XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/12

Análise de estabilidade de talude sujeito a precipitação intensa em Juiz de Fora/MG

Jonathan do Amaral Braz
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

Gabriel Dimas Campos da Fonseca
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, gabriel.dimas@estudante.ufjf.br

Sabrina Roberta de Faria
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, sabrina.faria@estudante.ufjf.br

Luís Fernando Martins
Subsecretário de Proteção e Defesa Civil, Prefeitura de Juiz de Fora, luisfernandoengenharia@gmail.com

Tatiana Tavares Rodriguez
Docente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, tatiana.rodriguez@ufjf.br

RESUMO: A infiltração de água proveniente de precipitações é um dos principais fatores que influenciam a estabilidade de taludes em solos não saturados. Períodos de chuvas intensas em regiões tropicais podem desencadear movimentos de massa, que são fenômenos de risco em áreas urbanas. Estudos recentes da literatura indicam que, entre 2017 e 2022, a maior parte dos deslizamentos na cidade de Juiz de Fora/MG ocorreram com chuvas superiores a 140 mm acumuladas em 96 horas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é executar a modelagem de fluxo de precipitação intensa, seguida de análise de estabilidade, em um talude de solo residual no bairro Linhares, onde houve execução de obras irregulares para loteamento em terreno público, seguido de formação de talude de corte com indícios de processo erosivo. Para isso, são usados resultados de ensaios de caracterização física, de cisalhamento direto, do papel filtro e do infiltrômetro. Os dados obtidos são usados para modelagem de fluxo no software SEEP/W, para obtenção das poropressões em situações de chuvas acumuladas de 96 horas, coletadas de relatórios da Defesa Civil local. Por fim, o conjunto é submetido ao software SLOPE/W para análise de estabilidade. Concluiu-se que a precipitação interfere negativamente na estabilidade do talude, provocando uma queda de 6,7% no Fator de Segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Solo não saturado, Solo residual, Estabilidade de talude, Precipitação.

ABSTRACT: Infiltration is one of the main factors influencing the stability of slopes in unsaturated soils. Intense rainfall periods in tropical regions can trigger mass movements, which are hazard phenomena in urban areas. Recent literature studies indicate that, between 2017 and 2022, most landslides in the city of Juiz de Fora/MG occurred with accumulated rainfall exceeding 140 mm in 96 hours. Thus, this study aims to perform seepage modeling of intense rainfall, followed by stability analysis, on a residual soil slope in the Linhares neighborhood, where irregular works for subdivision were executed on public land, followed by the formation of a cut slope with indications of an erosive process. For this purpose, results from physical characterization tests, direct shear tests, filter paper tests, and infiltrometer tests are used. The obtained data are used for seepage modeling on SEEP/W software to obtain porepressures under 96-hour accumulated rainfall conditions, collected from local Civil Defense reports. Finally, the set is submitted to SLOPE/W software for stability analysis. It was concluded that precipitation negatively interferes with slope stability, causing a 6.7% drop in the Factor of Safety.

KEYWORDS: Unsaturated soil, Residual soil, Slope stability, Rainfall.

1 INTRODUÇÃO

Estabilidade de taludes é um tema de grande importância em engenharia geotécnica, associado à eficiência de projetos e à prevenção de desastres, com objetivo de evitar danos ambientais, materiais e humanos. Um talude, quando em condição de instabilidade, está sujeito a movimentos de massa, que consistem no deslocamento de porção de solo ou rocha. Esse fenômeno pode acontecer de diversas formas (Varnes, 1958; Vargas, 1985), de acordo com as condições geológicas e climáticas do local (Gerscovich, 2016).

A estabilidade pode ser condicionada positiva ou negativamente por fatores internos e externos ao talude. Dentre os fatores internos, pode-se citar a geometria do maciço e os parâmetros de resistência do solo, intercepto coesivo e ângulo de atrito. Tais parâmetros são obtidos pela envoltória de resistência, gerada através de ensaios de laboratório. Dentre os fatores externos, cita-se a intervenção humana, que pode acontecer, por exemplo, com alteração da geometria e retirada de vegetação (Gerscovich, 2016). Tais ações facilitam o fenômeno da infiltração no solo, que pode influenciar negativamente a estabilidade do talude de duas formas: causando a elevação do nível freático e, consequentemente, a saturação do solo; ou alterando o estado de tensões do maciço, aumentando a poropressão em regiões não saturadas (Futai, 2014).

Para casos envolvendo solos não saturados, a envoltória de resistência também considera a sucção do solo, como é apresentado na Equação 1, proposta por Fredlund *et al.* (1978).

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)_f \, tg\phi' + (u_a - u_w)_f \, tg\phi^b \quad (1)$$

em que:
c'e Φ': parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;
$(\sigma_n - u_a)_f$: tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;
$(u_a - u_w)_f$: sucção mátrica na ruptura;
Φ^b: parâmetro que quantifica o aumento de resistência devido a um aumento na sucção;

A análise de estabilidade é uma técnica que relaciona a capacidade do talude de resistir a tensões de cisalhamento e as tensões atuantes sobre ele. Tal relação apresenta como resultado um indicador numérico, o Fator de Segurança (FS). No Brasil, a NBR 11682 (ABNT, 2009) apresenta valores FS mínimos para que um talude seja considerado estável, sendo estes valores determinados com base na segurança contra danos ambientais, materiais e humanos, como é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Fatores de segurança mínimos (ABNT, 2009)

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

A cidade de Juiz de Fora possui média anual de chuvas, aferidas entre 1991 e 2020, de 1564,80 mm. Em seu período chuvoso, de outubro a março, possui média esperada de 1339,40. A Secretaria de Proteção de Defesa Civil (2018, *apud* Martins, 2022) registrou 1714 ocorrências de movimentos de massa entre 2017 e 2022, sendo 90% delas em regiões de risco geológico. Além disso, segundo Martins (2022), 51% destes movimentos de massa ocorreram com chuvas de volumes superiores a 100 mm acumuladas em 96 horas. Entende-se, portanto, que há uma relação de influência entre precipitações intensas e ocorrências do fenômeno geológico.

O bairro Linhares, na zona leste da cidade, apresenta um caso de obras irregulares em loteamento público, em que é possível observar, tanto alteração na geometria natural do talude, quanto retirada de vegetação e consequente formação de voçoroca. O talude em questão é objeto de estudo em Cordeiro *et al.* (2025), que investigam a relação entre o surgimento da voçoroca com a atividade antrópica no local e em Braz *et al.* (2025), que realizam análises de estabilidade com diferentes angulações para nortear projetos de recuperação da área.

Considerando a relação entre precipitação intensa e movimentos de massa na cidade e o caso anteriormente apresentado, o objetivo deste trabalho é investigar a influência de chuvas acumuladas em 96 horas na estabilidade do talude do bairro Linhares, por meio de modelagem de fluxo e análise de estabilidade.

2 LOCAL DE ESTUDO

O talude está localizado na Rua Diva Garcia, bairro Linhares, zona leste de Juiz de Fora/MG, em área pública de coordenadas geográficas -21.718166, -43.320805, referenciadas no sistema geodésico WGS84 (World Geodetic System 1984). O terreno sofreu loteamento irregular sem licenciamento ambiental, apresentando modificações expressivas na sua morfologia original. Como consequência, verificou-se a intensificação de processos erosivos, com a formação de uma voçoroca ao pé do talude, e o carreamento de solo, que atingiu a via principal do bairro e comprometeu a rede de águas pluviais (Prefeitura de Juiz de Fora, 2024). A região, de litologia metamórfica complexa, apresenta uma camada de solo residual maduro de coloração amarelada, neste trabalho chamado de Solo Amarelo, seguido por uma camada de solo residual jovem de coloração rosa, chamado de Solo Rosa. A Figura 1 mostra, à esquerda, vista superior do loteamento irregular e, à direita, vista frontal do talude estudado. O ponto P1 indica a região onde houve coleta de amostras para ensaios de laboratório com o Solo Rosa e o ponto P2, com o Solo Amarelo.



Figura 1. Vista superior do loteamento irregular à esquerda e talude de estudo à direita (Braz *et al.*, 2025)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização física e envoltórias de resistência

O Solo Amarelo e o Solo Rosa foram objeto de estudo em Braz *et al.* (2025), que realizaram ensaios de caracterização física. A classificação granulométrica em função do diâmetro das partículas e a massa

específica dos sólidos para os dois solos é apresentada na Tabela 2. O Solo Amarelo é classificado como uma argila arenosa e o Solo Rosa é classificado como uma areia siltosa.

Tabela 2. Resultados da caracterização física (Braz *et al.*, 2025)

Propriedade	Solo Rosa	Solo Amarelo
Densidade real dos grãos (g/cm³)	2,529	2,402
Classificação granulométrica		
Argila (%)	18	49
Silte (%)	27	18
Areia (%)	55	32
Pedregulho (%)	0	1

Braz *et al.* (2025) também realizaram ensaios de cisalhamento direto para determinar os parâmetros de resistência dos dois solos, que serão usados neste trabalho como dados de entrada nas análises de estabilidade. Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de resistência do Solo Amarelo e do Solo Rosa (Braz *et al.*, 2025)

	Solo Amarelo	Solo Rosa
Ângulo de atrito (º)	26,1	29,8
Intercepto coesivo (kPa)	6,7	0

3.2 Curva característica e coeficiente de permeabilidade

Para determinar a curva característica dos solos, foi executado o ensaio do papel-filtro segundo a norma D5298 da ASTM (2009), com ressalva para as considerações de Nacinovic (2009) em relação ao uso de três papéis-filtro em cada face dos corpos de prova e equalização em câmara úmida por no mínimo 21 dias. O ajuste foi feito pelo método de Fredlund e Xing (1994). O coeficiente de permeabilidade do Solo Amarelo na condição saturada foi aferido por ensaio de campo com uso de um infiltrômetro, seguindo a metodologia proposta pela norma 107/2024 da ABGE (2024). O infiltrômetro usado é composto por um cilindro interno com diâmetro de 12 cm e um cilindro externo com diâmetro de 24 cm. Ambos possuem altura de 15 cm e foram cravados até a profundidade de 7,5 cm. As medições foram feitas durante um período de duas horas.

3.3 Modelagem de fluxo

Para a modelagem de fluxo, usou-se o módulo SEEP/W do pacote GeoStudio. Foi feita uma análise do tipo de transiente com duração de 96 horas e registros a cada hora, totalizando 96 análises. Foram usados como materiais as curvas características do Solo Amarelo e do Solo Rosa, apresentados no Item 4.1 deste trabalho. Além disso, a curva de infiltração dos materiais foi gerada usando o coeficiente de permeabilidade, também apresentado no Item 4.1 deste trabalho, estimado pelo método de Fredlund e Xing disponível no software. A geometria usada foi a apresentada em Braz *et al.* (2025) em ângulo de 45º, considerada a inclinação máxima para obras de recuperação do talude. Como condições de contorno, foram inseridas: função de fluxo unitário para representar a chuva no valor de $5{,}607683\times10^{-7}$ m/s na superfície do talude; nível d'água na base da geometria desenhada; e carga de 0 m junto ao nível d'água, com o objetivo de direcionar o fluxo para baixo, aproximando o modelo do comportamento esperado na realidade.

3.4 Análise de estabilidade

Para a análise de estabilidade, usou-se o módulo SLOPE/W do pacote GeoStudio. Os resultados da modelagem de fluxo foram adotados como análises parentes, gerando 96 fatores de segurança para cada hora do período simulado. O método de cálculo escolhido foi o de Morgenstern-Price, com uso de superfícies de entrada e saída e de movimento da direita para a esquerda. O FS mínimo estabelecido como critério foi de 1,5, considerando os impactos do carreamento de solo nas redondezas do talude e as análises feitas por Braz *et al.* (2025).

4 RESULTADOS

4.1 Curva característica e coeficiente de permeabilidade

A Figura 2 apresenta a curva característica obtida para o Solo Amarelo, à direita, e para o Solo Rosa, à esquerda. Os pontos amarelos são os pontos obtidos experimentalmente e os pontos vermelhos são os pontos obtidos a partir do ajuste da curva para serem usados na modelagem de fluxo. A Figura 3 apresenta a curva com os resultados do ensaio do infiltrômetro para o Solo Amarelo. As leituras finais indicaram constância na taxa de infiltração ao longo do tempo, sendo o valor do coeficiente de permeabilidade encontrado 0,0036 cm/s.

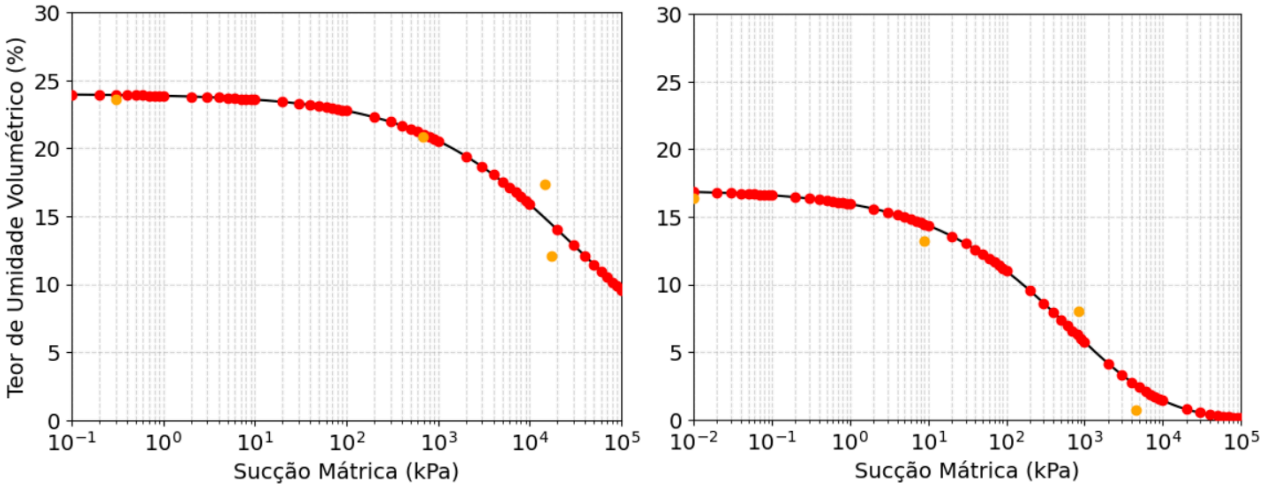


Figura 2. Curva característica do Solo Amarelo à direita e do Solo Rosa à esquerda (Autores, 2026)

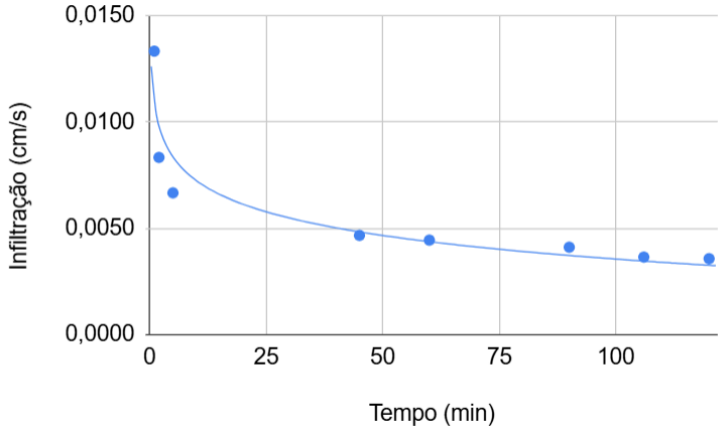


Figura 3. Curva de infiltração do Solo Amarelo (Autores, 2026)

4.2 Modelagem de fluxo

A Figura 4 apresenta o estado inicial de poropressões da análise do SEEP/W. Nota-se que há pequena variação no pé do talude, de -15 a -55 kPa, sendo este último valor constante até o topo da geometria desenhada. A Figura 5, por sua vez, apresenta o estado final de poropressões da análise do SEEP/W. Na parte superior, composta por Solo Amarelo, nota-se gradiente de -5 a -55 kPa. Na parte inferior, composta por Solo Rosa, nota-se o surgimento de gradiente na superfície do maciço, apresentando valores entre -10 e -55 kPa, sendo este último valor constante no interior da geometria desenhada. O surgimento de gradientes na camada de Solo Amarelo e na superfície da camada de Solo Rosa indicam redução da sucção, provocada pela infiltração da chuva.

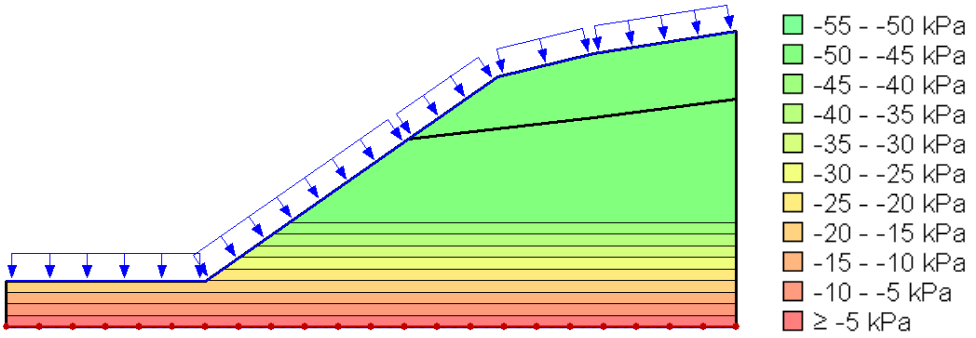


Figura 4. Poropressões iniciais (Autores, 2026)

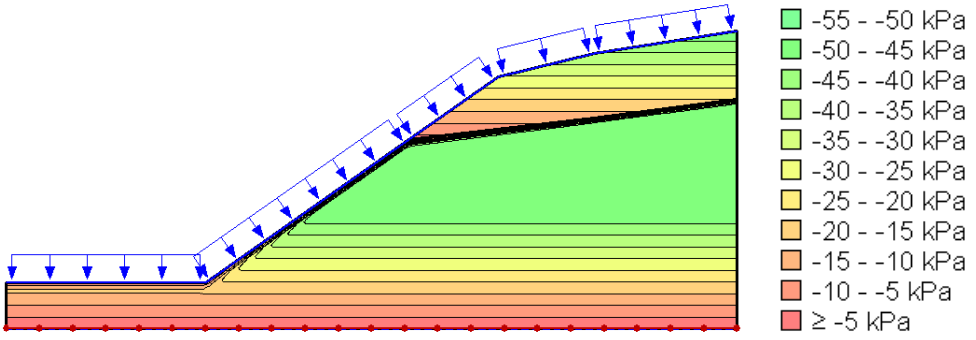


Figura 5. Poropressões finais (Autores, 2026)

4.3 Análise de estabilidade

A Figura 6 apresenta a curva de variação do FS ao longo das 96 etapas registradas. Inicialmente, o FS obtido foi de 1,588 e, com o início da precipitação, a maior variação aconteceu até a 40ª hora. A partir da 80ª hora, as variações foram menores e a partir da 92ª hora, as análises apresentaram valor constante de 1,481. Não foram observadas quedas abruptas ou descontinuidades. A queda no valor total de FS ao longo do período foi de 6,7%. Embora o valor final seja próximo ao critério estabelecido de 1,5, após 96 horas o FS obtido se encontra abaixo do mínimo estabelecido.

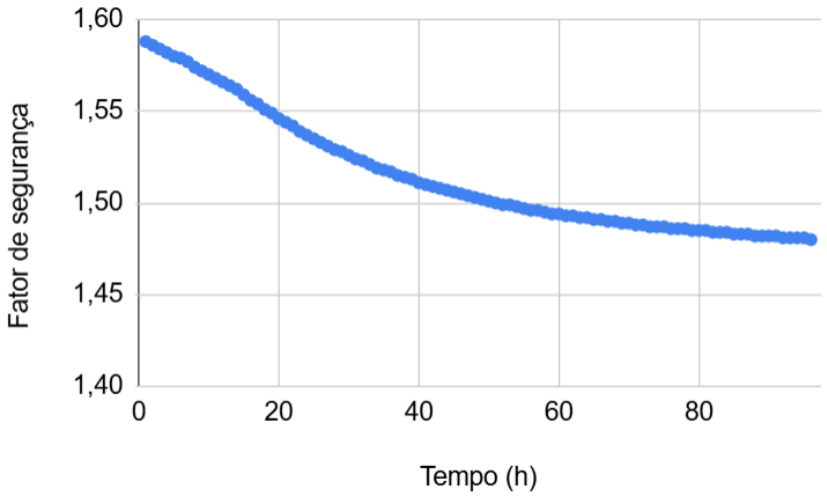


Figura 6. Variação do FS ao longo de 96 horas de chuva (Autores, 2026)

5 CONCLUSÕES

O talude no bairro Linhares, submetido a obras irregulares de loteamento, resultando em carreamento de solo para via do bairro e comprometimento do sistema pluvial da região. O maciço foi objeto de estudo em Braz *et al.* (2025), que obtiveram a caracterização e os parâmetros de resistência dos solos do local, e concluíram que a inclinação máxima em projetos de recuperação da área deveria ser de 45º.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a estabilidade do talude com a inclinação de 45º considerando precipitações intensas. Foram feitos ensaios do papel-filtro para os dois solos, para obtenção das curvas características, e ensaio de infiltração para o Solo Amarelo, que apresentou coeficiente de permeabilidade de 0,0036 cm/s. Foi adotada precipitação de 193,8 mm acumulada em 96 horas, o maior valor registrado entre os anos de 2020 e 2022.

A modelagem apresentou o surgimento de gradiente na camada de Solo Amarelo e na superfície da camada de Solo Rosa, indicando redução na sucção. Os resultados da análise de estabilidade apresentaram queda de 6,7% no valor de FS, variando de 1,588 para 1,481. O valor final, embora esteja próximo do critério de 1,5 estabelecido, encontra-se abaixo dele.

Conclui-se que a variação de poropressões provocada por precipitação intensa influencia negativamente na estabilidade do talude estudado. Para o caso da proposta de recuperação do talude, ao se considerar a variação de poropressões, recomenda-se que as inclinações sejam menores que 45º. Para trabalhos futuros, sugere-se também a investigação da influência da precipitação intensa sob outras inclinações para este caso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFJF pelas bolsas de Iniciação Científica VIC e BIC/UFJF, concedidas ao projeto “Influência da forma de precipitação na estabilidade de talude em solo não saturado”, sob coordenação da autora Tatiana Tavares Rodriguez.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: *Estabilidade de encostas.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2024). ABGE 17/2024: *Ensaios de permeabilidade em solo utilizando furo de sondagem, poço, cava, slug test e anel duplo – Procedimentos para execução e interpretação de resultados.* São Paulo.

ASTM International (2016). D5298: *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper.* West Conshohocken.

Braz, J. A., Fonseca, G. D. C., Faria, S. R., Rodriguez, T. T. (2025) Análise da alteração da condição de estabilidade de talude devido a interferência antrópica e erosão. In: IX Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, Garibaldi. *Anais...* ABMS, p. 454-461.

Cordeiro, K. S. B., Alves, G. L. M., Rodriguez, T. T., Braz, J. A., Faria, S. R., Fonseca G. D. (2025) Case study of a gully in the Linhares neighborhood, Juiz de Fora-MG: soil losses evaluation and relationship with land use. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1536 (1), p. 012010.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A. (1978) The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (3), p. 313-321.

Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, p. 521-532.

Futai, M. M. Landslides in Unsaturated Conditions Caused by Rainfall Infiltration. In: Lacerda, W. A.; Palmeira, E. M.; Netto, A. L. C.; Ehrlich, M. *Extreme rainfall induced landslides: an international perspective*. São Paulo: Oficina de Textos, 2014, section II, p. 39-69.

Gerscovich, D. M. S. (2016). *Estabilidade de taludes* (2ª ed.). São Paulo: Oficina de Textos, 192 p.

Martins, L. F. (2022) *Análise dos Volumes Pluviométricos e Sua Relação Com os Escorregamentos de Solos no Município de Juiz de Fora – MG.* Monografia de Especialização, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 130 p.

Nacinovic, M. G. G. (2009) *Estudo de erosão pela análise de sucção e escoamento superficial na bacia do córrego Sujo (Teresópolis, RJ).* Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/UFRJ, 180 p.

Prefeitura de Juiz de Fora. (2024) Prefeitura entra com ação judicial contra loteador irregular no Linhares. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/noticias/view.php?modo=link2&idnoticia2=82788>. Acesso em: 5 jan. 2026.

Secretaria de Proteção e Defesa Civil da Cidade de Juiz de Fora. (2022) *Ocorrências de escorregamento de solos em Juiz de Fora.*

Vargas, M. (1985) The concept of tropical soils. In: International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. *Anais...* ABMS, v. 3.

Varnes, D. J. (1958) Landslides types and processes. In: Ekel, E. B. *Landslides and engineering practice*, National Academy of Science, Washington, D.C., EUA, cap. 2.