



Dinâmica da Água em Solos Não Saturados da Baixada Santista-SP Durante o Evento Extremo de 2020

Leonardo Henrique Pinto Nogueira

Aluno de Graduação, UNESP-FEG, Guaratinguetá, Brasil, leonardo.hp.nogueira@unesp.br

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Professora Assistente Doutora, UNESP-FEG, Guaratinguetá, Brasil, mariana.motta@unesp.br

Márcio Roberto Magalhães de Andrade

Pesquisador, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil, marcio.andrade@cemaden.gov.br

Rodolfo Moreda Mendes

Pesquisador, CEMADEN, São José dos Campos, Brasil, rodolfo.mendes@cemaden.gov.br

Irving Rodrigues de Souza

Aluno de Pós-Graduação, UNESP, São José dos Campos, Brasil, irving.souza@unesp.br

RESUMO: Durante chuvas intensas, comuns no Brasil, o solo atinge seu estado mais crítico, aumentando a probabilidade de deslizamentos. A compreensão do fluxo de água nos solos é essencial para um monitoramento eficaz do risco. Neste contexto, este estudo visa analisar o fluxo de água e a estabilidade em um perfil de solo do Guarujá-SP, durante o evento de 2020, quando movimentos de massa causaram perdas humanas e impactos socioambientais. O trabalho foi realizado em parceria com o CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), utilizando sondas para monitoramento contínuo da umidade e pluviometria – Plataforma de Coleta de Dados (PCDs), permitindo uma avaliação detalhada das condições do solo ao longo do período crítico. As análises da estabilidade e de fluxo no software GeoStudio foram realizadas após uma extensa campanha experimental ao longo do perfil de solo estudado, abrangendo a determinação dos parâmetros físicos, hidráulicos e mecânicos dos solos e processamento dos dados das PCDs. Foram utilizadas as ferramentas SEEP/W (análise de fluxo) e SLOPE/W (análise de estabilidade) para avaliar o comportamento hidromecânico dos perfis de solo e estimar o fator de segurança ao longo do tempo. Os resultados das simulações apresentaram boa coerência com as condições reais registradas durante o evento crítico de 2020, ao se considerar a geometria do modelo, as propriedades geotécnicas do perfil e as incertezas nos parâmetros mecânicos. Devido à heterogeneidade do solo, foi realizada uma análise de sensibilidade, com variação de 25% nos parâmetros de resistência. A modelagem indicou aumento da poropressão, resultando em fator de segurança mínimo de 1,21. Com a sensibilidade, esse valor reduziu-se para 1,02, caracterizando instabilidade. A superfície de ruptura crítica concentrou-se na parte superior do talude, associada à maior inclinação da encosta, confirmando a aderência do modelo às evidências de campo e sua utilidade em estratégias de mitigação de risco. Desse modo, a modelagem numérica integrada ao monitoramento de umidade pode servir como referência para a melhoria de sistemas de alerta e prevenção de movimentos de massa.

PALAVRAS-CHAVE: deslizamentos, monitoramento, análise de estabilidade, GeoStudio, Guarujá.

ABSTRACT: During intense rainfall events, which are common in Brazil, soil reaches its most critical condition, increasing the likelihood of landslides. Understanding water flow through soils is essential for effective risk monitoring. In this context, this study aims to analyze water infiltration and slope stability in a soil profile located in Guarujá-SP, during the 2020 event, when mass movements caused human losses and socio-environmental impacts. The study was conducted in partnership with CEMADEN, using probes for continuous monitoring of soil moisture and rainfall — through a Data Collection Platform (PCD) — enabling a detailed evaluation of soil conditions throughout the critical period. Flow and stability analyses were carried out using GeoStudio software, following an extensive experimental campaign along the selected soil profile, which included the determination of physical, hydraulic, and mechanical parameters, as well as processing of PCD data. The tools SEEP/W (flow analysis) and SLOPE/W (stability analysis) were used to assess the hydro-



mechanical behavior of the soil and estimate the safety factor over time. The simulation results showed good agreement with the real conditions observed during the 2020 critical event, considering the model geometry, geotechnical properties, and uncertainties in mechanical parameters. Due to soil heterogeneity, a sensitivity analysis was performed by varying the resistance parameters by 25%. The modeling indicated increased pore pressure, with a minimum safety factor of 1.21. After sensitivity adjustment, the value dropped to 1.02, indicating instability. The critical failure surface was concentrated in the upper part of the slope, associated with a steeper inclination, confirming the model's consistency with field evidence and its applicability in risk mitigation strategies. Therefore, numerical modeling integrated with moisture monitoring can serve as a reference for improving early warning and mass movement prevention systems.

KEYWORDS: landslides, monitoring, stability analysis, GeoStudio, Guarujá.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Londe et al. (2014), grande parte das regiões Sudeste e Sul do Brasil apresenta suscetibilidade natural a deslizamentos, devido à combinação entre chuvas frequentes e de alta intensidade e a predominância de vales estreitos e encostas íngremes. Nesse sentido, vale ressaltar que a formação dos solos e a instabilidade das encostas na Serra do Mar, localizada na região Sudeste, são influenciadas tanto por fatores geológicos estruturais quanto pelo regime de precipitação, que intensifica os processos intempéricos (GOBBI, 2017). Assim, a região do Guarujá-SP, situada na Serra do Mar, é caracterizada por sua topografia acidentada e alta suscetibilidade a processos de instabilidade de taludes, especialmente em períodos de chuvas intensas. Esses eventos, potencializados por fatores naturais e antrópicos, resultam frequentemente em movimentos de massa com consequências severas para a população local. Em 2020, ocorreu um grande deslizamento provocado por fortes chuvas e intensificada pela topografia da região, causando a morte de 45 pessoas e interdição de 477 moradias (G1,2020).

Diante desse cenário, com destaque para a área da Vila Baiana, apesar da intensa ocupação, exploração econômica e grande fluxo de pessoas, ainda há uma carência de estudos sobre a geologia e as subdivisões regionais da Serra do Mar (ALMEIDA, 1953). Assim, torna-se essencial o uso de ferramentas que possibilitem a compreensão e a previsão do comportamento do solo sob condições críticas, auxiliando na gestão de riscos e na definição de estratégias de mitigação. Estudos internacionais, como os de Capparelli e Versace (2011), Park et al. (2019) e Marin e Velásquez (2020), destacam o uso de sistemas de alerta baseados em modelos que integram fatores geológicos, hidráulicos e mecânicos.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo analisar, por meio de modelagem computacional, o comportamento hidromecânico de um perfil de solo de um condomínio do Guarujá, durante o evento de 2020. Tal local foi escolhido por ter registrado uma ocorrência de deslizamento neste evento e por ser um dos pontos de monitoramento do CEMADEN. Para isso, foi utilizado o software GeoStudio, integrando os módulos SEEP/W (análise de fluxo de água no solo) e SLOPE/W (análise de estabilidade de taludes), os quais permitem avaliar a influência da infiltração e da saturação progressiva na estabilidade do maciço, reproduzindo a variação do fator de segurança ao longo do tempo (ANTUNES, 2017). A simulação de fluxo foi realizada com base nos dados pluviométricos registrados pela Plataforma de Coleta de Dados (PCDs) do CEMADEN, localizada na Vila Baiana, que serviram como base para a avaliação do fator de segurança ao longo do tempo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de Estudo e Perfil Estratigráfico do Solo

Os movimentos de massa na Baixada Santista são eventos geológicos recorrentes, merecendo destaque por ser a área mais populosa do litoral paulista, apresentando 1.867.558 habitantes (G1, 2025). Nesse sentido, a região em estudo, cidade do Guarujá, localizada na encosta da Serra do Mar, foi severamente afetada durante o evento de deslizamentos ocorrido em 2020. Para a modelagem numérica desenvolvida neste trabalho,



elencou-se o escorregamento ocorrido no Condomínio Jardim Albamar, situado no município do Guarujá, e geograficamente próximo à Vila Baiana, com registro dos dados pluviométricos de 2020 (Figura 1).

A utilização dos dados de precipitação da PCD da Vila Baiana se justifica por ser próxima ao ponto de estudo, já que a PCD do Condomínio Jardim Albamar foi instalada recentemente, após o evento ocorrido. A partir de uma extensa campanha de ensaios de campo e de laboratório foi possível determinar o perfil estratigráfico do local estudado, o qual demonstrou-se com características predominantemente arenosas, com a determinação dos parâmetros hidráulicos (ensaios com a utilização dos equipamentos Hyprop, Ksat, WP4C, método do papel filtro e Porosimetria por Injeção de Mercúrio) e mecânicos (ensaio de cisalhamento direto com amostras de solo inundadas). Tal perfil adotado nas simulações, e ilustrado na Figura 2, foi definido a partir das sondagens com trado realizadas no local, e reflete as condições observadas em campo.

As características das camadas identificadas ao longo da profundidade estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, e foram incorporadas ao modelo numérico como base para as análises de fluxo e estabilidade. Vale ressaltar que os parâmetros da equação de van Genuchten apresentados a seguir são provenientes da curva de retenção dos respectivos solos, as quais utilizaram dados dos ensaios de laboratório, empregando a combinação mais adequada para cada material.

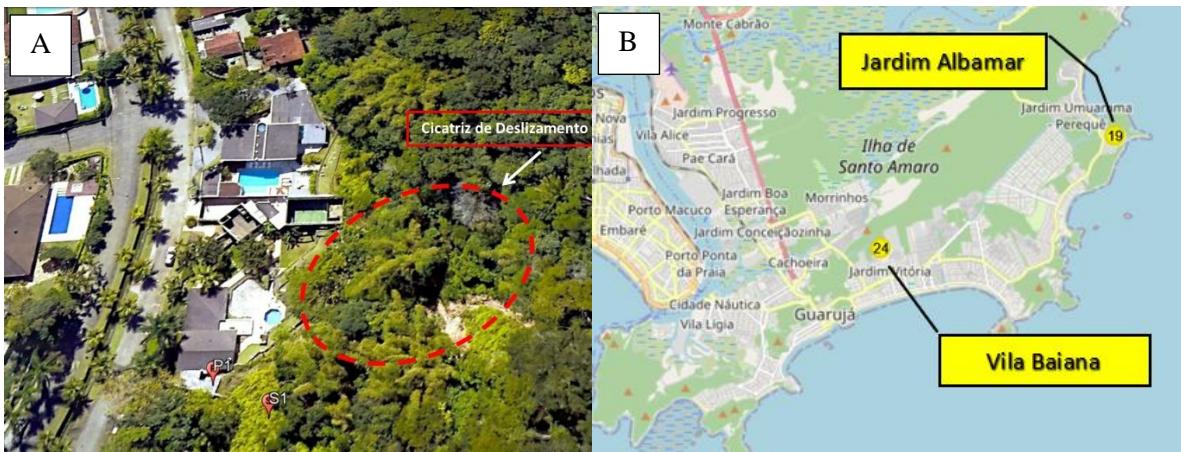


Figura 1. A) Cicatriz de deslizamento ocorrido no Condomínio Jardim Albamar, em 2020. B) Localização das PCDs geotécnicas no Guarujá. Fonte: Cemaden (2025).

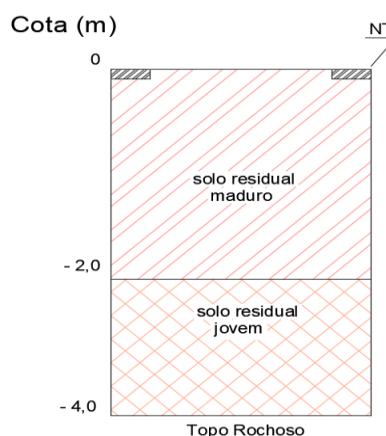


Figura 2. Perfil estratigráfico do solo adotado nas simulações.

Ademais, o período crítico de 2020 adotado teve como finalidade proporcionar uma representação mais precisa dos elementos envolvidos na modelagem numérica. Assim, definiu-se um intervalo de 63 dias para a análise, com início em 3 de janeiro e término em 5 de março. Essa escolha visou garantir uma melhor acurácia na simulação do comportamento da encosta ao longo do tempo, contemplando o acúmulo de umidade no solo



e os efeitos progressivos das chuvas antecedentes ao evento. A distribuição das precipitações ao longo desse intervalo está ilustrada na Figura 3.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos utilizados na análise de fluxo e de estabilidade.

Propriedade	Unidade	Solo Residual Jovem	Solo Residual Maduro	Rocha
Peso específico saturado (γ_{sat})	kN/m ³	17,362	18,373	impenetrável
Condutividade hidráulica (k_{sat})	m/s	$8,98 \times 10^{-6}$	$1,40 \times 10^{-6}$	$2,27 \times 10^{-5}$
Coesão efetiva (c')	kPa	20,4	20,5	impenetrável
Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	°	29,2	17,2	impenetrável

Tabela 2. Parâmetros da equação de van Genuchten utilizados na modelagem hidráulica.

Material	θ_r	θ_s	α (1/kPa)	n
Solo residual jovem	0,045	0,45	0,231	1,43
Solo residual maduro	<i>Não aplicável – ajuste bimodal a partir de pontos experimentais</i>			
Rocha	0,05	0,57	0,151	1,77

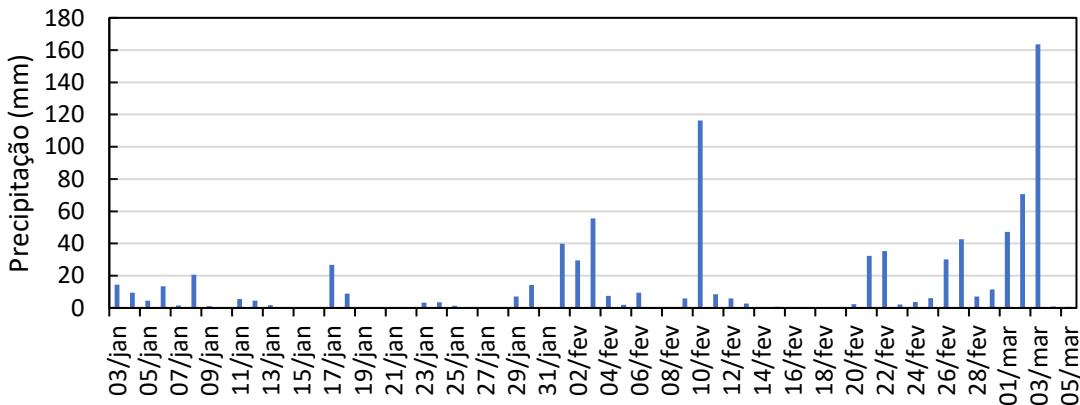


Figura 3. Período Crítico de 2020 utilizado nas análises.

2.2 Modelagem Numérica

As análises numéricas foram realizadas com o software GeoStudio, utilizando os módulos SEEP/W e SLOPE/W, voltados, respectivamente, à simulação do fluxo de água no solo e à avaliação da estabilidade de taludes, desconsiderando nesta abordagem o potencial de geração de escoamento superficial (run-off). Para a caracterização morfológica da área de estudo foi utilizada uma abordagem em ambiente de Sistema de Informação Geográfica - SIG, empregando o software QGIS, versão 3.34 Prizren (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2025). A base altimétrica utilizada foi o Modelo Digital de Elevação – MDE derivado de dados do sensor *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR), a bordo do satélite japonês ALOS - *Advanced Land Observing Satellite* (JAXA, 2008).

A análise de fluxo, conduzida no SEEP/W, adotou o regime transiente, permitindo simular as variações temporais de percolação induzidas pelas chuvas e estimar a evolução da umidade e das poropressões. Para as



condições de contorno, definiu-se ausência de fluxo na base e em parte da lateral esquerda do modelo, representando superfícies impermeáveis; nas extremidades esquerda e direita, aplicou-se condição de carga total para simular a influência do lençol freático; e nas laterais direitas, foram inseridas condições de fluxo prescritas diferenciadas conforme os materiais do modelo, solo maduro, solo jovem e rocha. Essa configuração permitiu avaliar a redistribuição das poropressões ao longo do tempo e fornecer subsídios para a análise de estabilidade.

A avaliação da estabilidade foi realizada no SLOPE/W, seguindo os procedimentos descritos no guia *Stability Modeling with GeoStudio* (SEQUENT, 2025), por meio do método de Morgenstern-Price, baseado no equilíbrio limite. Esse método calcula o fator de segurança (FS) ao discretizar o maciço em fatias e aplicar equações de equilíbrio estático, permitindo a consideração de superfícies de ruptura circulares e não circulares. Assim, foi possível identificar regiões mais suscetíveis à ruptura e avaliar a condição global de estabilidade do talude em função das variações de percolação simuladas.

Nesse sentido, durante a análise de estabilidade com os parâmetros obtidos em laboratório, observou-se que os resultados não indicavam ruptura, apresentando fatores de segurança superiores a 1. No entanto, considerando que o local analisado apresentou um registro de ruptura durante o evento crítico, foi necessária a realização de uma análise de sensibilidade, a fim de ajustar a modelagem às condições observadas em campo. Diante da heterogeneidade do perfil geotécnico, reconheceu-se a possibilidade de variações significativas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento ao longo do maciço. Por esse motivo, adotou-se uma abordagem na qual os valores de coesão e ângulo de atrito foram reduzidos progressivamente, onde cada parâmetro foi avaliado individualmente com os demais mantidos constantes, até a obtenção de um fator de segurança próximo da unidade, representando uma condição de instabilidade. Essa estratégia permitiu avaliar a influência das incertezas nos parâmetros geomecânicos e a melhor compreensão dos mecanismos que levaram à ruptura do talude. A Figura 4 ilustra o perfil utilizado nas simulações.

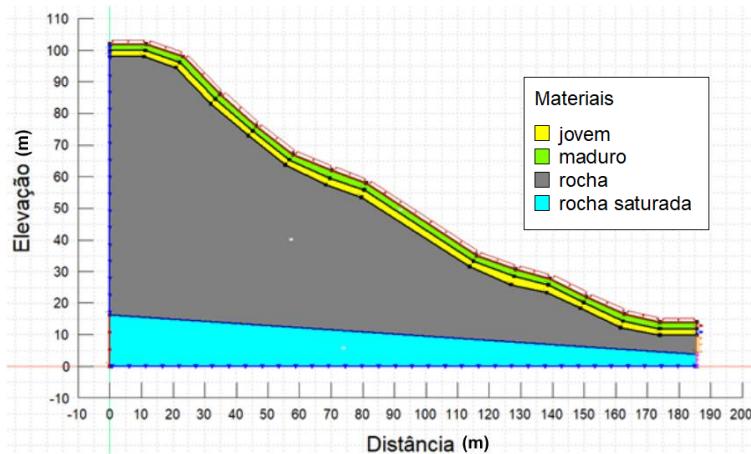


Figura 4. Perfil estudado e condições de contorno das análises de fluxo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de fluxo realizada no módulo SEEP/W permitiu observar o comportamento hidráulico do talude ao longo do período crítico, destacando-se a evolução da saturação e da poropressão induzidas por eventos pluviométricos sucessivos. A simulação revelou um aumento progressivo do nível do lençol freático e a formação de regiões com poropressões positivas em diferentes pontos do perfil, especialmente nas zonas mais suscetíveis à percolação. Esse comportamento está diretamente associado à ocorrência de chuvas intensas, com destaque para o evento registrado no dia 10 de fevereiro, no qual foi contabilizada uma precipitação de 116,4 mm/dia. A partir desse marco, mesmo com a redução da intensidade das chuvas nos dias subsequentes, a infiltração continuada da água no solo contribuiu para a elevação das poropressões internas, intensificando a saturação em zonas profundas e intermediárias do maciço.

A Figura 5 apresenta o perfil de poropressão no dia 47 da simulação (18 de fevereiro), data em que se



2 0 2 5

observou a condição mais crítica de estabilidade. É possível identificar regiões com valores de poropressão positiva entre 0 e 20 kPa, concentradas principalmente na porção central do talude. Essa perda de sucção e transição do solo de um estado não saturado para uma condição saturada afetou diretamente as tensões efetivas do maciço.

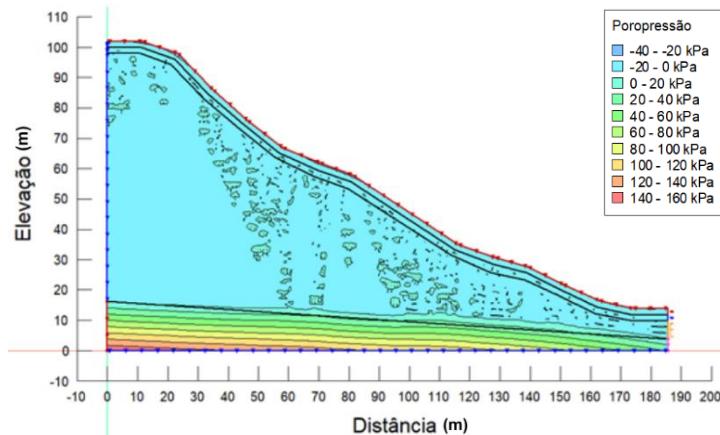


Figura 5. Análise de Fluxo no dia 47.

Na análise de estabilidade conduzida com o módulo SLOPE/W, o menor fator de segurança encontrado durante o período foi de 1,21, no dia 47, considerando os parâmetros mecânicos sem a análise de sensibilidade. Esse resultado evidencia que a instabilidade potencial não está necessariamente associada ao momento exato da chuva intensa, mas sim ao efeito acumulado das infiltrações sucessivas e ao avanço da frente de saturação. Tais observações convergem com as análises feitas por Antunes (2017), com destaque para a contribuição da chuva do dia 10, que provocou o aumento da poropressão com certo atraso no tempo.

Apesar do valor de 1,21 indicar um estado de alerta, ele não caracteriza ruptura do talude. Com isso, foi realizada uma análise de sensibilidade, com o objetivo de investigar a influência das incertezas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, especialmente a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito efetivo (ϕ'). Nesta análise, aplicou-se uma redução de 25% nos valores dos parâmetros de resistência. O novo cenário resultou em um fator de segurança de 1,02 (indicado na Figura 6), valor inferior ao limite de estabilidade, caracterizando uma situação de deslizamento iminente. Verificou-se que a redução do ângulo de atrito efetivo do solo residual jovem foi o principal fator responsável pela queda no FS, destacando-se como o parâmetro mais sensível e influente na segurança do talude sob condições de saturação.

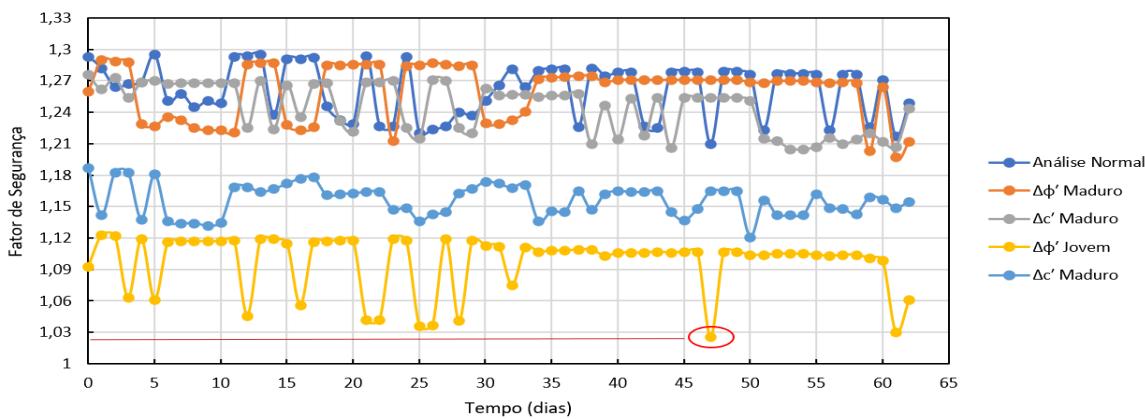


Figura 6. Fator de Segurança x Tempo.

Diante disso, estudo semelhante foi realizado por Mendes et al. (2018) no município de Campos do Jordão (SP), onde a modelagem numérica também evidenciou a redução progressiva do fator de segurança ao



longo do tempo, em resposta à infiltração associada a eventos pluviométricos. Embora o período crítico e as datas simuladas naquele estudo sejam distintos do analisado neste trabalho, ambos os casos reforçam a importância de considerar o acúmulo de umidade no solo e os efeitos hidráulicos retardados sobre a estabilidade de taludes. Assim como observado neste estudo, os autores destacam que a interação entre saturação progressiva e características geométricas locais é determinante na identificação do momento crítico de instabilidade. Ademais, vale ressaltar que dentre as superfícies de ruptura simuladas, a crítica está localizada na porção superior da encosta, onde se observa uma inclinação mais acentuada. Essa geometria favorece o surgimento de esforços desestabilizantes, sobretudo em condições de saturação induzidas por eventos pluviométricos intensos, como evidenciado neste caso.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo, por meio da modelagem numérica integrada nos módulos SEEP/W e SLOPE/W, permitiu avaliar o comportamento hidromecânico de um talude natural submetido à ação de chuvas intensas, com foco especial no período crítico de fevereiro e março de 2020, período este relacionado a um elevado registro de ocorrências de deslizamentos na região da Baixada Santista.

A simulação de fluxo indicou o aumento progressivo do lençol freático ao longo dos dias analisados, culminando na formação de regiões com poropressão positiva entre 0 e 20 kPa, refletindo a perda de sucção e a transição para condições de saturação no interior do maciço. A análise de estabilidade demonstrou que o menor fator de segurança ($FS = 1,21$) ocorreu no dia 47 (18 de fevereiro), coincidindo com a intensificação dos efeitos de percolação gerados pela chuva de alta intensidade do dia 10 de fevereiro (116,4 mm).

Embora esse valor não indicasse ruptura iminente, a posterior análise de sensibilidade, com variação negativa de 25% nos parâmetros de resistência, resultou em um fator de segurança crítico de 1,02, caracterizando uma condição de instabilidade local conforme observado em campo. Além disso, a superfície de ruptura crítica identificada concentrou-se na parte superior do talude, região associada a uma maior inclinação da encosta, o que reforça a influência da geometria local na geração de esforços desestabilizantes, sobretudo sob condições de saturação.

Dessa forma, conclui-se que a interação entre eventos pluviométricos intensos, infiltração progressiva e variabilidade nos parâmetros geotécnicos pode conduzir o talude à ruptura mesmo dias após o principal evento de chuva. A abordagem integrada utilizada neste trabalho mostrou-se eficaz na identificação de zonas críticas de instabilidade e no suporte à tomada de decisões técnicas em áreas de risco geotécnico. Tais resultados destacam a importância de análises numéricas detalhadas para compreender o comportamento de taludes naturais frente a condições extremas de precipitação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de iniciação científica (Processo nº 2024/10325-9), vinculada ao Projeto de Pesquisa (Processo FAPESP nº 2023/04461-4). Agradecem, ainda, ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) pela parceria nesta pesquisa, e em conjunto ao Projeto REDEGEO pelo apoio, através da Carta Convite MCTI/FINEP/FNDCT 01/2016, Instrumento contratual código N° 0.1.16.0068.00.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA). (2008). Tutorial: ALOS-Advanced Land Observing Satellite DAICHI. Disponível em: <<https://www.earthdata.nasa.gov/data/projects/ALOS-PALSAR-RTC-project>>. Acesso em: 8 jul. 2025.
- Almeida, F. F. M. de. (1953). Considerações sobre a geomorfogênese da Serra de Cubatão. *Boletim Paulista de Geografia*, n. 15, p. 3-17.



Antunes, A. M. (2017). *Análise de um talude rompido em solo residual de arenito: RS-122/ São Sebastião do Caí – RS*. Trabalho de Diplomação (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Capparelli, G., Versace, P. (2011). Fuzzy logic and geotechnical models for landslide susceptibility analysis. *Environmental Earth Sciences*, v. 66, n. 4, p. 993-1006.

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). (2025). Mapa Interativo. Disponível em: <<https://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>>. Acesso em: 7 jul. 2025.

Gobbi, E. S. (2017). *Variação do manto intempérico nas encostas dos morros residuais em Santos-SP*. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

G1. (2025). Baixada Santista tem 1.867.558 de habitantes, diz IBGE. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2025/08/28/baixada-santista-tem-1867558-de-habitantes-diz-ibge.ghtml>>. Acesso em: 22 out. 2025.

G1. (2020). Veja quem são os mortos pela chuva que atingiu a Baixada Santista. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2020/03/03/veja-quem-sao-as-vitimas-do-temporal-que-atinge-a-baixada-santista.ghtml>>. Acesso em: 8 jul. 2025.

Londe, L. R., Coutinho, M. P., Di Gregório, L. T., Santos, L. B. L., Soriano, E. (2014). Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. *Ambiente & Sociedade*, v. 17, n. 4, p. 133-152.

Marin, J. F., Velásquez, H. A. (2020). Advances in slope stability modeling using geotechnical and hydrological data. *Journal of Geotechnical Research*, v. 12, n. 3, p. 234-246.

Mendes, R. M., Andrade, M. R. M. de, Tomasella, J., Moraes, M. A. E. de, Scofield, G. B. (2018). Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality – Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, p. 15-30.

Park, J. W., Cho, W., Lee, K. (2019). Rainfall-induced landslide prediction using physical and numerical modeling. *Natural Hazards*, v. 98, n. 2, p. 523-540.

QGIS Development Team. (2025). QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<https://qgis.org>>. Acesso em: 8 jul. 2025.

Seequent. (2025). Stability Modeling with GeoStudio. Disponível em: <<https://files.seequent.com/PDFs/Geostudio-Stability%20Modeling-Oct2022.pdf>>. Acesso em: 8 jul. 2025.