

Influência de Eventos Pluviométricos na Estabilidade de Taludes: Revisão de Literatura

Vitória Becker de Toledo Piza

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitoria.becker@ufpr.br

Murillo Vinícius Bednarczuk

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, murillobednarczuk@ufpr.br

Karen Santos Schmidt

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, karenschmidt@ufpr.br

Tainá Silva Sá Britto

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, tainabritto@ufpr.br

Vítor Pereira Faro

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vpfaro@ufpr.br

RESUMO: A estabilidade de taludes é diretamente influenciada por fatores climáticos, sendo os eventos pluviométricos agentes críticos no desencadeamento de rupturas. Este estudo tem como objetivo avaliar, mediante revisão bibliográfica, os efeitos da ocorrência de chuvas na estabilidade de taludes, com enfoque nas alterações das propriedades hidromecânicas do solo. A metodologia consiste na seleção e análise crítica de artigos científicos, e livros especializados em geotecnia que abordem a relação entre eventos pluviométricos, capacidade de infiltração do solo e redução da resistência ao cisalhamento. Na revisão da literatura, destaca-se que a ação da chuva reduz a sucção do solo, devido ao aumento do grau de saturação e, conseqüentemente, da poropressão, o que impacta diretamente na resistência ao cisalhamento. Evidencia-se, pela literatura revisada, que a ocorrência de chuvas é um fator crítico na instabilidade de taludes, atuando como mecanismo preponderante de ruptura. Portanto, a pesquisa reforça a necessidade de considerar eventos pluviométricos em projetos geotécnicos para prevenção de acidentes.

PALAVRAS-CHAVE: Eventos pluviométricos, Capacidade de infiltração do solo, Mecanismos hidromecânicos de solos não saturados, Limiar pluviométrico.

ABSTRACT: The stability of slopes is directly influenced by climatic factors, with rainfall events being critical agents in triggering failures. This study aims to evaluate, through a literature review, the effects of rainfall on slope stability, focusing on changes in the soil's hydromechanical properties. The methodology involves the selection and critical analysis of scientific articles, technical standards, and specialized geotechnical books that address the relation between rainfall events, soil infiltration capacity, and the reduction of shear strength. The review highlight that rainfall reduces the soil's suction due to the increase in the degree of saturation and, consequently, pore pressure, directly affecting shear resistance. The reviewed literature shows that rainfall is a critical factor in slope instability, acting as a predominant failure mechanism. Therefore, this research reinforces the need to consider rainfall events in geotechnical design to prevent accidents.

KEYWORDS: Rainfall events; Soil infiltration capacity; Hydromechanical mechanisms of unsaturated soils; Rainfall threshold.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, observa-se um aumento na frequência e intensidade de eventos pluviométricos extremos, frequentemente associados à ocorrência de deslizamentos de massa em regiões urbanas e rurais, sobretudo em áreas situadas em relevo acidentado. No Brasil, a recorrência de chuvas intensas em curto



intervalo de tempo tem se mostrado um fator crítico na ocorrência de processos de instabilização de encostas. Um exemplo recente é o desastre ocorrido no estado do Rio Grande do Sul, entre abril e maio de 2024, onde as chuvas extremas provocaram mais de 15 000 movimentos de massa em centenas de municípios, conforme mapeamento realizado pelo CEMADEN (2024). Em São Sebastião/SP (2023), um evento pluviométrico de elevada intensidade com duração de 24 h resultou em um volume de chuva superior ao previsto para todo o mês, resultando em mortes e dezenas de feridos. Já em Petrópolis/RJ (2022), eventos de alta intensidade desencadearam cerca de 775 deslizamentos, resultando em centenas de vítimas e extensos danos materiais, de acordo com relatório técnico da CPRM (2022).

Neste contexto, Guidicini e Nieble (1976) destacam alguns fatores que atuam como agentes predisponentes ou efetivos de instabilização de taludes, por exemplo, o complexo geológico-morfológico, o clima, o tipo de vegetação local e a ação antrópica. Encostas naturais são propensas a movimentos de massa devido a sua geomorfologia, que baseada no somatório de forças em planos inclinados, o aumento da inclinação dificulta o equilíbrio entre a componente cisalhante da força peso e as forças de resistência do solo (Gerscovich, 2016). O clima, por meio de eventos pluviométricos, modifica as propriedades físicas e mecânicas do solo, alterando o grau de saturação e aumentando a poropressão, o que reduz a coesão e o ângulo de atrito, impactando diretamente na resistência ao cisalhamento (Fredlund et al., 2012). A cobertura vegetal garante a proteção superficial do solo, e também atua na regulação do ciclo hidrológico local, interferindo na infiltração e na evapotranspiração (Cunha et al., 2019). Por fim, a ação humana, como desmatamentos, ocupação irregular e obras mal planejadas, pode aumentar a vulnerabilidade a deslizamentos (Baptista e Santos, 2015).

A avaliação dos riscos associados a eventos pluviométricos de alta intensidade exige o monitoramento contínuo das condições hidrológicas e geotécnicas do terreno, e dessa forma ter a previsão de situações críticas com antecedência (Freitas et al., 2021). Nesse sentido, a definição de limiares pluviométricos, que relacionam a quantidade de chuva acumulada em determinado período com a probabilidade de ocorrência de escorregamentos, é uma das estratégias utilizadas em sistemas de alerta precoce (Caine, 1980). Essas abordagens, integradas à geoengenharia, contribuem significativamente para a redução de danos materiais e humanos causados por processos de instabilização induzidos por chuvas.

Desse modo, o objetivo do presente trabalho é contextualizar a influência de eventos pluviométricos na estabilidade de taludes, por meio de uma revisão da literatura. A pesquisa busca reunir, analisar e sintetizar estudos técnicos e científicos que abordam os mecanismos hidromecânicos associados às chuvas, visando compreender variáveis como a intensidade, a duração e o histórico pluviométrico contribuem para a instabilização de encostas.

2 METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica ampla, contemplando diferentes fontes de informação relevantes para o tema. Foram consultados artigos científicos nacionais e internacionais, disponíveis em bases como SciELO, Google Acadêmico e Scopus, que abordam a influência de eventos pluviométricos na estabilidade de taludes. Além disso, foram utilizados livros especializados em engenharia geotécnica e obras de referência internacional, que abordam aspectos hidromecânicos de solos e de abordagem hidrológica. O levantamento buscou integrar as referências clássicas de geotecnia e publicações em periódicos para entendimento dos mecanismos de instabilidade induzidos pela chuva, as abordagens numéricas utilizadas para previsão de risco, e as implicações práticas para o gerenciamento de riscos em encostas.

3 REVISÃO

3.1 Propriedades Hidromecânicas

A resistência ao cisalhamento dos solos, entendida como a máxima tensão cisalhante suportável pelo material antes da ruptura (Pinto, 2006) é governada por dois componentes fundamentais: a coesão e o atrito interno entre partículas. A coesão, que pode se manifestar como uma propriedade real ou aparente, resulta das forças de atração intermoleculares e eletroquímicas entre as partículas sólidas. Paralelamente, o atrito interno



entre partículas tem contribuição friccional à resistência, decorrente do entrosamento mecânico (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Em solos não saturados, a resistência ao cisalhamento é influenciada pela sucção, diferença entre a pressão de ar (u_a) e a pressão de água (u_w) nos poros, que atua como componente adicional da tensão efetiva. Essa propriedade depende fundamentalmente das características intrínsecas do solo, incluindo sua mineralogia, granulometria, porosidade e tensão de confinamento (Fredlund et al. 2012).

A condutividade hidráulica (k_w) expressa a proporcionalidade entre o gradiente hidráulico (i) e a velocidade de descarga (v), sendo um indicativo da maior ou menor facilidade de percolação de um fluido através de um meio poroso. A percolação de água no solo também depende da viscosidade do fluido e da permeabilidade íntreca do material, que varia com a continuidade e distribuição dos poros do solo (Bicalho, Machado e Gerscovich, 2015).

A capacidade de infiltração depende de propriedades intrínsecas do solo, como a permeabilidade e de fatores externos, como intensidade da chuva, duração, declividade e cobertura vegetal. As condições de umidade inicial assumem importância, pois solos pré-saturados apresentam capacidade de infiltração drasticamente reduzida (Hillel, 1971). Solos com elevada permeabilidade são particularmente sensíveis a eventos de curta duração e alta intensidade, nos quais a taxa de precipitação frequentemente excede a capacidade de infiltração (Teixeira, 2009).

O processo de infiltração em solos não saturados inicia-se quando a água atinge a superfície do terreno, e ocorre na direção vertical devido à ação combinada das forças capilares e gravitacionais. Conforme avança o fluxo hídrico, modificam-se as condições de umidade na zona não saturada, promovendo a redução progressiva dos níveis de sucção do solo (Hillel, 1971). Ensaios de infiltração em solos não saturados conduzidos por Zhang et al. (2024) demonstraram que a evolução da frente de saturação pode alterar significativamente o mecanismo de ruptura, destacando a necessidade de integrar propriedades hidromecânicas em análises preditivas.

3.2 Eventos Pluviométricos

O regime hidrológico de uma bacia hidrográfica é determinado pela interação entre fatores climáticos, características físicas do terreno, propriedades geológicas e elementos topográficos. Neste contexto, a precipitação atmosférica constitui o principal componente de entrada do balanço hídrico, cuja variabilidade espacial e temporal condiciona diretamente os processos hidrológicos subsequentes. O termo precipitação engloba todas as formas de transferência de umidade da atmosfera para a superfície terrestre, incluindo manifestações líquidas (chuva), sólidas (neve, granizo) e condensações superficiais (orvalho, geada, neblina), cada uma com distintas implicações nos processos hidrogeológicos (Villela e Matos, 1977).

A análise quantitativa dos eventos pluviométricos requer a caracterização de três parâmetros fundamentais: duração (intervalo temporal do evento), intensidade (precipitação por unidade de tempo) e frequência (período de retorno estatístico). A relação entre estes elementos, conhecida como curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é estabelecida mediante ajuste de séries históricas de dados pluviométricos a modelos probabilísticos adequados, permitindo a estimativa de eventos extremos para diferentes cenários de projeto (Tucci, 2013). Estas curvas IDF representam ferramentas essenciais para o dimensionamento de estruturas hidráulicas e a avaliação de riscos associados a eventos pluviométricos críticos.

A variabilidade dos eventos pluviométricos, especialmente em regiões tropicais, confere grande complexidade à previsão de sua influência sobre os processos hidrológicos e geotécnicos. A distribuição temporal da chuva exerce papel tão relevante quanto o volume total precipitado, uma vez que chuvas concentradas em curtos períodos de tempo tendem a gerar maior escoamento superficial, enquanto eventos de longa duração favorecem infiltração progressiva e elevação do nível freático (Marra et al., 2017).

3.3 Relação entre Pluviometria e Movimentos de Massa

A infiltração de água da chuva no solo é fundamental na análise da estabilidade de taludes, uma vez que a saturação progressiva do solo altera o estado de tensões do material pelo aumento da poropressão (pressão de água nos poros do solo) e redução da sucção. Este fenômeno assume particular relevância em condições não-estacionárias, onde a variação temporal do fator de segurança está intrinsecamente relacionada com a evolução do campo de poropressões durante e após eventos pluviométricos (Teixeira, 2009).



Em solos com elevada permeabilidade observa-se uma infiltração rápida, que provoca o surgimento imediato de poropressão pela saturação dos vazios, que resulta em uma redução brusca da resistência ao cisalhamento. Já solos com baixa permeabilidade apresentam uma taxa de infiltração limitada pelo coeficiente de permeabilidade saturado, como consequência ocorre o escoamento superficial do excedente hídrico. Solos com baixo grau de saturação inicial têm redução na condutividade hidráulica pelo aprisionamento de ar nos poros, que reduz a taxa de infiltração (Jacintho et al., 2006).

Em abordagem numérica, Li et al. (2025) desenvolveram um modelo numérico tridimensional baseado no método dos elementos finitos que integra escoamento superficial e subsuperficial, demonstrando que a presença de runoff intensifica a redução da resistência ao cisalhamento do solo e amplia o número de deslizamentos em encostas. Já Wu et al. (2025) propuseram uma abordagem numérica para taludes não saturados, destacando que a instabilidade ocorre com defasagem temporal em relação ao término da precipitação, aspecto crítico para a formulação de sistemas de alerta precoce.

O mecanismo de deflagração de movimentos de massa em taludes naturais envolve a interação complexa entre dois componentes pluviométricos distintos: a chuva antecedente e a chuva crítica. A chuva antecedente, caracterizada pela precipitação acumulada nos períodos anteriores ao evento crítico, promove a saturação progressiva do solo e a consequente redução da sucção matricial nas camadas superficiais não saturadas, reduzindo gradualmente a resistência ao cisalhamento do maciço. Já a chuva crítica, definida como o limiar mínimo de precipitação necessário para iniciar a ruptura, é determinada pela relação entre sua intensidade e duração (Fredlund et al., 2012). A combinação entre valores elevados de chuva antecedente e a ocorrência de eventos pluviométricos que superam os limiares críticos configura a condição mais favorável para a ruptura de taludes.

Os limiares pluviométricos representam parâmetros críticos para a previsão de movimentos de massa, e são desenvolvidos a partir de correlações empíricas entre dados históricos de precipitação e ocorrências de movimentações de massa (Trevizolli et al., 2018). A metodologia proposta por Kanji et al. (1997) faz a determinação de valores limiares de precipitação capazes de deflagrar escorregamentos e corridas de detritos, fundamentando-se em análises estatísticas de eventos reais. Os limiares pluviométricos têm sido empregados na gestão preventiva de riscos em infraestruturas, que permite a identificação antecipada de situações potencialmente perigosas através da análise de séries históricas pluviométricas (ANTT, 2019). Neste contexto, a caracterização precisa dos parâmetros pluviométricos - incluindo intensidade de pico, duração total e distribuição temporal da precipitação - revela-se essencial para a avaliação de suscetibilidade a riscos geotécnicos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na revisão bibliográfica, constata-se que a resistência ao cisalhamento do solo é significativamente alterada pela ação da chuva, que depende principalmente da sua intensidade e duração. Além disso, os modelos numéricos com dados de chuva acoplados e métodos estatísticos para construção de limiares pluviométricos são ferramentas que auxiliam na avaliação de riscos geotécnicos.

Nesse sentido, a elaboração de estratégias de prevenção e mitigação de desastres, a partir de sistemas de monitoramento e coleta de dados geotécnicos e hidrológicos é fundamental. A integração entre sensoriamento remoto, estações meteorológicas e dados de campo permite análises mais precisas e contextualizadas das condições do terreno ao longo do tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, que viabilizou o acesso às plataformas internacionais para pesquisa bibliográfica, e também ao Departamento de Construção Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Brasil (2023). Governo reconhece estado de calamidade pública em São Sebastião. Agência Brasil, 19 fev. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-02/governo-reconhece-estado-de-calamidade-publica-em-sao-sebastiao>. Acesso em: 10 jul. 2025.



Agência Nacional de Transportes Terrestres (2019). *Riscos geológico geotécnicos em taludes rodoviários: desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento e gerenciamento digital de informações para a BR-376, trecho da serra do mar (PR-SC) – Fase 3*. Brasília.

Baptista, M.; Santos, A. (2015). Impactos da ocupação urbana em encostas. *Revista de Engenharia Ambiental*, 12(2), 45–54.

Bicalho, K. V.; Machado, S. L.; Gerscovich, D. M. S. (2015). Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In: *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: ABMS. cap. 12, p. 297–326.

Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62(1-2), 23–27.

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (2024). *Nota Técnica nº 412/2024: Mapeamento dos movimentos de massa relacionados ao desastre de abril–maio de 2024 no estado do Rio Grande do Sul*. São José dos Campos. Disponível em: <https://www.cemaden.gov.br/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2022). *Relatório técnico: Evento de escorregamentos em Petrópolis – RJ, fevereiro de 2022*. Brasília. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

Cunha, L. S. et al. (2019). Influência da vegetação na estabilidade de encostas. *Revista Brasileira de Geociências*, 49(4), 567–580.

Duncan, J. M. (1996). State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577–596.

Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Fredlund, D. G.; Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(3), 429–439.

Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Gerscovich, D. M. S. (2016). *Estabilidade de taludes* (2. ed.). São Paulo: Oficina de Textos.

Guidicini, G.; Nieble, J. (1976). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Editora da USP.

Hillel, D. (1971). *Soil water: Physical principles and processes*. New York: Academic Press.

Jacinto, E. C.; Camapum de Carvalho, J.; Cardoso, F.B.D.F.; Santos, R. M. M. D.; Guimarães, R.C.; Lima, M.C.G. (2006). Solos Tropicais e o Processo Erosivo. In: *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília: FINATEC. cap. 3, pp. 93-156.

Kanji, M.A.; Cruz, P.T.; Massad, F.; Araujo Filho, H. A. *Basic and Common Characteristics of Debris Flows*. In: 2ND. PAN AM. SYMPOSIUM AND 2ND. COBRAE 1997, Rio de Janeiro, Brazil, p. 223-231.

Li, W.; Shi, W.; Yin, J. (2025). Slope stability–soil runoff integrated analysis considering surface flow: case study of a rainfall-induced landslide in Japan. *Computers and Geotechnics*, 179, 106261.

Pinto, C. de S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos* (3. ed.). São Paulo: Oficina de Textos.

Souza, J. T. S. (2015). *Caracterização geotécnica dos solos da Formação Serra Geral*. São Paulo: Oficina de Textos.

Teixeira, I. J. F. (2009). *Influência da pluviometria em taludes de linhas férreas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Portugal, 143 p.

Trevizolli, J. A. et al. (2018). Aplicação de limiares pluviométricos no gerenciamento de riscos de escorregamentos. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 8(1), 31–40.

Tucci, C.E.M. (2013). *Hidrologia: Ciência e Aplicação* (4. ed.). Porto Alegre: Editora UFRGS.



Villela, S. M.; Matos, J. L. R. (1977). *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill.

Wu, C.; Liu, Q.; Ding, L.; Zhang, R. (2025). Stability analysis of unsaturated slopes under rainfall using the nodal mixed finite element method. *Engineering Geology*, 326, 107681.

Zhang, Q.; Wang, H.; Li, Y.; Zhao, Z. (2024). Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope instability. *Landslides*, 21, 1343–1358.

Marra, F.; Morin, E.; Peleg, N.; Mei, Y.; Anagnostou, E. N. *Intensity–duration–frequency curves from remote sensing rainfall estimates: comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean*. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 5, p. 2389–2404, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-2389-2017>.