apresentaram convergência numérica em diferentes intensidades de precipitação e permeabilidades do maciço (k).

3.2 Análise SSR

Os resultados mostraram a variação do SRF ao longo do tempo para cada cenário de chuva e permeabilidade do maciço, conforme Tabela 2. A repetição do número de alguns estágios na tabela indica subdivisões sucessivas da mesma faixa de tempo crítica, mantendo a numeração para representar o mesmo intervalo analisado. Além disso, o termo "NC" indica que o modelo não convergiu para o respectivo estágio.

Tabela 2. Valores do Fator de Redução de Resistência (SRF) obtidos ao longo dos estágios simulados.

		SRF								
Estágio	Tempo (h)	Precipitação: 10mm/d			Precipitação: 40mm/d			Precipitação: 90mm/d		
		Permeabilidade do maciço rochoso fraturado (m/s)								
		10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
S1	0	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
S2	12	3,54	3,55	3,55	3,18	3,20	3,21	3,00	3,04	3,05
S3	15	-	-	-	-	-	-	-	-	3,03
S3	18	-	-	-	-	-	-	-	-	NC
S3	24	3,45	3,47	3,46	2,86	2,87	2,88	2,77	2,63	NC
S4	27	-	-	-	-	-	2,80	-	NC	-
S4	30	-	-	-	-	2,86	NC	-	NC	-
S4	33	-	-	-	-	NC	-	-	-	-
S4	36	3,38	3,40	3,39	2,95	NC	NC	2,50	NC	NC
S5	48	3,31	3,33	3,33	2,82	NC	NC	2,16	NC	NC
S6	60	3,25	3,26	3,26	2,77	NC	NC	1,69	NC	NC
S7	72	3,20	3,20	3,20	2,63	NC	NC	1,61	NC	NC

De forma geral, observou-se que o SRF decresce progressivamente ao longo dos estágios simulados, com maior intensidade nos cenários de precipitação mais intensa e elevada condutividade hidráulica. Para as condições de 10 mm/d, os modelos apresentaram estabilidade ao longo de todo o período (72 h), com SRF final em torno de 3,20, independentemente da permeabilidade do maciço. Este comportamento reforça os resultados da análise de fluxo, que indicaram baixa evolução de poropressão e saturação nesse cenário.

Na simulação com precipitação de 40 mm/d, o modelo com permeabilidade do maciço de $k=10^{-3}$ m/s apresentou estabilidade em todos os estágios, com SRF satisfatório no estágio final, compatível com os resultados observados na análise de fluxo. Já para a condição $k=10^{-2}$ m/s, o modelo manteve convergência até 30 horas, perdendo estabilidade em 33 horas, indicando ruptura nesse intervalo. No caso de $k=10^{-1}$ m/s, o colapso ocorreu entre 27 e 30 horas, com SRF mínimo de 2,80 no estágio anterior à ruptura.

Para o cenário de 90 mm/d, o modelo com $k=10^{-3}$ m/s também convergiu até o estágio final, embora com valores de SRF mais baixos, mas ainda estáveis. O modelo com $k=10^{-2}$ m/s rompeu entre 24 e 27 horas, enquanto a condição mais permeável ($k=10^{-1}$ m/s) indicou colapso precoce, já entre 15 e 18 horas, evidenciando maior vulnerabilidade à rápida elevação da poropressão.

Destaca-se a limitação do trabalho ao considerar chuvas de intensidade uniforme. Mendonça *et al.* (2020) mostram, por meio de métodos estatísticos, que combinações de acumulados pluviométricos em períodos antecedentes e intensidades não uniformes influenciam na probabilidade de deslizamentos.

4 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciaram a influência das discontinuidades estruturais no comportamento hidromecânico do talude. Maiores permeabilidades do maciço, associadas a maior fraturamento, favoreceram a rápida ascensão da saturação e o aumento das poropressões, antecipando a instabilidade. Já com menor condutividade ($k=10^{-3}$ m/s), a resposta foi mais gradual e estável ao longo dos estágios.

O SRF apresentou comportamento coerente com o esperado: diminuindo progressivamente à medida que aumentavam tanto a intensidade de precipitação quanto a permeabilidade do maciço, indicando que maiores condutividade hidráulicas, menor espaçamento entre as fraturas, intensificam o fluxo ascendente e reduzem a segurança global da encosta. A maior redução de SRF foi registrada nos casos com precipitação de 90 mm/d e permeabilidade de 10^{-1} m/s, onde o colapso foi antecipado para as primeiras 18 horas de simulação.

A discretização em estágios intermediários (6h e 3h) permitiu maior precisão na identificação do intervalo crítico entre estabilidade e ruptura, essencial nos casos sem convergência nos estágios de 12h. O colapso rápido em cenários com alta permeabilidade e chuva intensa reforça a vulnerabilidade de taludes com solo delgado sobre rocha fraturada, comuns na Serra do Mar. O estudo contribui para compreender os mecanismos de instabilidade em encostas tropicais e destaca a importância de representar adequadamente as descontinuidades estruturais em modelos numéricos.

Embora os modelos tenham seguido rigorosamente os procedimentos definidos, é importante considerar eventuais imprecisões numéricas ou limitações do software. Ainda assim, os resultados oferecem subsídios para estratégias de prevenção e planejamento urbano, destacando a importância do monitoramento, da definição de limiares de alerta e da consideração do grau de fraturamento do maciço nas avaliações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avelar, A.S., Coelho Netto, A.L., Lacerda, W.A., Becker, L.B., & Mendonça, M.B. (2013). *Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil*. In C. Margottini, P. Canuti & K. Sassa (Eds.), *Landslide science and practice*, p. 265-270.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley, New York, 251 p.
- CEMADEN (2022) *Evento de chuvas intensas na cidade de Petrópolis – RJ (15 de fevereiro de 2022)*. São José dos Campos: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em: <<https://www.cemaden.gov.br/evento-de-chuvas-intensas-na-cidade-de-petropolis-rj-15-de-fevereiro-de-2022/>>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- Costa Nunes A.J., Fernandes C.E.M (1990) Contribuição ao conhecimento do risco geológico urbano da cidade de Petrópolis/RJ. In: I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano. São Paulo, pp 102–114.
- Gonzalez, F. C. G., Cavacanti, M. D. C. R., Ribeiro, W. N., de Mendonça, M. B., & Haddad, A. N. (2024). A systematic review on rainfall thresholds for landslides occurrence. *Heliyon*, 10(1).
- Hoek, E.; Bray, J. W. (1981) *Rock slope engineering*. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 358 p.
- Lanni, C. *et al.* (2013). Simulated effect of soil depth and bedrock topography on near-surface hydrologic response and slope stability. *Hydrological Processes*, Chichester, v. 27, n. 3, p. 270–284.
- Lacerda, W.A. (2007). Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: field and laboratory observations. *Geomorphology*, 87(3), p. 104-119.
- Mendonça, M. B. *et al.* (2020) Likelihood of landslide occurrences for definition of rainfall thresholds applied to the Quitandinha river basin, Petrópolis, Brazil. *Landslides*, v. 17, p. 1487–1501.
- Ribeiro, R. S. (2013) *Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro / UFRJ, 287 p.
- Schmertmann, J. B. DMT (1988) *Test Methods and Data Reduction*. Inc., Gainesville, FL, 322 p.
- Silva, D. C. O. (2006). *Aplicação do modelo Shalstab na previsão de deslizamentos em Petrópolis*, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 132 p.
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nachergale, F., Jones & R. J. A. (1999) Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, v. 90, n. 3–4, p. 169–185.