

Influência da Precipitação na Estabilidade de Talude de Solo Residual em Areia-PB

Bruna Silveira Lira

Professora, Universidade Federal do Piauí, Teresina, Brasil, brunaslira@gmail.com

Olavo Francisco dos Santos Junior

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, olavo.santos@ufrn.br

Maria Natália de Melo Sousa

Mestre, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, natalia.melo.sousa@gmail.com

Carina Silvani

Professora, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@hotmail.com

Oswaldo de Freitas Neto

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, osvaldo.neto@ufrn.br

RESUMO: Movimentos de massa podem ser causados por fatores de diferentes categorias, como fatores geológicos e mudanças climáticas. Do ponto de vista geológico, o perfil do solo e as propriedades geotécnicas dos materiais que o compõem são cruciais para influenciar a instabilidade das encostas. Da perspectiva das mudanças climáticas, a intensidade da precipitação é um dos principais desencadeadores de movimentos de massa. A empresa de diagnóstico ambiental do governo brasileiro, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), identificou o município de Areia/PB como zona de perigo. A região apresenta deslizamentos que ocorrem principalmente durante o período chuvoso. Tais eventos levam à presunção de que a infiltração de águas pluviais seja responsável pela falha das encostas do município. Assim, os estudos propostos nesta pesquisa visam determinar a influência da precipitação na estabilidade das encostas presentes na região. Os resultados mostram que a precipitação anterior tem maior influência na estabilidade, indicando que a precipitação diária por si só não pode ser usada como determinante para deslizamentos. Concluiu-se que o papel da precipitação antecedente na estabilidade de encostas varia para encostas em diferentes locais que têm diferentes condições de superfície, precipitação tropical variável ou diferentes condições microclimáticas.

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia, Movimentos de massa, Solos não saturados, Solos residuais.

ABSTRACT: Mass movements can be caused by factors from different categories, such as geological factors and climate change. From a geological point of view, the soil profile and the geotechnical properties of the materials that compose it are crucial in influencing slope instability. From a climate change perspective, rainfall intensity is one of the main triggers of mass movements. The Brazilian government environmental diagnostics company, Mineral Resources Research Company (CPRM), identified the municipality of Areia/PB as a danger zone. The region has landslides that occur mostly during the rainy season. Such events lead to the presumption that rainwater infiltration is responsible for the failure of the municipality's slopes. Thus, the studies proposed in this research aim to determine the influence of precipitation on the stability of the slopes present in the region. The results show that previous precipitation has a greater influence on stability, indicating that daily precipitation alone cannot be used as a determinant for landslides. It was concluded that the role of antecedent precipitation in slope stability will vary for slopes in different locations that have different surface conditions, variable tropical rainfall or different microclimatic conditions.

KEYWORDS: Geomorphology, Mass Movements, Unsaturated Soils, Residual Soils.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, observou-se um agravamento na frequência e magnitude de desastres ambientais globalmente. Esse fenômeno é atribuível tanto à intensificação de eventos geodinâmicos, hidrometeorológicos e climáticos em diversas regiões quanto ao aumento da densidade populacional em zonas de vulnerabilidade geotécnica (Assis Dias et al, 2018).

As variações nos regimes pluviométricos exercem influência direta sobre os padrões de infiltração de água no solo, induzindo alterações significativas no teor de umidade das encostas. O incremento do teor de umidade do solo em taludes geralmente ocasiona um aumento do peso específico aparente do solo e uma redução concomitante da tensão efetiva e da resistência ao cisalhamento, o que predispõe o talude à vulnerabilidade e potencial instabilidade (Liu et al, 2012).

No município de Areia-PB, identificam-se zonas urbanas de elevado risco de deslizamentos. As alterações nos padrões pluviométricos decorrentes das variações climáticas, aliadas ao crescimento urbano e à ocupação de áreas de encosta, resultaram na emergência de zonas de risco de deslizamento, representando uma ameaça iminente à população e à infraestrutura da cidade. A compreensão aprofundada do papel da precipitação no desencadeamento de movimentos de massa e dos mecanismos de ruptura atuantes localmente é crucial para a mitigação de perdas socioeconômicas que o município vivencia em decorrência da instabilidade de taludes. Consequentemente, os estudos propostos nesta pesquisa visam determinar a influência da precipitação na estabilidade de uma encosta específica localizada na região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em uma área considerada de risco em relatório publicado pela empresa de diagnóstico ambiental do governo brasileiro (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2015) no município de Areia-PB, como mostra a o ponto A4 na Figura 1. Uma análise das características geomorfométricas das áreas foi realizada para verificar a influência da curvatura dos terrenos na instabilidade dos locais quando submetidos a precipitações.

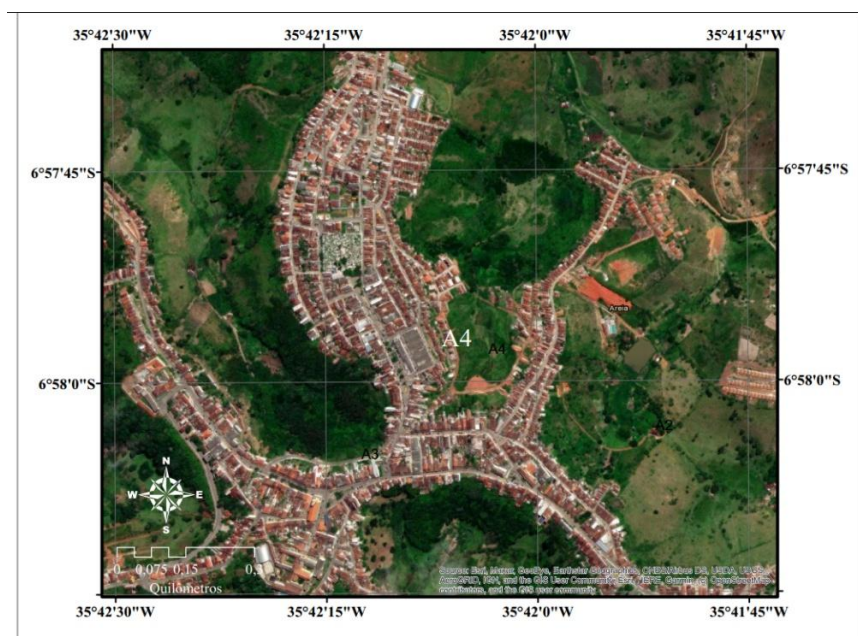


Figura 1. Área de Estudo em Areia-PB.

A área apresenta relevo montanhoso com inclinações acima de 45° . A curvatura ao longo da declividade é caracterizada pelas formas côncavo-convergente. Tendências à concentração do escoamento superficial são observadas nas porções côncavas das vertentes. Considerando que os fluxos de água aumentam e se concentram encosta abaixo, o aumento do fluxo de água potencializa o transporte de material dendrítico favorecendo o cisalhamento do solo, resultando na remoção e deslocamento das partículas superficiais do solo (Guerra e Cunha, 1994). Foi observado uma tendência de fluxo convergente na área com consequente acúmulo



de sedimentos. Essa característica favorece o movimento de massa, já que as vertentes de fluxos concentrados (convergentes) tendem ao transporte de partículas maiores que aquelas movidas pelo escoamento laminar difuso (divergentes) (Manfré, 2015).

2.2 Materiais

A análise paramétrica do presente trabalho leva em consideração as normas da ABNT para a caracterização física. Neste sentido, foram analisadas três camadas com diferentes solos do talude: Topo, Centro e Base. As propriedades físicas básicas e a distribuição granulométrica das partículas dos solos são apresentadas na Tabela 1. Os solos foram classificados como silte de baixa compressibilidade de acordo com o Sistema de Classificação Unificado, com exceção do solo Topo que foi classificado como uma areia siltosa.

Tabela 1. Caracterização física dos solos.

Análise		Topo	Centro	Base
Granulometria	Argila	16%	26%	36%
	Silte	19%	36%	27%
	Areia	55%	35%	37%
	Pedregulho	10%	3%	1%
Índice de consistência	% LL	39	43	47
	% LP	30	31	32
	% IP	9	12	15
Massa específica dos grãos (g/cm ³)		2,69	2,80	2,69

A resistência ao cisalhamento do solo foi avaliada por meio de ensaios triaxiais consolidados e não drenados baseados na norma ASTM D4767-11. As envoltórias de resistência foram determinadas a partir dos ensaios realizados sob tensões confinantes de 50kPa, 100kPa, 200kPa e 300kPa. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de resistência dos solos.

Solo	Topo	Centro	Base
$\phi(^{\circ})$	33,14	39,23	31,39
$c' \text{ (kPa)}$	15	3	21

Uma observação pode ser feita com relação a redução brusca no intercepto coesivo do solo Topo para o Centro. O baixo intercepto de coesivo do solo Centro pode ser resultante de elevado grau de lixiviação solo, já que o talude possui calhas que passam pelo seu centro para escoamento das águas da chuva.

2.3 Análise de Infiltração da Precipitação

A simulação da infiltração da chuva foi feita através do programa SEEP/W da empresa GeoSlope, este simula o movimento de água ou vapor de água através de meios porosos saturados e não saturados. As simulações de fluxo de água foram feitas com fluxo transiente no solo levando em consideração as poropressões e parâmetros dos solos obtidos por meio dos ensaios realizados em laboratório e a curva de retenção dos solos (Figura 1).

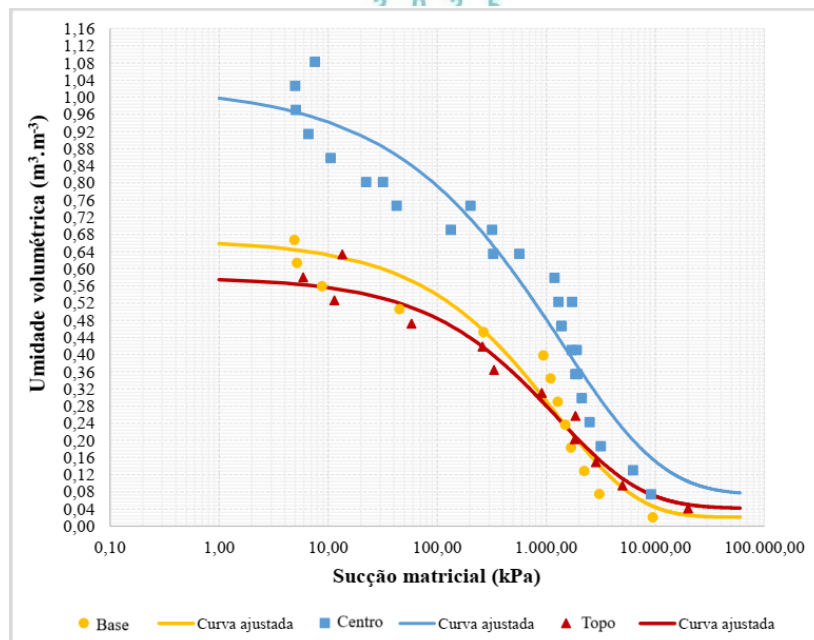


Figura 1. Curvas de retenção dos solos

A análise levou em consideração as propriedades dos materiais, a intensidade da chuva e a condição de umidade anterior. Foram abrangidos três cenários que levam em consideração o efeito da intensidade da chuva e das propriedades do solo sobre o fator de segurança, dois cenários pra diferentes durações das intensidades de chuva e mais três cenários que incorporam o efeito de condições de umidade anteriores na estabilidade.

2.3.1 Condições de Contorno

As condições de contorno para o modelo de percolação foram definidas conforme mostrado na Figura 2. Os limites laterais FA e CB foram definidos como condições de contorno sem fluxo. O limite inferior AB foi especificado como condição de contorno constante com valor igual ao nível de água subterrâneo e o limite superior FEDC foi especificado como condição de fluxo que varia de acordo com as várias intensidades e durações de chuva.

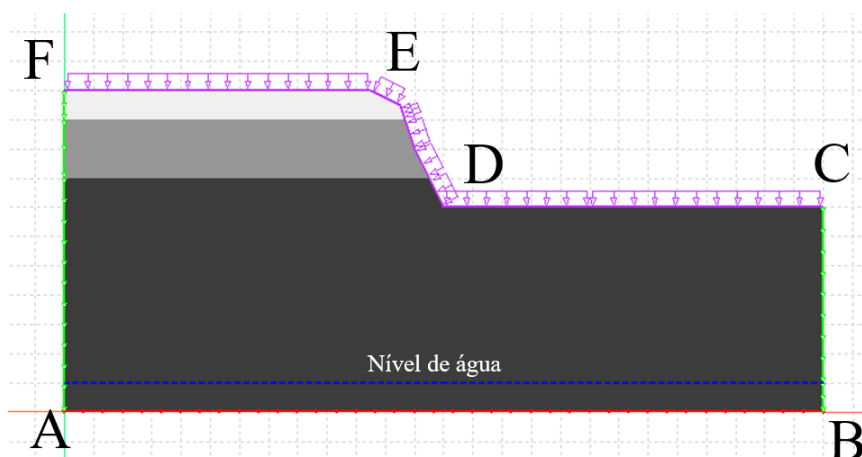


Figura 2. Condições de contorno para o modelo de percolação.

As simulações foram feitas para precipitações de 8mm/h, 4mm/h e 2mm/h com durações de 24 e 72 horas cada. O alagamento não foi permitido na superfície do solo (FEDC). Isso significava que quando um fluxo maior que a permeabilidade do solo era aplicado ao limite superior, o modelo de infiltração não permitiria que as poropressões na superfície do solo aumentassem mais do que 0 kPa. Isso simulou as condições reais de campo onde o excesso de chuva na superfície do solo é removido do talude como escoamento.



Para determinação da influência de precipitações antecedentes ao evento de chuva foram analisadas condições de regime permanente e transiente. A condição de estado permanente foi usada para entender quais seriam as condições de fluxo à longo prazo na encosta.

Na análise de regime permanente foi aplicado um fluxo constante de 458 mm/mês com base no maior acúmulo de chuva observado dentro do histórico município de Areia-PB nos últimos 20 anos. A solução do estado permanente foi usada para determinar a condição hidrostática inicial da área. Os dados históricos de chuva do local foram obtidos pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba.

A partir dos resultados de condição hidrostática obtidos da análise de regime permanente, uma primeira análise transiente foi realizada com fluxo constante de 15 mm/dia durante 5 dias para simulação da precipitação antecedente ao evento principal de chuva.

Uma segunda análise transiente foi realizada a partir dos resultados da primeira aplicando precipitações de 8mm/h, 4mm/h e 2mm/h com durações de 24 e 72 horas cada. Esta foi usada para estudar como a infiltração variou ao longo do tempo em relação à chuva aplicada.

2.4 Análise de Estabilidade

O programa SLOPE/W da empresa Geoslope Ltda foi usado para realização das análises de estabilidade pelo método de Morgenstern & Price (1965). As análises de estabilidade foram realizadas importando as distribuições de poropressão obtidas das análises de infiltração e os resultados obtidos por meio de ensaios de laboratório

3 RESULTADOS

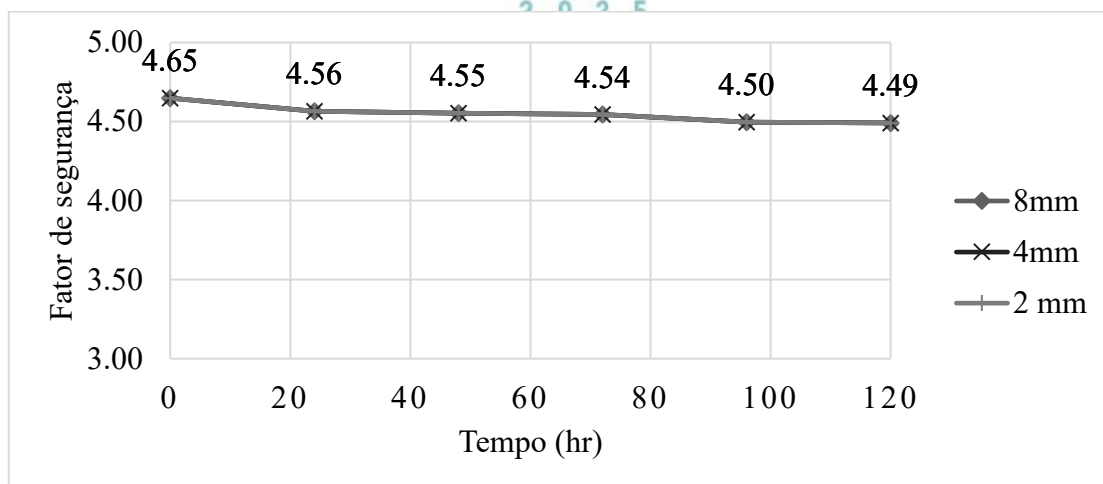
3.2. Análise da Estabilidade após Eventos de Chuva

3.2.1 Sem Precipitação Antecedente

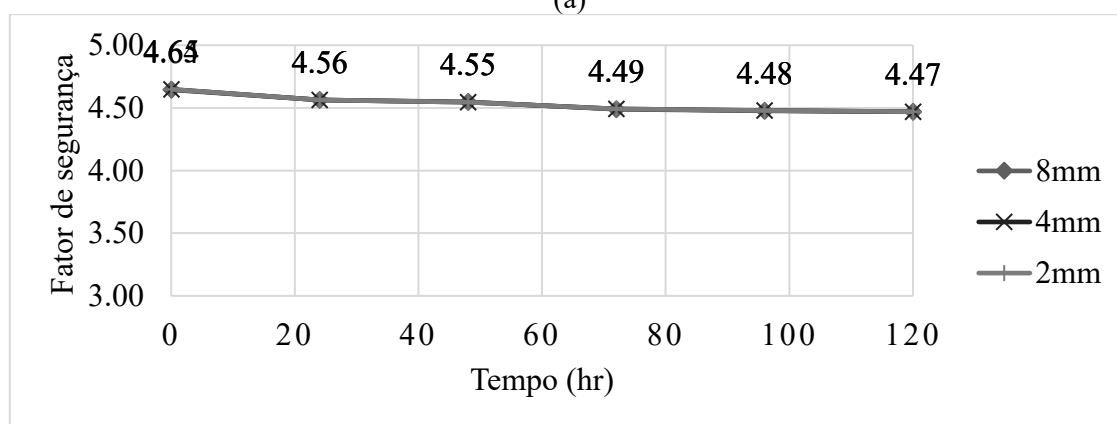
A Figura 3 mostra os resultados das análises determinísticas de estabilidade sem precipitação antecedente para os eventos de chuva com 24h (a) e 72h (b) de duração.

Para o evento de chuva com duração de 24h o fator de segurança apresentou uma queda de 3,37% ao final dos 5 dias com 1,79% durante as 24h de chuva para todas as intensidades. Para o evento de chuva com duração de 72h o fator de segurança apresentou uma queda de 3,78% ao final dos 5 dias com 3,34% ocorrendo durante as 72h de chuva para todas as intensidades.

A duração dos eventos de chuva não influenciou de forma significativa na redução do fator de segurança. Tanto a chuva de 24h quanto a chuva de 72h apresentaram valores acima 4, indicando que o talude apresenta fator de segurança a favor da estabilidade. Com a superfície freática profunda, a maior parte das encostas encontram-se em zona de poropressão negativa, esta zona aumenta a tensão normal efetiva em qualquer superfície de falha potencial, aumentando assim a resistência ao cisalhamento e o fator de segurança do local. Mesmo não apresentando influência significativa, é interessante notar que o fator de segurança continua a decrescer mesmo após o fim da chuva. Este comportamento indica que o fator de segurança diminui devido à infiltração e continua a decrescer à medida que as poropressões aumentam com movimento descendente da água no interior do talude.



(a)



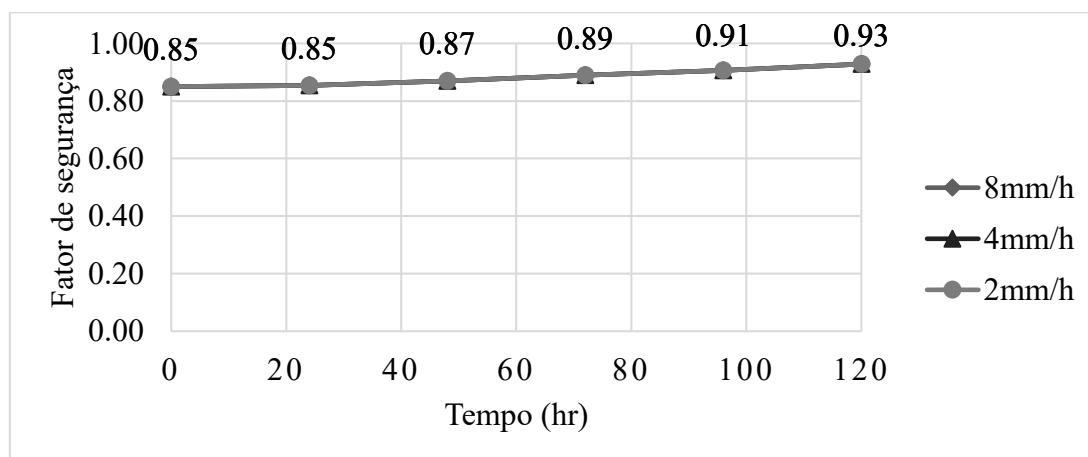
(b)

Figura 3. Fator de segurança sem precipitação antecedente para chuvas com 24h (a) e 72h (b) de duração.

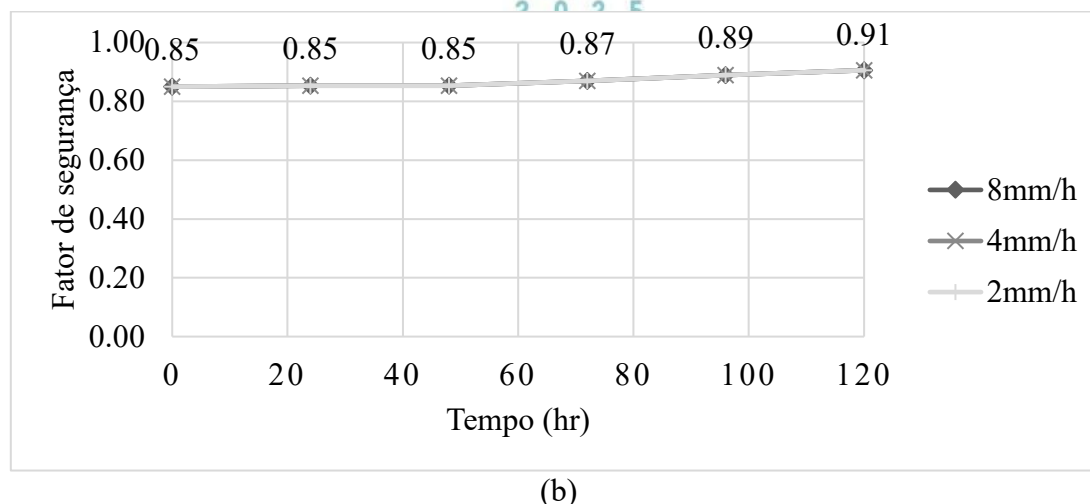
3.2.2 Com Precipitação Antecedente

A Figura 4 mostra os resultados das análises determinísticas de estabilidade com precipitação antecedente para os eventos de chuva com 24h (a) e 72h (b) de duração.

Na análise determinística o fator de segurança do talude foi reduzido para um valor de 0,85 pelas chuvas antecedentes. Após os eventos de chuva com durações de 24h e 72h, o talude apresentou um aumento de 8,60% no fator de segurança ao final dos 5 dias para todas as intensidades.



(a)



(b)

Figura 4. Fator de segurança com precipitação antecedente para chuvas com 24h (a) e 72h (b) de duração.

O talude apresentou comportamento semelhante para as diferentes durações e intensidades de chuva. Observa-se que o fator de segurança apresenta aumento contínuo após o evento chuvoso. Comportamento se deve ao limite atingido pela frente de umedecimento. A existência de uma zona de transição que influencia de forma significativa no fluxo de água entre os solos do centro e base. Com base nas características granulométricas, na curva de retenção e o possível processo de lixiviação, pode-se inferir que o solo da base dificulta o avanço da frente de umedecimento e aumento das poropressões no interior do talude, como consequência tem-se o aumento constante do fator de segurança.

O fator de segurança abaixo de 1,00 obtido pelo talude indica que o equilíbrio limite pode ter sido alcançado e a ruptura do talude é uma possibilidade para as condições representadas. Observa-se que para o solo do centro, a precipitação antecedente ao evento de chuva diminuiu a sucção matricial na encosta fazendo com que o coeficiente de permeabilidade do solo aumentasse, tornando o solo mais permeável à infiltração. Como resultado, a resistência ao cisalhamento diminui e, conseqüentemente, o fator de segurança do talude diminui e se recupera após a precipitação parar.

A estabilidade de uma encosta é reduzida pela diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (reduzida pela poropressão sem qualquer força de sucção adicional) ou pelo aumento da força motriz gravitacional (tensão de cisalhamento) provocada por agentes externos (Shao, 2017). De acordo com Futai (2017), em solos não saturados, a infiltração das águas das chuvas resulta na redução da sucção e na diminuição ou, até mesmo, anulação do intercepto coesivo. Quando a frente de umedecimento atinge uma profundidade crítica, onde os parâmetros de resistência do solo passam a ser menores do que a força motriz gravitacional e não mais garantem a estabilidade do talude, a ruptura ocorre.

4 DISCUSSÃO

As análises permitiram a aferição de respostas a precipitação e permitiu relacionar características que apresentaram maior influência no comportamento do local em resposta a infiltração.

Os resultados mostram que a intensidade da chuva ou a quantidade de chuva por si só nem sempre podem ser indicativos de eventos de movimentos de massa. De acordo com Rahardjo et al (2016) tentativas de correlacionar as incidências de deslizamentos com os padrões de chuva isoladamente, em vez de avaliar a importância relativa de parâmetros como propriedades do solo, geometria do talude, precipitação anterior, infiltração do local, intensidade da chuva e quantidade de chuva; que são associados a rupturas geram resultados que não se correlacionam bem.

Dito isto, algumas observações podem ser feitas com relação ao comportamento da área baseado nos parâmetros (Tabela 3) obtidos na superfície crítica das inclinações da área em estudo durante as chuvas com 24h e 72h de duração e com precipitação antecedente:

1. O talude tende a falhar no estado não saturado, pois a instabilidade é induzida apenas pela infiltração da chuva que gera poropressões positivas ao longo da superfície do local. Resultado semelhante foi obtido por Gallage et al (2021), para o autor os taludes que apresentaram declividades maiores do que o ângulo de atrito do solo, a estabilidade tende a depender muito da



sucção. Portanto, a diminuição da sucção devido à infiltração da chuva pode causar a ruptura do talude mesmo em estado não saturado.

2. Tendências à concentração e acúmulo do escoamento superficial nas porções côncavo-convergentes do talude contribuem para a diminuição da sucção e favorecem o cisalhamento do solo.

Tabela 3. Parâmetros obtidos na superfície crítica

Área	Talude	
	24h	72h
Duração da chuva		
Fator de segurança	0,85	0,85
Taxa de infiltração (mm ³ /s)	4,8E-04	4,8E-04
Inclinação (°)	63,4	63,4
Poropressão (kPa)	11,59	11,59
Ângulo de atrito (°)	39	39
Intercepto Coesivo (kPa)	3,4	3,4
Sucção (kPa)	0,00	0,00
Condutividade hidráulica (m ³ /s)	1,50E-08	1,50E-08
Curvatura ao longo da declividade	côncavo-convergente	

5 CONCLUSÃO

Problemas de estabilidade de talude associados à infiltração de chuva ao longo do tempo mostraram um comportamento complexo. A posição da superfície crítica varia com a progressão da frente de umedecimento e altera o fator de segurança com a profundidade. O comportamento da estabilidade também difere dependendo de qual solos fornece o fator mínimo de segurança para a superfície crítica.

A precipitação antecedente aparenta ter maior influência na estabilidade do que a precipitação diária, sendo considerado um fator desencadeante para a ocorrência de deslizamentos. A precipitação diária ou limite por si só não pode ser usada como determinante para o deslizamento, uma vez que a precipitação antecedente aumenta a permeabilidade do solo e eventos de tempestade subsequentes podem desencadear a ruptura. No entanto, deve-se notar que o papel da precipitação antecedente na estabilidade de encostas não será o mesmo para encostas em diferentes locais que possuem solos com diferentes propriedades, diferentes condições de superfície, chuvas tropicais variáveis ou diferentes condições microclimáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assis Dias, M. C.; Saito, S. M.; Alvalá, R. C. S.; Stenner, C.; Pinho, G.; Nobre, C. A.; Fonseca, M. R. S.; Santos, C.; Amadeu, P.; Silva, D.; Lima, C. O.; Ribeiro, J.; Nascimento, F.; Corrêa, C. O. (2018) Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil on an intra-urban scale. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, p. 449–459.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016) NBR 6457: Amostras De Solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016) NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017) NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.



- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016) NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio De Janeiro.
- ASTM International (1992) ASTM D 5298-92. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- ASTM International (2011) ASTM D4767-11. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.
- Companhia De Pesquisa De Recursos Minerais. Departamento de Gestão Territorial. (2015) Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a inundações e movimentos de massa: Areia – PB. Areia.
- Futai, M. M. (2017) Escorregamentos e Desastres Naturais. In Desastres: Múltiplas Abordagens. Gunther, W. R.; Ciccotti, L.; Rodrigues, A. C. Eds.; Elsevier: São Paulo, Brazil, 2017; Volume 1, Pp. 97-113.
- Gallage, C.; Abeykoon, T.; Uchimura, T. (2021) Instrumented model slopes to investigate the effects of slope inclination on rainfall-induced landslides. *Soils and Foundations*, 61, 160–174.
- Guerra, A. J. T. (1994) Processos Erosivos Nas Encostas. In Geomorfologia: Uma Atualização De Bases E Conceitos. Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B., Eds.; Bertrand Brasil: Rio De Janeiro, Brazil, 1994; Volume 1, Pp. 149-209.
- Liu, J. H., Chen, Z. M.; He, W. (2012) Research of slope stability analysis considering rainfall infiltration. *Applied Mechanics and Materials*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.204-208.487>
- Manfré, L. A. (2015) Identificação E Mapeamento De Áreas De Deslizamentos Associadas A Rodovias Utilizando Imagens De Sensoriamento Remoto. Tese de doutorado, Universidade De São Paulo, São Paulo.
- Morgenstern, N. R. & Price, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*, 15, 289-290.
- Rahardjo, H.; Satyanaga, A.; Leong, E. C. (2016) Effects of rainfall characteristics on the stability of tropical residual soil slope. In Proceedings of the 3rd European Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, September 12-14.
- Shao, W. (2017) Numerical modeling of the effect of preferential flow on hillslope hydrology and slope stability. Master of Science in hydrology and water resources. Delft University of Technology, China. <https://doi.org/10.4233/uuid:6d192fe2-de18-4556-873a-d3cd56ab96a6>.