

Escorregamentos translacionais em vertentes sob condições de chuvas transientes: Estimativa de tempo para a instabilidade como orientação para alertas e alarmes

Translational Landslides on Slopes under Transient Rainfall Conditions: Estimating Time to Failure as Guidance for Alerts and Alarms

Valéria Vaz Alonso^{ac} , Lázaro Valentin Zuquette^{bd} 

^aUniversidade de São Paulo, ^bEscola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

^cvaleriaalonso@usp.br, ^dlazarus1@sc.usp.br



© 2025 The authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons license.

Resumo

Os intensos eventos de precipitação cada vez mais recorrentes, aliado ao crescimento populacional das últimas décadas resultam em uma sequência de tragédias causadas por deslizamentos translacionais. Nesse sentido, a busca por medidas de prevenção e mitigação de danos tornou-se uma prioridade dos órgãos públicos. Uma ação que visa minimizar as consequências desse processo geológico é o uso de sistemas de alarmes. Entretanto, o uso efetivo dessa alternativa não pode ser generalizado temporalmente ou espacialmente. Assim, o presente trabalho realizou a estimativa do fator de segurança para porções de vertentes com diferentes declividades de uma área localizada em Campos do Jordão, com vista a proposição de uma sistemática de alertas. A partir dos dados geológicos, geotécnicos e de chuvas, foi estimado o tempo potencial de ruptura para as diferentes classes de declividade. As unidades geológico-geotécnicas da área de estudo apresentaram comportamentos distintos que orientam adoção de sistemas de alertas diferentes. Sendo que há unidades em que o FS diminui e se mantém inferior a 2 por um tempo longo (de até 27 dias) antes de atingir valores menores ou iguais a 1, de instabilidade. Nestes casos é possível emitir alertas de ruptura potencial em deflagração, permitindo tomadas de decisão e a mitigação de danos em tempo hábil. Em outras unidades a coesão diminui rapidamente e o FS reduz de 2 para 1 em tempos muito curtos (até da ordem 60 minutos), portanto sem um tempo significativo para a emissão de alertas, mas somente de alarmes. Os resultados do estudo demonstram que com a adoção adequada de modelos geológicos em escalas grandes e de dados geológicos e geotécnicos de qualidade, assim como o monitoramento detalhado das chuvas é possível a elaboração de mapas das áreas instáveis de maneira dinâmica em condição transiente e de maneira contínua.

Palavras-chave: Deslizamentos Translacionais; Tempo de Ruptura; Sistemas de Alerta, Brasil.

Abstract

Intense, increasingly recurrent rainfall events, combined with population growth in recent decades, have resulted in tragedies caused by translational landslides. In this sense, the search for measures to prevent and mitigate damage has become a priority for public bodies. One action that aims to minimize the consequences of this geological process is using warning systems. However, a warning cannot be generalized temporally or spatially. This study, therefore, estimated the factor of safety for portions of slopes with different gradients in an area located in Campos do Jordão municipality to propose a warning system. The potential rupture times of hillsides were estimated for the different slope classes considering geological, geotechnical, and rainfall data. The geological-geotechnical units in the study area showed different behaviors, leading to the adoption of specific warning systems. There are units where the FS decreases and remains lower than 2 for a long time (up to 27 days) before reaching values lower than or equal to 1, indicating potential instability. In these cases, it is possible to issue warnings of a potential rupture, allowing decisions to be taken and damage to be mitigated in good time. In other units, cohesion decreases rapidly, and the FS reduces from 2 to 1 in a very short time (up to 60 minutes), so there is no significant time to issue warnings, only alarms. The study results show that with the proper use of large-scale geological models, quality geological and geotechnical data, and detailed rainfall monitoring, it is possible to draw up maps of unstable areas dynamically in transient and continuous conditions.

Keywords: Translational Landslides; Rupture Time; Warning Systems; Brazil.

1. Introdução

As populações das diferentes regiões da Terra têm sofrido perdas humanas, econômicas e sociais decorrentes de eventos perigosos (*hazards*) de

diferentes fontes que atingem indivíduos, sociedades, instituições públicas e privadas. Nesse sentido, com o objetivo de reduzir os danos causados por estes eventos, a estimativa de riscos permite a adoção de

medidas de prevenção e mitigação de danos, evitando perdas de vidas, propriedades e serviços essenciais. Além disso, permite a redução das medidas de recuperação em curto e longo prazo e a redução dos custos de reconstruções. A prevenção e a mitigação envolvem uma posição fundamental que é sobre quais aspectos do risco que podem ser modificados e quais não se têm condições de alterar, visando minimizá-lo. Para tanto, são necessários conhecimentos específicos sobre os eventos perigosos, elementos do meio ambiente e consequências, em escala espacial e temporal adequada.

De acordo com a UNISDR (2008, 2009) e Baas et al. (2008) as ações para redução de riscos de desastres (Disaster Risk Reduction – DRR) concentram-se na proposição de medidas e ações de prevenção ou mitigação e de preparação para evitar impactos adversos dos eventos perigosos, inseridas no âmbito do gerenciamento de riscos e desastres (Disaster Disk Management - DRM) que inclui as perspectivas de gerenciamento com a combinação das ações de prevenção, mitigação e preparação.

Para a UNISRD (2008), mitigação é o grupo de atividades que podem ser aplicadas no sentido de reduzir o risco com ações de prevenção e/ou contenção do evento perigoso; assim como para evitar ou reduzir a exposição; melhorar a tolerância e reduzir a sensibilidade e/ou aumentar a resiliência e a capacidade, com o objetivo de minimizar os impactos do evento perigoso e/ou situações de perdas. As ações de mitigação são medidas estruturais e não estruturais adotadas visando atuar em relação aos dois componentes do risco, na probabilidade de ocorrência do evento e nas consequências. No sentido de minimizar as consequências, o uso de alertas e alarmes é uma ação que pode ser efetiva, desde que não seja generalizada temporalmente e espacialmente. Neste sentido demanda conhecimentos específicos sobre a ocorrência do evento perigoso nas diferentes porções de uma área, assim como sobre as características temporais.

Dentre as fontes de eventos perigosos naturais têm-se os movimentos de massa gravitacionais que podem ser de diferentes tipos, e entre eles destacam-se os escorregamentos translacionais em materiais geológicos do regolito, normalmente inconsolidados. Os escorregamentos translacionais são caracterizados pela movimentação de material geológico ou antropogênico devido à força da gravidade ao longo de uma superfície de ruptura pseudoplana, com velocidade relativamente alta. De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), esse tipo de movimento pode manter-se durante longas distâncias, enquanto a superfície for suficientemente inclinada. Nesse sentido, esse fenômeno geológico é responsável por incontáveis tragédias em todo o mundo, principalmente, aliado ao crescimento populacional das últimas décadas, o qual resultou na ocupação de encostas e áreas adjacentes. No Brasil, esse tipo de movimento de massa

gravitacional foi responsável por mais de 4000 mortes entre os anos de 1988 e 2022 (Macedo & Sandre, 2022).

Entre os mecanismos de ruptura que desencadeiam os deslizamentos translacionais, merecem destaque aqueles induzidos pelas águas das chuvas, frente aos grandes eventos recorrentes e às mudanças climáticas. A ruptura pode ocorrer tanto pela saturação ascendente, quando a camada superior é mais permeável que a seguinte (Enoki et al., 1999), quanto pela saturação descendente, mais comum em solos não saturados. No segundo caso a água da chuva infiltra no perfil de material geológico e reduz a sucção nos poros. O que resulta na redução da resistência ao cisalhamento até que seja insuficiente para manter o equilíbrio e a vertente sofra a ruptura (Zhang et al. 2011).

Nesse contexto, a consideração da infiltração da água da chuva no comportamento dos materiais geológicos ganha destaque nas análises de estabilidade de talude (Baum et al. 2008, Lu e Godt 2008, Montrasio & Valentino 2008, Medina et al. 2021). Matsushi & Matsukura (2006) e He et al. (2022) salientam a variação da coesão dos materiais inconsolidados em função da sua umidade volumétrica. Em ambos os estudos a coesão reduz com o acréscimo da umidade respeitando uma tendência exponencial. Além disso, Schilirò et al., (2019) e Rahul & Tyagi (2024) destacam a importância da declividade do terreno na instabilidade de vertentes sob condição de infiltração da água da chuva.

Dentre as medidas não estruturais de mitigação tem-se a adoção de ações de alertas e alarmes que dependem do conhecimento sobre a potencial ocorrência dos escorregamentos translacionais nas diferentes partes das vertentes. Neste sentido o presente texto retrata os resultados de uma pesquisa que visou hierarquizar as partes das vertentes em função da magnitude da declividade controlada pelas características geológicas e geotécnicas e da temporalidade das chuvas. Esta hierarquização das partes das vertentes possibilita que, em função das características das chuvas, os alertas e alarmes sejam direcionados de maneira mais objetiva tanto espacialmente quanto temporalmente. Ou seja, que o monitoramento da umidade anterior ao início do evento e da intensidade da chuva sejam acionados os avisos quando o fator de segurança (FS) atingir valores pré-estabelecidos. Para isso, foram estimados os tempos de ruptura das diferentes porções das vertentes localizadas em uma região no município de Campos do Jordão, considerando a variação da coesão e do peso específico natural dos materiais inconsolidados em função da sua umidade volumétrica sob condição de infiltração transiente. Além disso, foram consideradas duas condições de umidade inicial e um período de simulação de um mês anterior ao evento principal de precipitação.

2. Área de estudo

O município de Campos do Jordão está localizado no Vale do Paraíba Paulista, a 182 km da capital do estado, São Paulo ($22^{\circ} 44,451'S$ e $45^{\circ} 35,663'E$). Em termos geológicos predominam nessa região os migmatitos. A cidade está inserida no Planalto de Campos do Jordão, na Serra da Mantiqueira e, além de situar-se em altas altitudes apresenta relevo bastante íngreme. A Figura 1 apresenta o mapa de declividade da área de estudo, desenvolvido no software QGIS a partir da interpolação do tipo TIN (Triangular Irregular Network) das curvas de nível obtidas na carta topográfica da região em escala 1:2.000, cedida pela SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). Percebe-se que a declividade da área de estudo varia entre 0° e 62° , com maior presença de encostas com inclinação entre 15° e 30° .

A pluviosidade anual média é de 1.600 mm e o período mais chuvoso é entre os meses de Outubro e Março, o que representa quase 80% da precipitação anual. Nessa região é frequente a ocorrência de escorregamentos translacionais induzidos pela chuva. O último evento de grande proporção ocorreu em Janeiro de 2000, entre os dias 01 e 04 (Fig. 2). De acordo com Ahrendt (2005), os escorregamentos translacionais registrados estão diretamente relacionados com os eventos de precipitação ocorridos nesse período, bem como os canais de drenagem identificados na área. Entende-se que a indução de escorregamentos translacionais pela chuva ocorre devido a queda na sucção e resistência ao cisalhamento característicos de solos não saturados.

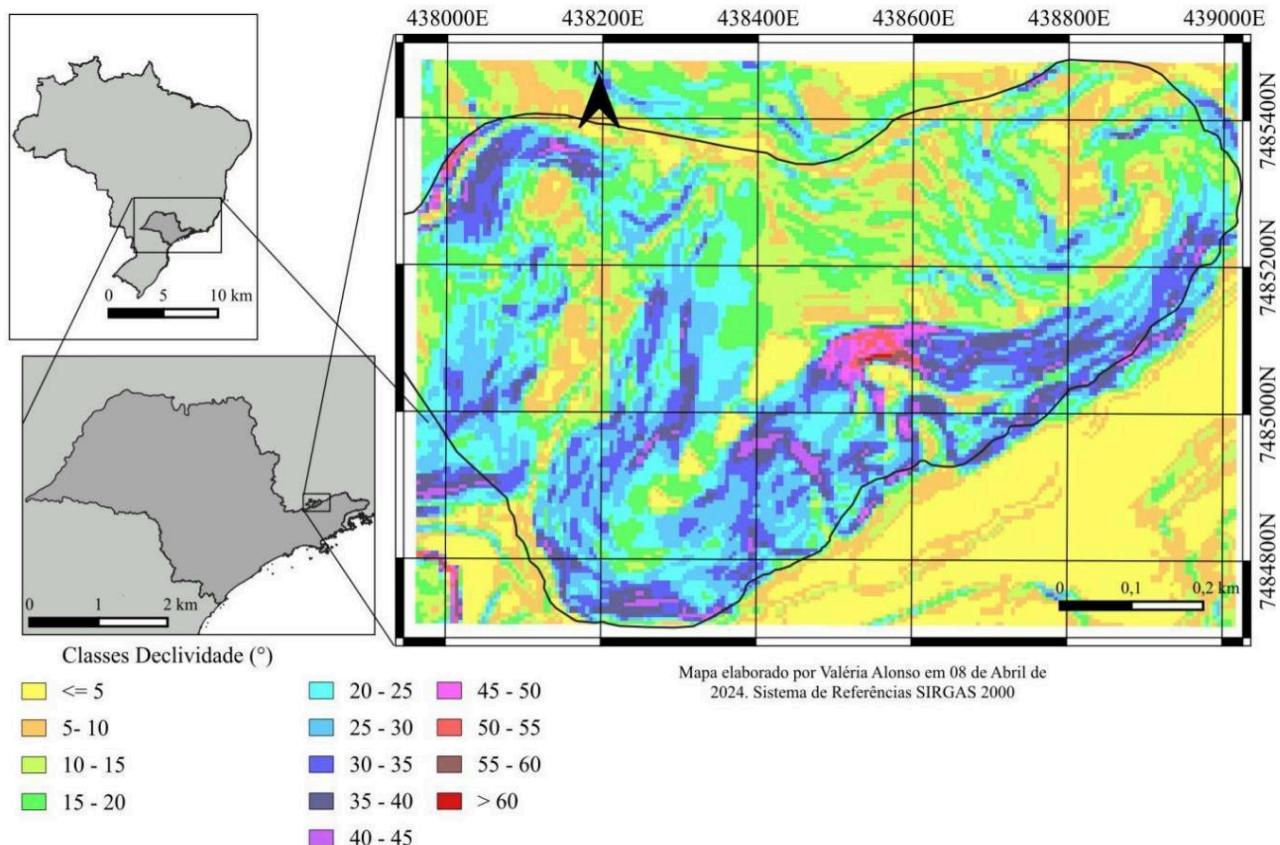


Figura 1: Mapa de declividade da área de estudo. (Fonte: Alterado de Ahrendt, 2005)

Estudos anteriores realizados na área de estudo desenvolvido por Ahrendt (2005) caracterizaram os materiais inconsolidados encontrados na região. De acordo com a autora a classificação foi baseada nos resultados da caracterização geológico-geotécnica e nas características macroscópicas observadas durante a investigação de campo, com destaque à textura dos materiais. Em seguida, Ahrendt (2005) classificou os diferentes perfis de materiais geológicos em onze unidades diferentes. Além disso, a autora mapeou as cicatrizes de escorregamentos translacionais ocorridos

entre os dias 01 e 04 de Janeiro de 2000, apresentados na Figura 3.

Os materiais encontrados na área de estudo foram divididos em duas classes de materiais inconsolidados residual (I-R e II-R), três classes de saprolito (III-S, IV-S e V-S), duas classes de aterro (VI-A e VII-A) e uma de material inconsolidado coluvionar (VIII-T). A Tabela 1 apresenta a caracterização dos materiais inconsolidados analisados, na qual é a massa específica das partículas.



Figura 2: Escorregamentos translacionais na área de estudo em Janeiro de 2000. (Fonte: Ahrendt, 2005.)

Tabela 1: Caracterização dos materiais inconsolidados (Fonte: Adaptado de Ahrendt, 2005)

Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ϕ (°)
I-R	5	40	55	2,703	1,376	30
II-R	33	28	39	2,792	1,458	28
III-S	38	28	34	2,669	1,305	32
IV-S	0	45	55	2,713	2,041	35
V-S	19	36	45	2,706	1,274	35
VI-A/VII-A	9	31	60	2,719	1,182	29
VIII-T	33	28	39	3,078	1,121	29

438000 438250 438500 438750 439000

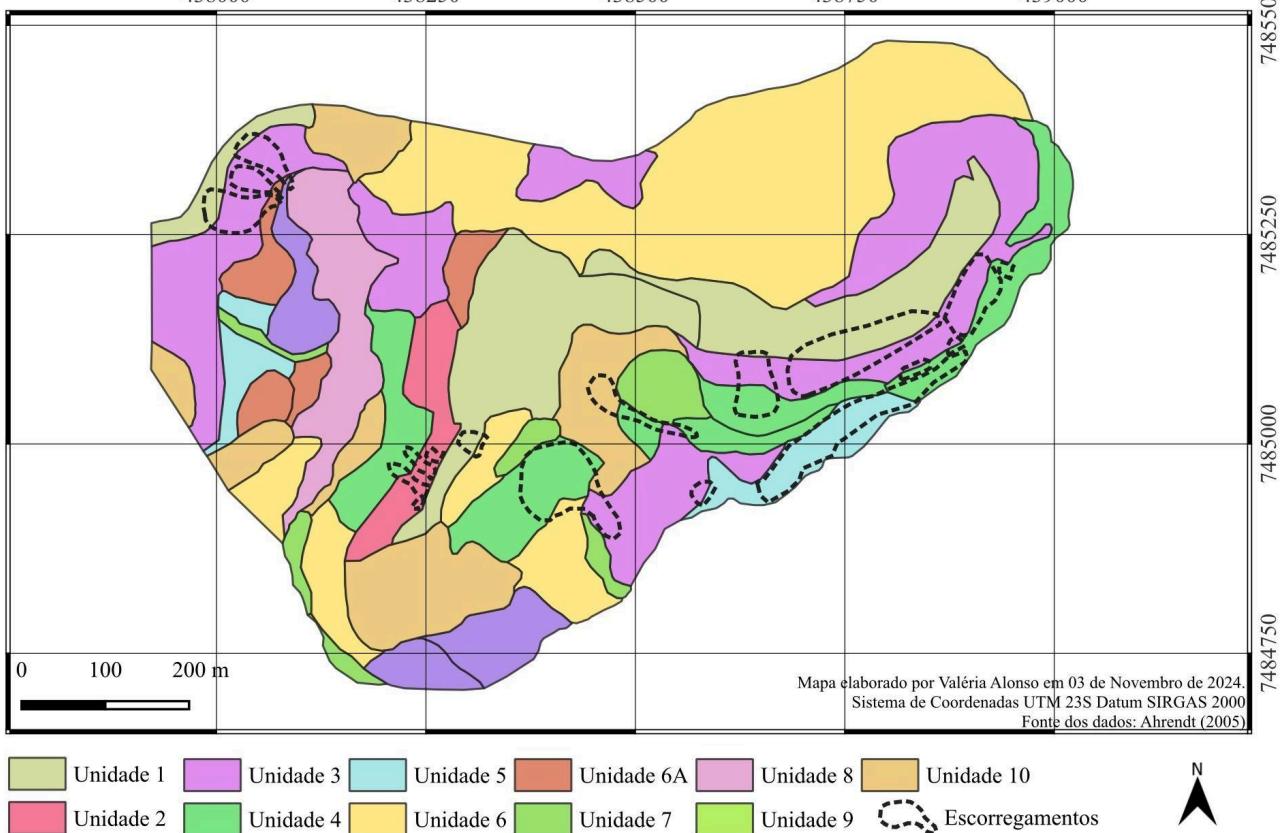


Figura 3: Mapa de unidades de materiais inconsolidados da área de estudo. (Fonte: Alterado de Ahrendt, 2005)

3. Materiais e Métodos

O estudo foi desenvolvido a partir de dados geológicos, geotécnicos e de chuvas de acordo com o fluxograma geral da Figura 4. A primeira etapa do trabalho foi a simulação da infiltração da água da chuva por meio do software Hydrus 1D (RASSAM et al. 2018). Para isso, foram utilizados como dados de entrada a espessura das camadas do perfil geológico e

os parâmetros hidráulicos, os quais estão apresentados na Tabela 2, na qual K_s é a condutividade hidráulica saturada, θ_r é a umidade volumétrica residual, θ_{sat} é a umidade volumétrica de saturação α e n são parâmetros de ajuste da curva de van Genuchten (1980), obtidos por meio de ensaios de infiltração em campo em Silva (2009). Além disso, também foram inseridos os dados pluviométricos. Foi considerado um período de dois

meses, pois permite considerar a contribuição da chuva antecedente no comportamento dos materiais inconsolidados na análise de estabilidade de talude. A Figura 5 apresenta a distribuição temporal das chuvas dos meses Dezembro de 1999 e Janeiro de 2000.

Em relação à umidade inicial dos materiais inconsolidados, foram considerados dois cenários. Para

isso, foram utilizadas como umidade inicial os valores referentes a umidade volumétrica de capacidade de campo, para o caso da condição inicial úmida, e os valores de umidade volumétrica do ponto de murchamento, no caso da condição inicial seca.

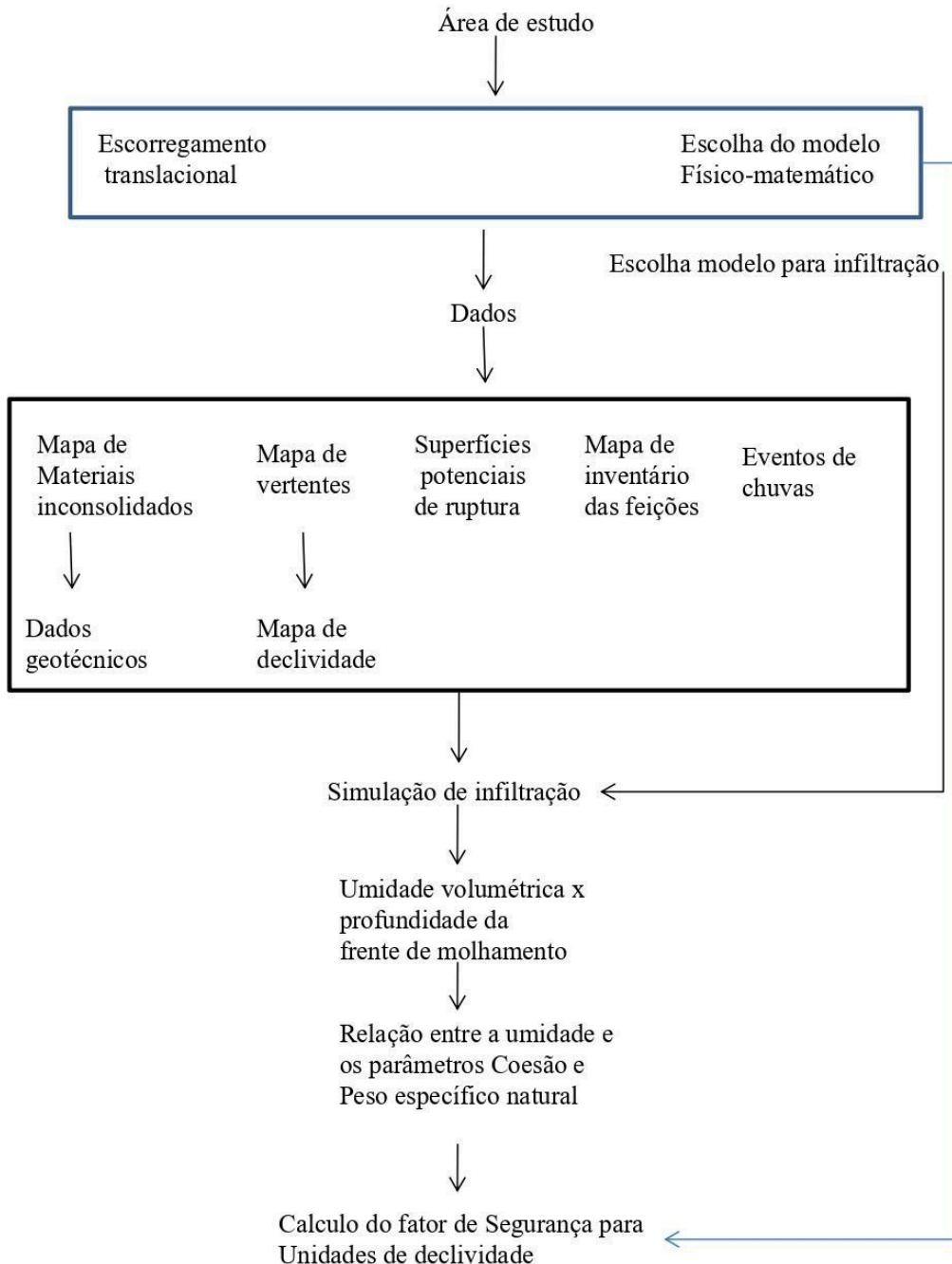


Figura 4: Fluxograma geral seguido no estudo.

A infiltração da chuva foi simulada para cada um dos onze perfis de material inconsolidado em cada uma das condições de umidade inicial, o que resultou em 22 simulações. Como resultado, o software retorna os

valores de umidade volumétrica dos materiais inconsolidados a cada 3 cm ao longo do perfil geológico e a variação temporal desse parâmetro durante o período simulado em intervalos de 60 min

Tabela 2: Parâmetros hidráulicos dos materiais nas diferentes unidades de solo da área de estudo. (Fonte: Adaptado de Silva, 2009)

Unidades	Materiais	Espessuras(cm)	K_{sat} (m/s)	θ_r	θ_{sat}	α (cm ⁻¹)	n
U1	VI-A	75	$5,43 \times 10^{-5}$	0,02	0,55	0,138	1,592
	I-R	50	$5,19 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	175	$3,51 \times 10^{-5}$	0,108	0,485	0,034	1,168
U2	I-R	75	$9,27 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	150	$3,51 \times 10^{-5}$	0,109	0,485	0,034	1,168
	III-S	75	$2,34 \times 10^{-5}$	0,075	0,49	0,039	1,194
U3	VII-A	100	$2,10 \times 10^{-4}$	0,0286	0,54	0,138	1,700
	I-R	35	$5,19 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	125	$3,51 \times 10^{-5}$	0,109	0,485	0,034	1,168
	III-S	40	$2,34 \times 10^{-5}$	0,075	0,49	0,039	1,194
U4	I-R	75	$7,78 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	75	$9,82 \times 10^{-5}$	0,109	0,485	0,034	1,168
	V-S	150	$1,95 \times 10^{-5}$	0,02	0,52	0,138	1,592
U5	I-R	85	$7,63 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	35	$9,82 \times 10^{-5}$	0,109	0,485	0,034	1,168
	V-S	180	$1,56 \times 10^{-5}$	0,021	0,2478	0,0916	1,287
U6	VI-A	40	$1,52 \times 10^{-4}$	0,02	0,55	0,138	1,592
	I-R	20	$5,63 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	II-R	10	$9,82 \times 10^{-5}$	0,109	0,485	0,034	1,168
	III-S	230	$2,34 \times 10^{-5}$	0,075	0,49	0,039	1,194
U6b	VI-A	40	$1,00 \times 10^{-5}$	0,02	0,55	0,138	1,592
	I-R	20	$9,27 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	III-S	240	$2,34 \times 10^{-5}$	0,075	0,49	0,039	1,194
U7	I-R	70	$5,00 \times 10^{-5}$	0,035	0,55	0,115	1,474
	V-S	230	$1,95 \times 10^{-5}$	0,02	0,52	0,138	1,592
U8	VII-A	110	$2,10 \times 10^{-4}$	0,0286	0,54	0,13	1,7
	III-S	190	$2,34 \times 10^{-5}$	0,075	0,49	0,039	1,194
U9	III-S	300	$2,34 \times 10^{-5}$	0,075	0,49	0,039	1,194
U10	VIII-T	300	$1,00 \times 10^{-5}$	0,078	0,5	0,036	1,5

O modelo conceitual do problema, apresentado na Figura 6, mostra que os escorregamentos translacionais podem ser representados pelo modelo físico do Talude Infinito, e apresenta as duas superfícies potenciais de ruptura (SR) consideradas no presente trabalho. A primeira superfície de ruptura está localizada no contato entre a camada mais superficial e a seguinte (SR1), e a segunda situa-se no limite entre a segunda e terceira

camada de material inconsolidado (SR2). O fator de segurança (FS) foi obtido por meio da Equação 1, na qual c é a coesão do solo (kPa), γ é o peso específico natural do solo (kN/m³), z é a profundidade analisada (m), β é a declividade do talude (°) e ϕ é ângulo de atrito (°).

$$FS = \frac{c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2(\beta)) \cdot \tan(\phi)}{\gamma \cdot z \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\beta)} \quad (1)$$

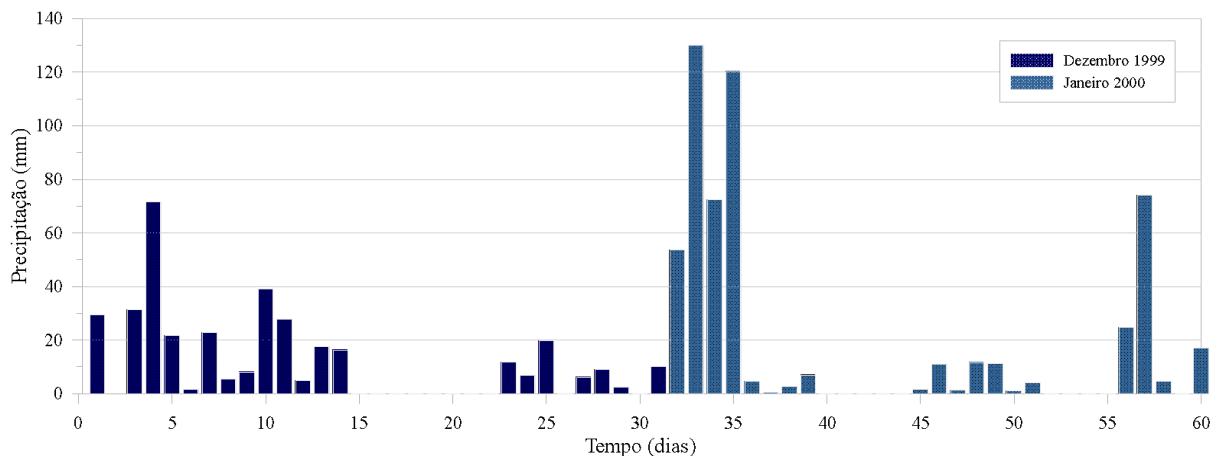


Figura 5: Distribuição das chuvas de Dezembro de 1999 e Janeiro de 2000.

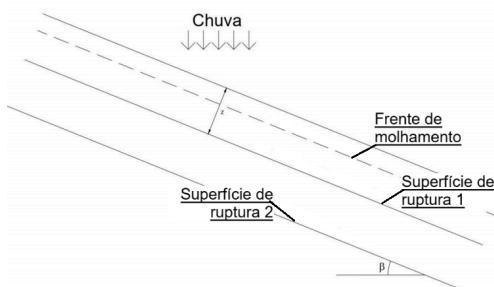


Figura 6: Modelo conceitual.

Para avaliar a influência da infiltração da água da chuva na análise de estabilidade de talude, a coesão e o peso específico natural dos materiais inconsolidados foram consideradas como variáveis dependentes da umidade volumétrica. Nesse sentido, é importante destacar que, por se tratar de um parâmetro variável com a umidade, no presente trabalho estão sendo considerados valores de coesão aparente dos materiais inconsolidados. Assim, as expressões que governam esse comportamento foram obtidas por meio de regressão exponencial dos dados de Silva et al. (2021). Foram geradas sete equações, respectivas a cada material inconsolidado. O peso específico do material geológico foi calculado a partir dos índices físicos considerando o valor médio da umidade volumétrica de cada camada de material inconsolidado nos diferentes tempos analisados.

Em planilhas eletrônicas, nas quais foram organizados os resultados das simulações (umidade volumétrica em função do tempo e da profundidade dos perfis), foi possível estimar a coesão aparente e o peso específico natural dos materiais inconsolidados ao longo do período simulado. A partir disso foi calculado o FS, de cada uma das SR nas onze unidades de materiais inconsolidados para diferentes condições de declividade da vertente, entre 5° e 60°, com incremento de 5°.

4. Resultados e Discussão

Ao todo foram realizadas 502 análises de estabilidade, para as doze classes de declividade, nos dois cenários de umidade inicial, para as duas superfícies de ruptura das onze unidades de materiais

inconsolidados, com exceção das Unidades 9 e 10 as quais possuem apenas a SR1.

As simulações das taxas de infiltração foi um passo fundamental visto que o volume infiltrado condiciona a umidade e a alteração dos parâmetros geotécnicos com o tempo. Na Figura 7 encontram-se os resultados para a Unidade 8, como exemplo, tanto para a condição seca quanto para a úmida, onde observa-se as chuvas e as variações da umidade volumétrica com a profundidade.

Os resultados evidenciam a variação da umidade volumétrica em função dos eventos de precipitação e da condição de umidade inicial. A partir destes resultados foi possível obter os valores da coesão aparente e do peso específico natural em diferentes profundidades e tempos.

A coesão aparente foi estimada por meio das equações exponenciais, obtidas com a regressão exponencial dos dados de Silva et al. (2021). As Equações 2 e 3 representam o comportamento dos materiais VIII-A e III-S, materiais inconsolidados que compõem a Unidade 8. O peso específico natural é obtido a partir da relação entre o peso específico seco (γ_d) e a umidade volumétrica, como exemplificam as Equações 4 e 5 nas quais $\bar{\theta}$ é a umidade volumétrica média da camada de material inconsolidado.

$$c_{VIII-A} = 38,42 * e^{-7,206 * \theta} \quad (2)$$

$$c_{III-S} = 133,78 * e^{-10,85 * \theta} \quad (3)$$

$$\gamma_{VIII-A} = 11,8 (1 + \bar{\theta}) \quad (4)$$

$$\gamma_{III-S} = 12,8 (1 + \bar{\theta}) \quad (5)$$

O cálculo do fator de segurança, considerando o modelo físico matemático selecionado, geraram resultados para as superfícies potenciais de ruptura (SR1 e SR2) para todas as unidades de materiais inconsolidados e diferentes classes de declividade que se encontram nos materiais suplementares.

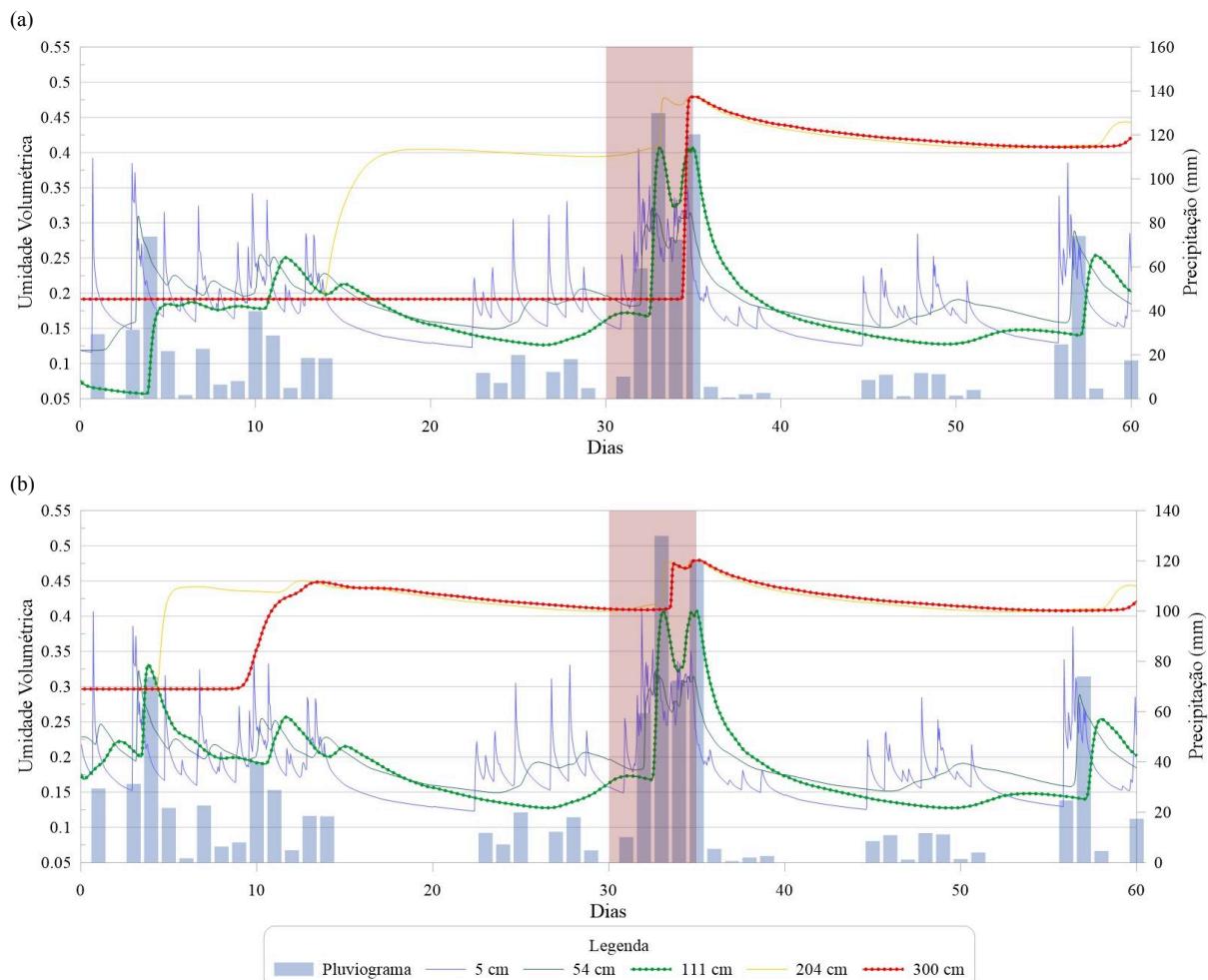


Figura 7: Variação da umidade com os eventos de precipitação da Unidade 8 na condição (a) seca e (b) úmida.

Estes resultados permitem que seja estimado um tempo de ruptura (potencial, com caráter probabilístico devido às incertezas associadas), quando o fator de segurança é menor ou igual a 1, para cada unidade de material inconsolidado, superfície potencial de ruptura e categoria de declividade. Este tempo permite que sistemas de

alertas e alarmes sejam otimizados e orientados espacialmente e não de maneira generalizada. Na Tabela 3 é possível observar uma análise para as unidades de materiais inconsolidados e as declividades para as superfícies SR1 e SR2 nas duas condições de umidade inicial.

Tabela 3: Tempo de ruptura e declividade das vertentes nas diferentes unidades de materiais inconsolidados.

Unidade	SR (profundidade)	Condição Seca		Condição Úmida	
		Declividade (°)	Tempo (dias) depois do início do evento para ocorre $FS < 1$	Declividade (°)	Tempo (dias) depois do início do evento para ocorre $FS < 1$
U1	SR1 (75cm)	<45	NÃO*	<45	NÃO
		45-60	32	45-60	32
				60	3
	SR2 (125cm)	<35	NÃO	<35	NÃO
		35-40	33	35-45	33
		40-50	12	45-50	12
U2	SR1 (75cm)	>50	4	>50	5
		<40	NÃO	<40	NÃO
		40-55	32	40-45	32
	SR2 (225cm)	>55	11	>45	3
		<30	NÃO	<30	NÃO
		>30	33	30-45	12
				>45	60 min

Tabela 3: Continuação

		<45	NÃO	<45	NÃO
	SR1 (100cm)	>45	32	45-50	32
				>50	3
U3		<40	NÃO	<35	NÃO
	SR2 (135cm)	40-45	33	35-40	33
		45-50	12	40-50	3
		>50	11	>50	2
		<40	NÃO	<40	NÃO
	SR1 (75cm)	40	32	40-50	32
				>50	3
U4		<30	NÃO	<30	NÃO
	SR2 (150cm)	30-35	13	30-35	4
		35-60	12	>35	60 min
		60	10		
		<40	NÃO	<40	NÃO
	SR1 (85cm)	>40	32	40-55	32
				>55	4
U5		<30	NÃO	<30	NÃO
	SR2 (115cm)	30-35	11	30-35	3
		35-45	9	>35	60 min
		>45	8		
	SR1 (40cm)		NÃO		NÃO
U6		<45	NÃO	<45	NÃO
	SR2 (60cm)	>45	32	45-50	32
				>50	3
	SR1 (40cm)		NÃO		NÃO
U6b		<40	NÃO	<40	NÃO
	SR2 (60cm)	>40	32	40-55	32
				>55	3
		<35	NÃO	<40	NÃO
	SR1 (70cm)	35-40	32	>40	3
		40-45	10		
		45-55	5		
U7		>55	4		
		<40	NÃO	<40	NÃO
	SR2 (300cm)	40-45	35	40-45	10
		45-55	30	>45	60 min
		>55	29		
		<45	NÃO	<40	NÃO
U8		>45	32	40-45	32
				>45	3
	SR1 (110cm)	<45	NÃO	<35	NÃO
	SR2 (300cm)	>45	34	35-40	10
				>40	60 min
U9	SR1 (300cm)	<35	NÃO	<35	NÃO
		>35	35	35-40	19
				>40	60 min
U10	SR1 (300cm)	<35	NÃO	<35	NÃO
		35-45	35	35-40	60 min
		45-50	7		
		>50	60 min		

*'NÃO' representa a situação em que não foi estimada a condição de instabilidade (FS<1) durante o tempo simulado.

A partir disso foram identificados três comportamentos típicos nas unidades de materiais inconsolidados que serão apresentados a seguir.

De modo geral, ao considerar a infiltração da chuva no perfil como um fluxo transiente, a coesão dos materiais inconsolidados varia com o tempo em função da umidade volumétrica. Consequentemente, o fator de segurança varia de acordo com a coesão. Entretanto, essa relação é mais forte nas vertentes com menor declividade. Altos valores de declividade

resultam na queda do FS desde o início do período simulado. Além disso, nesses casos, os valores de FS apresentam pouca variação mesmo quando os valores de coesão variam consideravelmente.

Nas Unidades 1, 3, 6, 6b e na SR1 das Unidades 2, 4, 5, 7 e 8 a coesão apresenta bastante oscilação devido à drenagem facilitada promovida pelo material inconsolidado de textura mais grossa e maior condutividade hidráulica. A Figura 8 apresenta os gráficos referentes às duas condições de umidade

inicial para as SR1 e SR2 da Unidade 3. Nos primeiros dias da simulação ocorre uma queda brusca no FS como consequência da chuva de maior intensidade do dia 04 de Dezembro, da ordem de 71,6 mm. Após isso, a coesão varia em função da

umidade volumétrica e o FS acompanha essa tendência. Entretanto, observa-se que os gráficos que representam os maiores valores de declividade são transladados para baixo. Ou seja, quanto maior a declividade menor é o FS inicial da vertente.

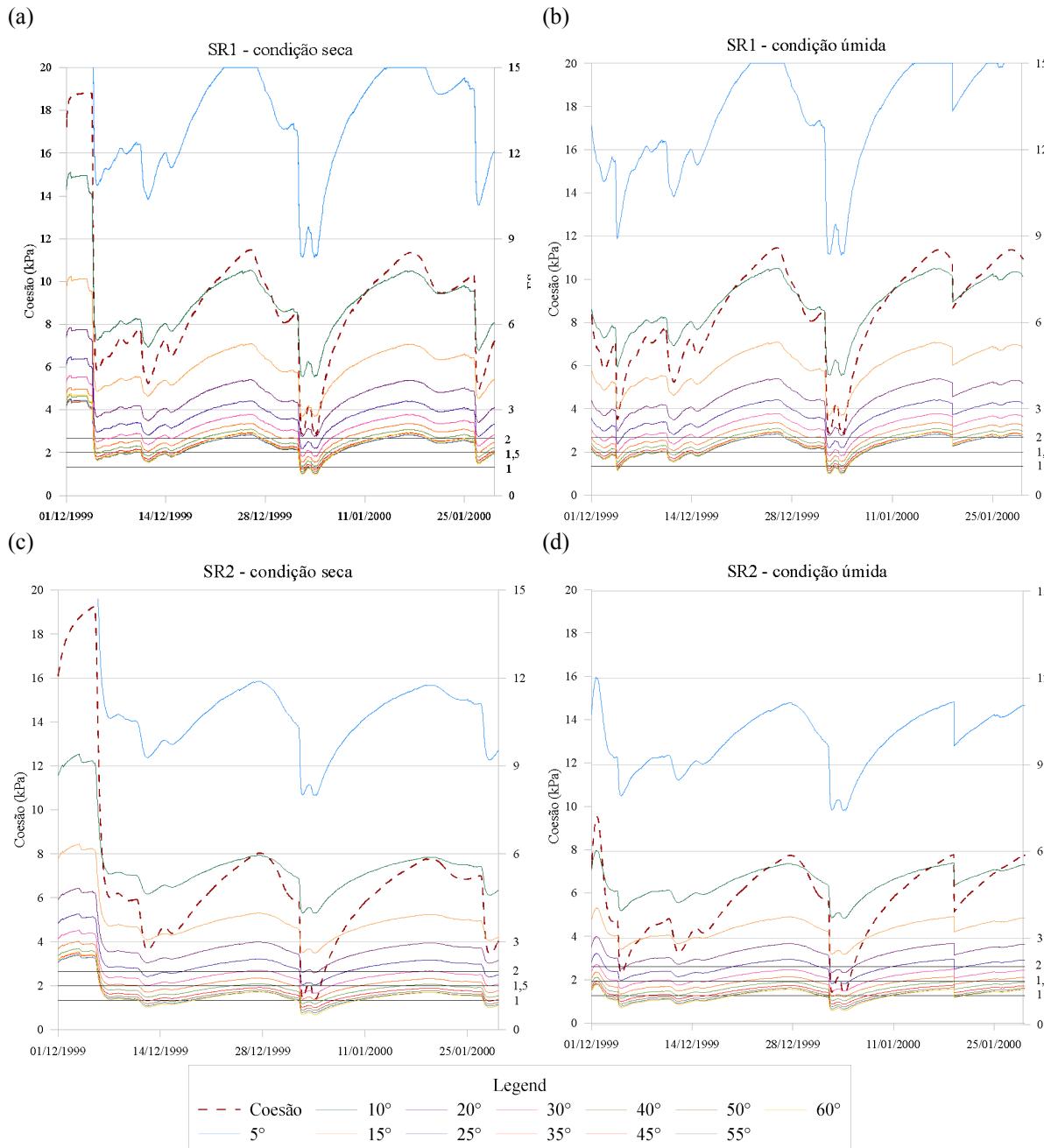


Figura 8 - Variação do fator de segurança da (a) SR1 na condição seca; (b) SR1 na condição úmida; (c) SR2 na condição seca; (d) SR2 na condição úmida da Unidade 3 de materiais inconsolidados.

A segunda situação típica pode ser observada na Figura 9, na qual estão apresentados os resultados obtidos para a segunda superfície de ruptura da Unidade 4, porém, esse comportamento se repete na SR2 das Unidades 2 e 5. Percebe-se que a coesão reduz suavemente nos primeiros dias simulados, até reduzir bruscamente e se mantém praticamente

constante até o fim do tempo simulado. Essas quatro unidades de materiais inconsolidados assemelham-se entre si pela presença de material residual do tipo II-R na segunda camada do perfil geológico, o qual se diferencia dos demais pela sua textura mais fina.

Devido a isso, e às diferenças nas propriedades hidráulicas das diferentes camadas do perfil

geológico, ocorre o fenômeno de ascensão capilar da água presente no topo da camada seguinte (Morel-Seytoux 1993). Como consequência, a umidade nessa profundidade aumenta antes mesmo da frente de molhamento alcançar a SR2 nessas unidades. Quando a água infiltrada atinge essa profundidade a umidade se torna elevada e constante durante todo o período simulado, o que resulta na queda e manutenção dos valores da coesão.

Além disso, esse comportamento também foi observado, ainda que em menor intensidade, na SR1

da Unidade 7, limite entre os materiais I-R e V-S. Nesse caso, o maior teor de fração fina encontra-se na camada inferior, diferentemente dos casos anteriores. Entretanto, a condutividade hidráulica saturada da camada I-R é maior que a camada V-S, o que explica o comportamento observado. Esse efeito destaca a influência da estratigrafia do perfil geológico no fluxo de água, o qual afeta as demais propriedades dos materiais inconsolidados, como a resistência ao cisalhamento.

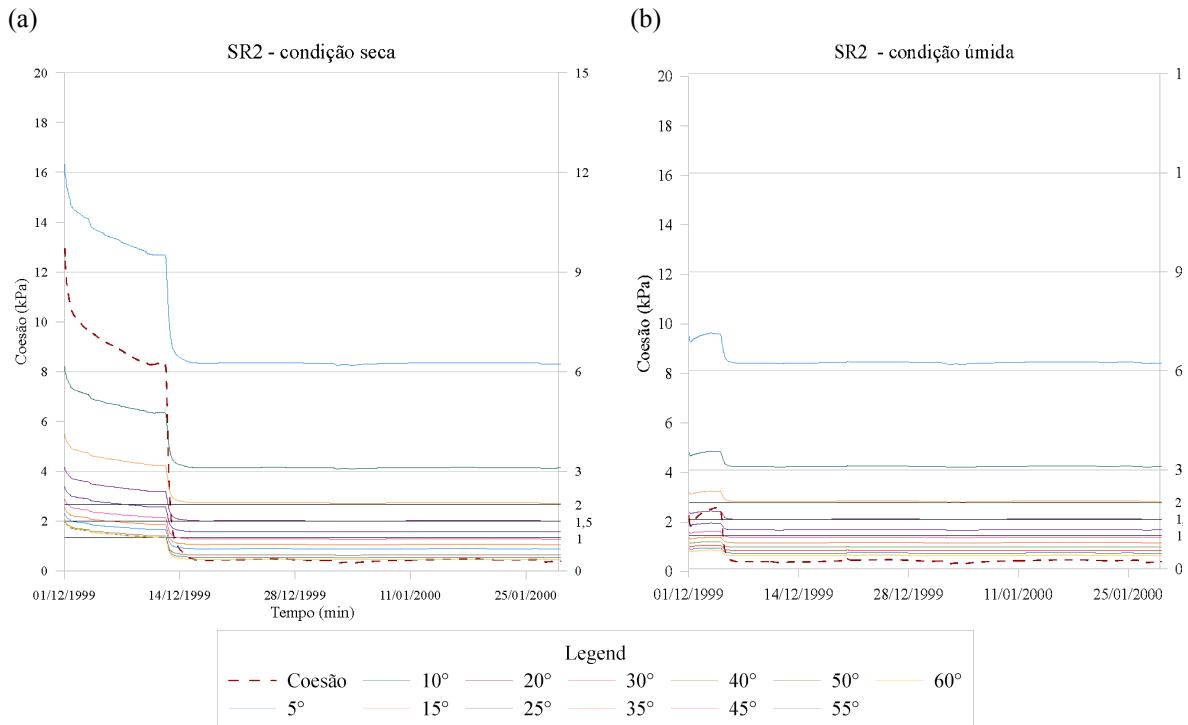


Figura 9 - Variação do fator de segurança da SR2 (a) na condição seca; (b) na condição úmida da Unidade 4 de materiais inconsolidados.

Por fim, o terceiro padrão observado diz respeito à única superfície de ruptura das Unidades 9 e 10 e a SR2 das Unidades 7 e 8, as quais situam-se na base do perfil, em 3 m de profundidade. Nesse caso, a coesão se mantém constante até reduzir bruscamente, quando a frente de molhamento alcança a profundidade dessas superfícies de ruptura. A Figura 10 apresenta os resultados obtidos para a Unidade 9.

Em relação ao tempo de ruptura, observou-se três momentos críticos que levam à estimativa de instabilidade de porções de encostas da área de estudo, em aproximadamente 4 dias, 10 dias e 34 dias. Nessas datas foram registrados os maiores picos de precipitação de 71,6 mm, 39 mm e 129,9 mm, respectivamente.

Os diferentes comportamentos observados nas três situações típicas apresentadas anteriormente refletem no tempo de ruptura das vertentes. No primeiro caso, porções de vertentes com maior declividade rompem antes que aquelas com inclinações mais suaves, o que vai ao encontro do

que foi demonstrado por Schilirò et al. (2019), por meio de ensaios de laboratório. Além disso, Rahul e Tyagi (2024) afirmam que encostas com declividade mais suave exigem durações de chuva mais longas e maior precipitação acumulada antes que ocorra o colapso. Isso explica porque encostas com declividade menor que 45° apresentam tempo estimado de ruptura de 34 dias, após o evento de precipitação de grande intensidade e a contribuição de um mês de chuva acumulada.

Mesmo que as porções de encostas mais suaves apresentem maior tempo de ruptura, é possível observar nos gráficos que para essas vertentes foram estimados baixos valores de FS desde os primeiros dias de simulação. No caso da Unidade 3, a SR2 apresenta FS inferior a 2 por mais de 27 dias nas encostas com declividade igual a 40°. O fator de segurança igual a 2 pode ser considerado como marginal e de provável instabilidade, uma vez que qualquer alteração nas condições da vertente pode levar à ruptura. Nesse sentido, uma alternativa para os sistemas de alerta de escorregamentos

translacionais é a utilização desse valor como referência para ruptura iminente, permitindo mitigar,

em tempo hábil, os danos causados por esse processo geológico.

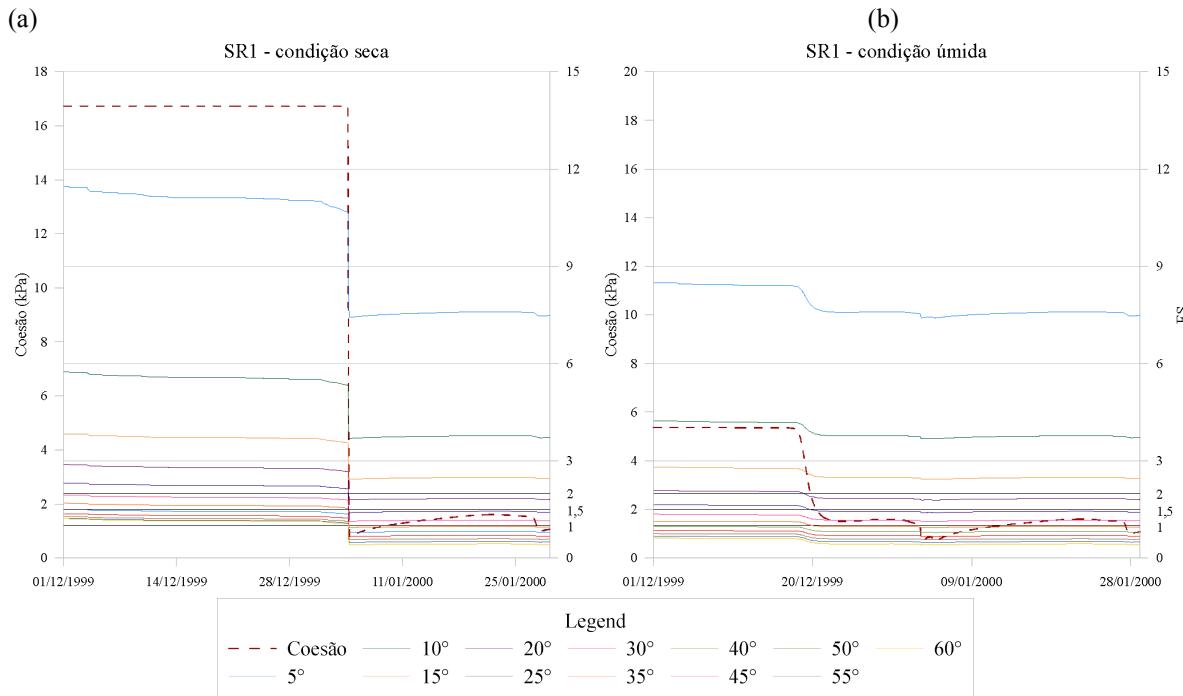


Figura 10 - Variação do fator de segurança da SR2 (a) na condição seca; (b) na condição úmida da Unidade 9 de materiais inconsolidados.

Por outro lado, as segunda e terceira situações típicas, não permitem tempo de resposta suficiente e o FS cai de 2 para 1 muito rapidamente. No caso da Unidade 2 essa diferença pode acontecer em apenas 2 horas. Isso ocorre devido à queda abrupta da coesão causada pela ascensão capilar na SR2. Na Unidade 9 a coesão reduz mais de 42% em um intervalo de 60 minutos. Enquanto na Unidade 7, essa redução chega a ser maior que 96% em um período de uma semana.

Além disso, quando a umidade inicial do material inconsolidado encontra-se elevada anteriormente ao evento de precipitação, o valor do FS já é menor desde o início do período simulado e o avanço da frente de molhamento ocorre mais rápido, devido à infiltração facilitada pela água presente nos poros. Johnson & Sitar (1990) destacam que, devido à umidade inicial elevada, um evento de chuva de menor intensidade e duração é capaz de induzir a ruptura em um talude, o que explica o menor tempo de ruptura nas duas SR quando em condição úmida. Nesse sentido, percebe-se que apenas a estimativa do FS torna-se insuficiente nessas condições. É importante o monitoramento constante da umidade volumétrica dos materiais inconsolidados em diferentes profundidades. Somente assim é possível acompanhar o avanço da frente de molhamento ao longo da profundidade e, assim, realizar ações de prevenção e mitigação de danos nas áreas atingidas.

Ao comparar os resultados simulados com os escorregamentos translacionais observados na área de estudo durante o mesmo período, observa-se a forte

relação entre o desenvolvimento de movimentos de massa gravitacionais e a declividade das vertentes. De acordo com o mapeamento das feições de escorregimento realizado por Ahrendt (2005), não foram observados nenhuma cicatriz em encostas com declividade inferior à 20° enquanto naquelas com declividade entre 30° e 40° foram desenvolvidos os escorregimentos de maior relevância. Além disso, foi destacado a predominância de escorregimentos nas Unidades 4 e 5 com profundidade máxima de 1m, profundidade próxima à SR1, onde foi observado, por meio das simulações, o fenômeno de ascensão capilar e a queda da coesão. Em relação ao tempo de ruptura, de acordo com a Defesa Civil de Campos do Jordão não foi possível a identificação precisa do tempo de ocorrência de cada escorregimento, entretanto os primeiros escorregimentos ocorreram na região das Unidades 4 e 5 (Ahrendt 2005).

A adoção de parâmetros para orientação de sistemas de alertas e alarmes de potencial ocorrência de um evento perigoso (hazard) que poderá gerar condições de perdas (riscos) e mesmo desastres é uma tarefa que demanda dados de boa qualidade, procedimentos bem testados e conhecimentos sobre o evento perigoso, como nos diferentes tipos de movimentos de massa gravitacionais. Os resultados deste estudo mostram claramente a importância de dados adequados que vêm sendo obtidos desde os trabalhos de Ahrendt (2005), Silva (2009) e Alonso (2025), assim como de modelos físico-matemáticos e de eventos de chuvas com detalhe temporal curto (15

minutos). Os resultados mostram que a partir do conhecimento das vertentes para eventos de chuva é possível propor sistemas de alertas e alarmes (*warning systems*) com o monitoramento das chuvas

e da umidade em campo e hierarquizadas para unidades de declividade. Como contribuição deste estudo propõe um fluxograma geral para orientação de estudos destinados a proposição de medidas de alertas e alarmes, apresentado na Figura 11.

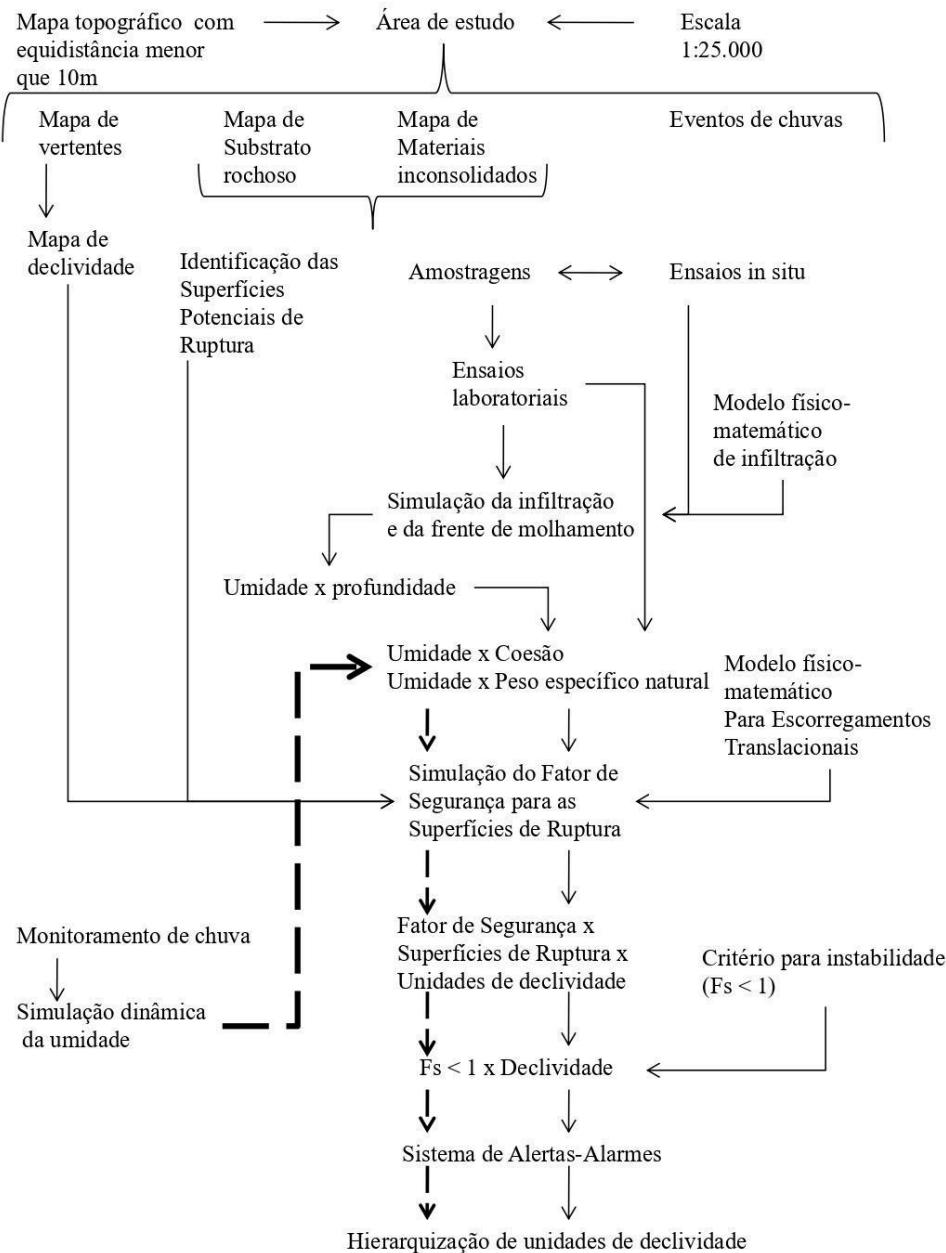


Figura 11- Fluxograma com as etapas e dados voltados a proposição de sistemas de alarmes.

5. Conclusões

O presente estudo analisou a influência da infiltração da água da chuva no comportamento dos materiais inconsolidados por meio da variação da coesão e do peso específico natural, o que permitiu a estimativa do fator de segurança e do tempo de ruptura para diferentes declividades na área de

estudo. Com os resultados deste estudo verifica-se que é possível obter dados para vertentes de maneira que os sistemas de alertas e alarmes sejam mais efetivos temporalmente e espacialmente.

De forma geral, o FS varia de acordo com a variação da umidade (consequentemente da coesão) dos materiais inconsolidados, entretanto essa relação

é percebida mais claramente nas vertentes com inclinação mais suave. À medida que a declividade aumenta, o FS inicial reduz, e a sua variação é menos sensível às oscilações da coesão. Como a coesão é uma variável dependente da umidade volumétrica, a qual, por sua vez, varia de acordo com os eventos de precipitação, existem três momentos críticos dentro do período analisado para 4, 10 e 34 dias após o início do evento de chuva.

O tempo de ruptura observado é menor para os maiores valores de declividade. Nessa condição as encostas são mais sensíveis a eventos de precipitação de menor magnitude. Para as vertentes menos íngremes percebe-se que a chuva antecedente apresenta maior importância ao umedecer o solo gradativamente até o evento de precipitação principal, em 34 dias, responsável pela ruptura. Em relação à condição de umidade inicial do material inconsolidado, uma mesma encosta apresenta menor tempo de ruptura quando se encontra com umidade volumétrica inicial elevada.

Devido a variabilidade dos materiais inconsolidados, foram observadas três situações distintas quanto ao comportamento dos perfis geológicos na área de estudo. Na primeira situação o FS cai bruscamente nos primeiros dias de simulação e se mantém inferior a 2 por pelo menos 27 dias antes de alcançar valores inferiores a 1. Entretanto, nas segundas e terceiras situações típicas o FS pode reduzir de 2 para menor que 1 em questão de horas. Nesse sentido, verifica-se que a heterogeneidade dos materiais geológicos é fundamental para as simulações, portanto, os dados de natureza geológica-geotécnica devem ser obtidos para escalas de detalhe (1:10.000).

Além disso, percebe-se a importância do uso de sistemas de alarme eficientes e de rápida resposta. O uso do FS igual a 2 como referência de ruptura em iminência é uma alternativa para que o alerta seja feito em tempo hábil para evacuação das áreas de risco e mitigação de possíveis danos. Por outro lado, nos casos em que a perda da coesão ocorre rapidamente e não há tempo de resposta suficiente, salienta-se a importância do monitoramento da umidade volumétrica dos materiais inconsolidados em diferentes profundidades de maneira que seja possível o acompanhamento do avanço da frente de molhamento no perfil geológico. Ademais, o monitoramento detalhado das chuvas é fundamental para as análises transientes que são as que se aproximam da realidade.

Por fim, o fluxograma proposto permite que sejam elaborados mapas com a hierarquia das áreas de maneira dinâmica considerando os dados de chuva, desde que os dados geológicos e geotécnicos sejam adequados e de qualidade. A adoção de modelos geológicos adequados são fundamentais

para a seleção dos modelos físico-matemáticos para simular condições de infiltração e de instabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio à pesquisa por meio da bolsa, que foi concedida ao Programa de Pós-graduação em Geotecnica, da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Declaração de autoria

V.V.A: Aspectos conceituais, Análise formal, Metodologia, Investigação, Tratamento dos dados, Simulações e Escrita.

L.V.Z: Aspectos conceituais, Metodologia, Revisão do texto e Supervisão.

Referências

- ALONSO, V. V. 2025. Prognóstico de deslizamentos translacionais em vertentes naturais sob condições de chuvas transientes baseado em SIG e Python: Estudo de caso em Campos do Jordão (SP). 2025. Dissertação de Mestrado em Geotecnica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 197p.
- AHRENDT, A. 2005. Movimentos de Massa Gravitacionais - Proposta de um Sistema de Previsão: Aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP. 2005. Tese de Doutorado em Geotecnica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 364p.
- BAAS, S., RAMASAMY, S., PRYCK, J. D., BATTIST, F. 2008. Disaster risk management systems. Environment and Natural Resources Service Series, 13. FAO, Rome, 90p.
- BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. 2008. TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. U.S. Geological Survey, Virginia, 75p.
- ENOKI, M.; KOKUBU, A. A.; IKEDA, Y. 1999. Infiltration of rainwater and slope failure. In: GRIFFITHS, STOKES; THOMAS (eds) Landslides: Balkema, Rotterdam, 27-35p.
- HE, Y.; YU, Z.; ZHANG, Z.; CHEN, B.; ZHANG, K. 2022. Effects of Rainfall on Mechanical Behaviors of Residual-Soil Landslide. Frontiers in Earth Science, 10.
- HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, P. 2008. The landslide handbook—A guide to understanding landslides. Geological Survey Circular, Reston, Virginia, 129 p.
- JOHNSON, K.A., SITAR, N. 1990. Hydraulic conditions leading to debris flow initiations. Canadian Geotechnical Journal, 27: 789-801.
- LU, N.; GODT, J. 2008. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. Water Resources Research, 44.
- MACEDO, E. S.; SANDRE, L. H. 2022. Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 12, (1):110-117.
- MATSUSHI, Y.; MATSUKURA, Y. 2006. Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65: 449-455.
- MEDINA, V.; HÜRLIMANN, M.; GUP, Z.; LLORET, A.; VANUAT, J. 2021. Fast physically-based model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale. Catena, 201.
- MONTRASIO, L. VALENTINO, R. 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. Natural Hazards Earth Syst. Sci., 8: 1149-1159.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. 1993. Capillary Barrier at the Interface of Two Layers. In: RUSSO, D.; DAGAN, G. (eds.) Water Flow and Solute Transport in Soils: Developments and Applications. Berlin: Springer-Verlag, p.136-151.

- RAHUL, S.; TYAGI, A. 2024. Physics-based time-of-failure determination of rainfall-induced instability in lateritic soil slopes. *Engineering Geology*, v. 344.
- RASSAM, D.; ŠIMÚNEK, J.; MALLANTS, D.; VAN GENUCHTEN M. TH. 2018. HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media: Tutorial, Version 1.00 Australia: CSIRO Land and Water, p. 183.
- SILVA, A. F. 2009. Estudo de previsão de escorregamento a partir do fator de segurança 3D: Campos do Jordão-SP. 2009. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 353p.
- SILVA, A. F.; TALAMINI, A. A.; ZUQUETTE, L. V. 2021. Engineering geological mapping procedures in data-scarce hillsides for shallow landslide assessments: Applications in southeastern Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, 111.
- SCHILIRÒ, L.; DJUWYWP, G. P.; EPOSITO, C.; MUGNOZZA, G. S. 2019. The Role of Initial Soil Conditions in Shallow Landslide Triggering: Insights from Physically Based Approaches. *Geofluids*.
- UNISDR - UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. Indicators of Progress: Guidance on Measuring the Reduction of Disaster Risks and the Implementation of the Hyogo Framework for Action. 2008. UNISDR, Geneva, Switzerland, 59p.
- UNISDR - UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION, 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. Disponível em : <https://www.unisdr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>. Acesso em 12 de Fevereiro de 2025.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- ZHANG, L. L.; ZHANG, J.; ZHANG, L. M.; TANG, W. H. 2011. Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review. *Geotechnical Engineering*, 164: 299-316

¹Recebido 28 de fevereiro de 2025
Aceito 23 de agosto de 2025