DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/38

Avaliação do fator de segurança, probabilidade de falha e risco de um talude em Lavras (MG)

Raquel Mariano Linhares
Docente do magistério superior, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, raquellinhares@unipampa.edu.br

Anna Paula Santos Souza
Assistente de Engenharia, Tellus Company, Belo Horizonte, Brasil, anna.paula98@hotmail.com

Gabriela Campos de Oliveira
Engenheira Civil, Belo Horizonte, Brasil, gabrielacdeoliveira99@gmail.com

Diego Arthur Hartmann
Docente do magistério superior, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, diegohartmann@unipampa.edu.br

RESUMO: Centros urbanos e regiões periféricas brasileiras enfrentam desafios sócio-ambientais similares, caracterizados por um rápido aumento populacional e uma distribuição territorial desordenada. Logo, populações economicamente vulneráveis acabam ocupando locais impróprios para habitação com riscos de alagamento e/ou de instabilidade de encostas. Na geotecnia brasileira, tradicionalmente se utilizam métodos determinísticos para investigar o risco de movimentos de massa de solo e/ou rocha. Estes métodos trazem como resultados uma superfície potencial de ruptura e um fator de segurança, sendo exemplos o Método dos Taludes Infinitos e diferentes abordagens do Método das Fatias, como Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Morgenstern-Price. Já os métodos probabilísticos complementam o estudo determinístico levando em consideração a variabilidade inerente dos parâmetros de caracterização e resistência de solos. Estes métodos têm como resultado uma probabilidade de falha, como é o caso do método de Monte Carlo. O objetivo desse trabalho foi avaliar a estabilidade global de um talude de solo no município de Lavras/MG por meio de análises determinísticas e probabilísticas, cotejando os resultados com a classificação de risco previamente realizada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). As análises por ambos os métodos foram conduzidas em software de equilíbrio limite, considerando duas seções críticas: maior altura total e maior inclinação. Nestas seções, variou-se tanto a condição de saturação do maciço, como a existência de cargas aplicadas na crista, analisando os efeitos isolado e combinado destas alterações. Resultados mostraram que a seção de maior altura apresentou menores FSs nas análises determinísticas, sendo considerada mais crítica. Para melhor entendimento do efeito das alterações, calculou-se a diminuição percentual dos FSs dos cenários com carga, saturado e saturado com carga, em relação ao cenário sem carga e não saturado. Foram observadas diminuições de 15,19%, 52,94% e 56,40%, respectivamente, indicando que os efeitos destas alterações de cenário se sobrepõem em certos pontos, não sendo totalmente cumulativos. Para a seção de maior inclinação, essas diminuições foram, respectivamente, de 25,46%, 47,92% e 55,99%, indicando que a imposição de carga afeta mais os FSs de taludes mais íngremes, enquanto o aumento de saturação afeta mais os FSs de taludes mais altos. Análises probabilísticas corroboram resultados da determinística, resultando em maiores probabilidades de falha na seção de maior altura (23,57%) do que a seção de maior inclinação (8,32%) para o cenário saturado com carga. Com os resultados, foi possível reiterar a classificação do talude analisado como uma área de alto risco.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Método do equilíbrio limite, Métodos probabilísticos de Monte Carlo, Fator de Segurança, Probabilidade de Falha.

ABSTRACT: Urban centres and peripheral areas in Brazil face similar socio-environmental challenges, characterized by a rapid and disordered growth. As a consequence, economically vulnerable populations tend to occupy inappropriate and risky areas, susceptible to flooding or landslides. In Brazilian geotechnical practice, deterministic analyses are commonly used to assess the risk of soil or rock movements. These

methods result in a potential failure surface (PFS) and a Factor of Safety (FS); examples include the Infinite Slope Method and various approaches of the Method of Slices, such as Fellenius, Simplified Bishop, Simplified Janbu, and Morgenstern-Price. Probabilistic Methods complement the deterministic approach by considering the inherent variability of soil characterization and strength parameters. These methods result in a Probability of Failure (PoF), such as the Monte Carlo Method. The objective of this study was to evaluate the global stability of a soil slope in the city of Lavras/MG through deterministic and probabilistic analyses, comparing the results with the risk classification previously established by the Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM). Analyses for both methods were conducted using limit equilibrium software, considering two critical sections: the one with the greatest total height and the one with the steepest inclination. In these sections, both the saturation condition of the mass and the existence of surcharges on the crest were varied, analyzing the isolated and combined effects of these changes. Results showed that the section with the greatest height presented lower FS values in deterministic analyses, being considered more critical. To better understand the effect of these changes, the percentage decrease in FS was calculated for the scenarios with surcharge, saturated, and saturated with surcharge, relative to the unsaturated scenario without surcharge. Decreases of 15.19%, 52.94%, and 56.40% were observed, respectively, indicating that the effects of these scenario changes overlap at certain points and are not totally cumulative. For the steepest section, these decreases were 25.46%, 47.92%, and 55.99%, respectively, indicating that the imposition of surcharges affects the FS of steeper slopes more significantly, while increased saturation affects the FS of higher slopes more intensely. Probabilistic analyses corroborate the deterministic results, resulting in higher PoF in the section with the greatest height (23.57%) compared to the steepest section (8.32%) for the saturated scenario with surcharge. Based on these results, it was possible to reiterate the classification of the analyzed slope as a high-risk area.

KEYWORDS: Slope stability; Limit equilibrium method; Monte Carlo probabilistic methods; Factor of Safety; Probability of Failure.

1 INTRODUÇÃO

O rápido aumento populacional nos centros urbanos e regiões periféricas acarretam uma distribuição territorial desordenada e ocupação de áreas de risco, resultado da combinação de fatores socioeconômicos, culturais e políticos complexos. Em Minas Gerais, mais de 582 mil pessoas vivem em áreas de risco geológico (SGB/CPRM, 2024), definido por Cerri e Amaral (1998) como uma situação de perigo, perda ou dano, ao homem e suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processo geológico, induzido ou não.

O Ministério das Cidades e o IPT (2007) estabeleceram uma classificação dos riscos geológicos, utilizando as categorias de baixo, médio, alto e muito alto (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação dos riscos geológicos (adaptado de IPT, 2007).

Grau de risco	Significado
Baixo (R1)	Nas condições atuais não há risco evidente de acidentes geotécnicos ou hidráulicos.
Médio (R2)	Nas condições atuais há feições incipientes de instabilidade, indicando um risco potencial de acidentes geotécnicos ou hidráulicos
Alto (R3)	Nas condições atuais há riscos de acidentes geotécnicos ou hidráulicos graves
Muito alto (R4)	Nas condições atuais há riscos e alta probabilidade de acidentes geotécnicos ou hidráulicos graves

A ABNT NBR 11682 (2009) trouxe classificações distintas de risco (alto, médio e baixo) em decorrência do nível de segurança requerido contra a perda de vidas humanas e contra danos materiais e ambientais, apresentando fatores de segurança mínimos a depender da combinação destes cenários (Tabela 2).

Tabela 2. Fatores de segurança mínimos para deslizamentos (ABNT NBR 11682, 2009).

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,4	1,3
Médio	1,4	1,3	1,2
Baixo	1,4	1,3	1,2

No contexto do risco geológico, a avaliação da estabilidade de um talude torna-se essencial em diversas situações práticas, como em encostas naturais, cortes ou escavações, entre outras, e podem ser conduzidas por meio de métodos determinísticos, que buscam obter um Fator de Segurança (FS) (Gerscovich, 2012). A Teoria do Equilíbrio Limite se posiciona entre estes métodos, e pode ser aplicada a diversas condições distintas de geometria e homogeneidade do solo, como o Método do Talude Infinito e o Método das Fatias. Como este último é matematicamente indeterminado, diferentes simplificações matemáticas foram propostas, caracterizando-se como mais ou menos conservadoras, entre elas: Fellenius, Bishop, Janbu e Morgenstern-Price.

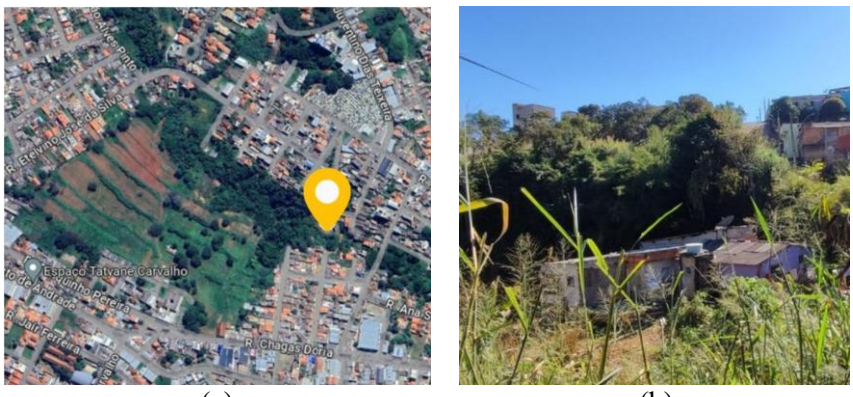
Contudo, a determinação do FS depende de parâmetros de variabilidade inerente à condição de material natural do solo e da rocha. Uma alternativa para dirimir essa dependência e avaliar os riscos de obras civis adequadamente, é realizar análises probabilísticas, incorporando a variabilidade de parâmetros-chave e resultando em uma distribuição estatística do fator de segurança, por meio da probabilidade de falha (PF) e a confiabilidade das obras. (Aoki, 2008), Pimentel *et al*., 2017). Um desses é o Método de Monte Carlo, que simula a flutuação aleatória dos parâmetros de entrada, como coesão, ângulo de atrito e peso específico, em uma função determinística (Penning, 2022; Araújo, 2013; Paula, 2014).

Neste trabalho, a estabilidade de um talude em Lavras (MG) foi analisada por métodos determinísticos e probabilísticos, utilizando software especializado. Após, os resultados destas análises foram cotejados com classificações de risco prévias.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo, seções de análise e parâmetros geotécnicos

Com base no relatório de risco do Sistema Geológico Brasileiro (SGB/CPRM, 2015) da cidade de Lavras (MG), escolheu-se uma área no Bairro Dona Flor classificada como alto risco geológico para ser estudada (Figura 1a). No local, há uma casa situada ao pé de uma encosta com aproximadamente 8 metros de altura (Figura 1b) e, a montante desta casa, há um depósito de resíduos, contendo terra, lixo e entulho, e, acima deste, uma segunda residência; ambos impondo cargas importantes ao talude, que foram contabilizadas nas análises de estabilidade.



(a) (b)

Figura 1. Local de estudo: (a) geral e (b) casa ao pé do talude.

Foi realizado levantamento topográfico por aerofotogrametria digital utilizando VANT. As 89 fotografias capturadas foram utilizadas para a geração de um modelo tridimensional utilizando o software 3DF Zephyr em sua modalidade licença educacional gratuita (Figura 2), de onde foram obtidas as duas seções críticas de análise: uma abrangendo a inclinação mais acentuada, de aproximadamente 60º (A-A'), e outra a maior altura de talude, de aproximadamente 9 metros (B-B'). O depósito de entulho e a residência à montante foram considerados cargas uniformemente distribuídas nos valores de 10 e 20 kPa, respectivamente (ABNT NBR 11682, 2009).

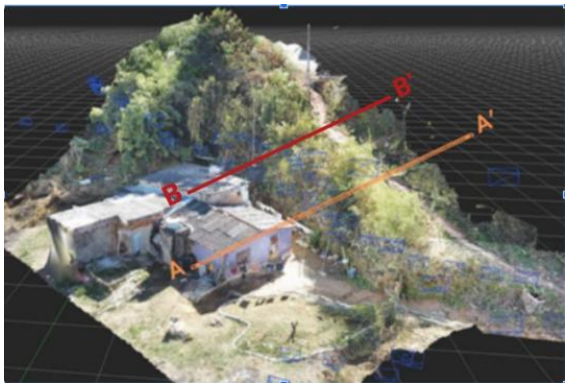


Figura 2. Modelo tridimensional da área de estudo e localização das seções críticas.

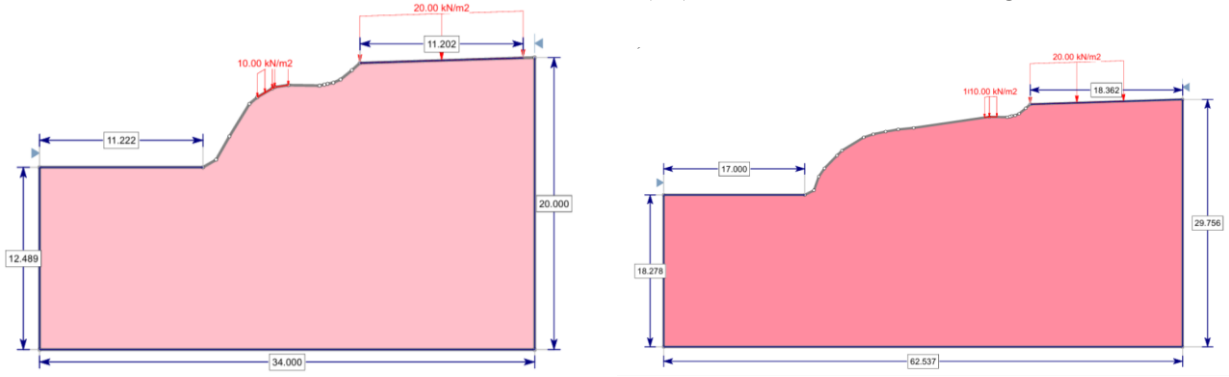
Segundo o levantamento pedológico de Silva (2017), o solo da área de estudo foi identificado como PVAd – Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. Nas simulações numéricas, foram utilizados valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados por Rocha (2003) e calculados a partir destes (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros de resistência ao cisalhamento para solo PVAd (adaptado de Rocha, 2003).

Parâmetro	Valor
γ_d (kN/m³)	10,08
γ_{nat} (kN/m³)	12,65
γ_{sat} (kN/m³)	16,03
φ (°)	7,8
c (kPa)	42,39

2.2 Modelos e análises

A partir das seções A-A' e B-B', foram conduzidas análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade em quatro diferentes cenários: (I) talude seco sem carregamentos, (II) talude seco com carregamentos, (III) talude saturado sem carregamentos e (IV) talude saturado com carregamentos.



(a) (b)

Figura 3. Geometria das seções de análise e carregamentos: a) Seção A-A'; b) Seção B-B'.

Tanto nas análises determinísticas quanto probabilísticas, os Fatores de Segurança (FS) foram calculados segundo os principais métodos de equilíbrio limites fornecidos pelo software, com diferentes simplificações das indeterminações matemáticas: Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Morgenstern-Price. Para consideração da saturação do solo, o software disponibiliza o parâmetro Ru, que representa a fração da poropressão em relação à tensão total sobre o corpo do talude. Para a condição de solo saturado, foi utilizado Ru=0,9 (empregado na prática da engenharia) e para a condição de solo totalmente seco, Ru= 0.

A variação dos parâmetros inseridos e as Probabilidades de Falha (PF) resultados das análises probabilísticas foram calculadas segundo o método de Monte Carlo com distribuição normal de probabilidade, sendo ajustados conforme sua influência na resistência ao cisalhamento do solo em: coesão e o ângulo de atrito 30%, peso específico 10% e Ru 20%.

3 RESULTADOS

3.1 Análises determinísticas e probabilísticas

Os resultados das análises determinísticas (FS mínimos) e probabilísticas (FS mínimos e PF) das seções A–A’ e B–B’, foram sintetizados na Tabela 4. Ressalta-se que os menores FS e as maiores PF encontrados para cada cenário, método e seção estão evidenciados em negrito.

Tabela 4. Resultados das análises determinísticas e probabilísticas das seções A-A’ e B-B’.

Cenário	Método	Análise determinística		Análise Probabilística			
		Seção A-A’ (FS)	Seção B-B’ (FS)	Seção A-A’ (FS)	Seção A-A’ (PF%)	Seção B-B’ (FS)	Seção B-B’ (PF)
I. Solo seco sem cargas	Fellenius	4,01	3,11	4,06	**0,10**	3,15	0,30
	Bishop	4,11	3,23	4,16	**0,10**	3,27	0,10
	Janbu	**3,90**	**2,97**	**3,96**	**0,10**	**3,01**	**0,40**
	M-P	4,11	3,23	4,17	**0,10**	3,26	0,10
II. Solo seco com cargas	Fellenius	3,09	2,71	3,13	0,70	2,73	0,70
	Bishop	3,17	2,81	3,21	0,70	2,84	0,60
	Janbu	**2,91**	**2,52**	**2,94**	**0,81**	**2,54**	**0,80**
	M-P	3,17	2,81	3,20	0,60	2,83	0,50
III. Solo saturado sem cargas	Fellenius	2,16	1,52	2,18	3,60	1,54	12,60
	Bishop	2,13	1,52	2,14	3,80	1,53	13,04
	Janbu	**2,03**	**1,40**	**2,05**	**4,12**	**1,41**	**17,85**
	M-P	2,13	1,52	2,15	3,71	1,53	13,04
IV. Solo saturado com cargas	Fellenius	1,85	1,43	1,86	5,20	1,44	16,00
	Bishop	1,84	1,42	1,85	5,50	1,44	16,25
	Janbu	**1,72**	**1,29**	**1,73**	**8,32**	**1,31**	**23,57**
	M-P	1,84	1,42	1,85	5,51	1,44	16,25

Constata-se que, em todas as seções e análises, o valor mínimo do FS decresce progressivamente do cenário I (solo seco sem cargas) para o cenário IV (solo saturado com cargas adicionais), o que era esperado, uma vez que cargas adicionais na crista aumentam os esforços solicitantes e as poropressões resultantes da saturação reduzem a resistência ao cisalhamento. Destaca-se que os menores valores de FS e os maiores de PF foram obtidos por meio do método de Janbu simplificado, demonstrado ser mais o conservador. Por outro lado, os maiores valores de FS e as menores PF, em cenários saturados, foram frequentemente obtidos pelo Método de Fellenius.

A seção B-B’, de maior altura, apresentou sempre menores valores de FS do que a seção A-A’, de maior inclinação, em todos os cenários; também apresentou as maiores PF, na maioria dos cenários. Tal parece indicar que seções de maior altura são mais afetadas tanto pelo acréscimo de carga quanto pela saturação.

Foi calculado o decréscimo do FS mínimo, encontrado pelo método de Janbu nas análises determinísticas, para os cenários II, III e IV em relação ao cenário I, de forma a melhor compreender o impacto

da adição de cargas, saturação e ambos no FS, de maneira isolada e conjunta com a inclinação e altura do talude (Tabela 5)

Tabela 5. Decréscimo do FS mínimo em relação ao Cenário I.

Cenário	Seção	
	A-A'	B-B'
	Decréscimo no FS em relação ao Cenário I (%)	
II. Solo seco com cargas	25,46	15,19
III. Solo saturado sem cargas	47,92	52,94
II+III	**73,38**	**68,13**
IV. Solo saturado com cargas	55,99	56,40

Para a seção de maior inclinação da face (A-A'), a redução do FS mínimo no cenário seco, somente devido a aplicação de cargas (Cenário II), foi de 25,46%, substancialmente maior do que aquela vista na seção de maior altura (15,19%, seção B-B'). Para o cenário saturado, tomando o Cenário III como referência, a diminuição do FS observada quando da aplicação de cargas (Cenário IV) foi de 15,27% para a Seção A-A' e 7,86% para a Seção B-B', corroborando a hipótese de que a imposição de carga afeta mais os FSs de taludes mais íngremes.

Analisando-se os pares Cenário I-III e Cenário II-IV, percebe-se que o aumento de saturação acarretou em uma redução do FS mínimo de 47,92% e 40,89% para a seção A-A' e 52,94% e 48,81% para a seção B-B', indicando que o aumento de saturação afeta mais os FSs de taludes mais altos.

Pode-se perceber que, para ambas as seções, o decréscimo do FS no cenário IV (saturação+carga) foi menor do que a soma dos decréscimos dos fatores isolados (saturação e carga).

3.3 Análise de risco

O estudo realizado na área pela SGB/CPRM em 2015 classificou a região como sendo de alto risco de deslizamentos. No presente trabalho, a área foi classificada como risco geológico alto (R3), segundo o IPT (Tabela 1), e de risco médio, conforme a ABNT NBR 11682 (2009) (Tabela 2). A seção B–B', de maior risco de ruptura, apenas no Cenário IV apresentou FS inferior ao mínimo exigido pela norma (1,4). As classificações realizadas pela SGB/CPRM e pelo método da ABNT podem ser consideradas mais conservadoras quando comparadas às análises determinísticas e probabilísticas, por serem menos descritivas. Os valores de FS e PF trazem maior segurança em relação à classificação de risco. Contudo, sugere-se manter a classificação do talude analisado como de alto risco, sendo indicada atenção dos órgãos responsáveis.

4 CONCLUSÕES

No presente estudo, analisou-se a estabilidade de um talude na cidade de Lavras (MG), previamente classificado como alto risco geológico, por métodos determinísticos e probabilísticos. Foram escolhidas duas seções críticas (maior altura e maior inclinação), investigadas em quatro cenários distintos, variando-se concomitantemente a saturação do solo e a presença de cargas na crista do talude.

Dentre as simplificações do método das fatias estudadas (Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Morgerstern-Price), Janbu se mostrou o mais conservador, resultando sempre em menores Fatores de Segurança (FS) e maiores Probabilidades de Falha (PF). Em cenários saturados, Fellenius resultou sempre em maiores FS e menores PF.

A seção de maior altura apresentou-se como mais crítica em comparação à seção de maior inclinação, tanto nas análises determinísticas – resultando menores valores absolutos de FS mínimos e maiores decréscimos de FS comparando-se diferentes cenários, quanto nas análises probabilísticas – apresentando maiores PF. A imposição de carga afetou mais o FS do talude mais íngreme, enquanto o aumento da saturação afetou mais o FS do talude mais alto. Ademais, a combinação dos fatores saturação e acréscimo de cargas gerou um menor decréscimo no FS do que a soma desses efeitos isolados.

Diferentes abordagens classificaram a área como de alto risco de deslizamentos (SGB/CPRM, 2015) e risco médio (ABNT NBR 11682, 2009). Com base nas análises probabilísticas e determinísticas efetuadas

neste trabalho, especialmente considerando-se condições de saturação e carregamento, recomenda-se manter a classificação do talude como de alto risco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aoki, N. (2008) Dogma do fator de segurança. In: VI Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, *Anais...* ABMS. v. 1, p. 9-42.

Araújo, F. R. (2013) *Risco geotécnico: uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de taludes da Barragem Olho d'Água no Estado do Ceará.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 128 f.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2009). NBR 11.682: *Estabilidade de Encostas.* Rio de Janeiro.

Cerri, L. E. S.; Amaral, C. P. (1998). Riscos Geológicos. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (ed.). *Geologia de engenharia*, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, p. 301-310.

Gerscovich, D. M. S. (2012). *Estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 192 p.

Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2007) *Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.* Disponível em: http://planodiretor.mprs.mp.br/arquivos/mapeamento.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

Paula, R. R. (2014) *Método de Monte Carlo e aplicações.* Monografia (Graduação em Matemática com ênfase em Matemática Computacional), Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 83 f.

Penning, R. S. (2022) *Análise de estabilidade de taludes a partir do método de elementos finitos usando campos estocásticos.* Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 80 f.

Pimentel, K. C. A.; Souza, T. C.; Campello, I. C.; Silva, P. H. A. (2017) Avaliação dos Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes de Barragens. In: XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte. *Anais...* CBDB.

Rocha, W. W. (2003) *Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG.* Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Planta), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 123 p.

Serviço Geológico Do Brasil (2015) *Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchente e inundação: Lavras – Minas Gerais.* Ministério de Minas e Energia, Brasília, 22 p.

Serviço Geológico Do Brasil (2024) *Mais de 582 mil pessoas vivem em áreas de risco geológico em Minas Gerais.* Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/w/mais-de-582-mil-pessoas-vivem-em-areas-de-risco-geologico-em-minas-gerais>. Acesso em: 07 fev. 2026.

Silva, E. T. S. (2017) *Mapeamento digital de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG).* Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 102 f.