



Influência de precipitação intensa em análise de estabilidade de talude em solo residual não saturado

Jonathan do Amaral Braz

Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

Sabrina Roberta de Faria

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

Gabriel Dimas Campos da Fonseca

Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, gabriel.dimas@estudante.ufjf.br

Tatiana Tavares Rodriguez

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

Luís Fernando Martins

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

RESUMO: Períodos de chuvas intensas em regiões tropicais podem desencadear movimentos de massa, que são fenômenos de risco em áreas urbanas. A cidade de Juiz de Fora/MG é caracterizada por relevo montanhoso, com altitudes variando de 670 a 1000 m, pela presença marcante de solos residuais espessos, por formação de pastagens e por clima mesotérmico com verões quentes e estação chuvosa também no verão. Além disso, estudos recentes da literatura indicam que, entre 2017 e 2022, a maior parte dos deslizamentos no município 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 na cidade. Para isso, foram usados os parâmetros de resistência e a curva característica do solo obtidos de estudos anteriores. Também foi executado um ensaio de infiltração em campo para se obter a condutividade hidráulica saturada. Foi feita modelagem de fluxo com o maior volume de chuvas de 96 horas registrado entre 2020 e 2022 pela Defesa Civil local. A análise simulou um período de 96 horas com registros horários, e foram realizadas análises de estabilidade para cada um dos registros. Concluiu-se que, embora a precipitação intensa tenha contribuído para a queda no fator de segurança, o talude avaliado não apresentou risco.

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

ABSTRACT: Periods of heavy rainfall in tropical regions can trigger mass movements, which are risk phenomena in urban areas. The city of Juiz de Fora/MG is characterized by mountainous terrain, with altitudes ranging from 670 to 1000 m, by the marked presence of thick residual soils, by the formation of pastures and by a mesothermal climate with hot summers, with a rainy season also in the summer. Furthermore, recent studies in literature indicate that, between 2017 and 2022, most landslides in the city occurred with rainfall exceeding 140 mm accumulated in 96 hours. Therefore, this study aims to perform the modeling of intense precipitation flow, followed by stability analysis, on a residual soil slope in the city. For this purpose, soil strength parameters and the soil water retention curve obtained from previous studies were used. A field infiltration test was also performed to determine the saturated hydraulic conductivity. Seepage modeling was carried out using the highest 96-hour rainfall volume recorded between 2020 and 2022 by the local Civil Defense. The analysis simulated a 96-hour period with hourly records, and stability analyses were performed for each of these records. It was concluded that, although intense precipitation contributed to a decrease in the safety factor, the evaluated slope did not present any risk.

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



1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes é um tema de grande relevância em engenharia geotécnica, pois está associada à segurança e eficiência de projetos, bem como está relacionada à prevenção de desastres que podem acarretar danos ambientais e humanos. Movimentos de massa podem ser deflagrados em taludes tanto por questões de aumento de solicitações – remoção de massa, sobrecargas, solicitações dinâmicas e pressões laterais –, quanto por questões de redução da resistência ao cisalhamento – alterações em características geomecânicas do material e variações em fatores internos do material. Algumas dessas situações podem ser causadas pela infiltração de água, que pode desencadear processos erosivos e elevação de níveis freáticos. Tal infiltração pode ocorrer de forma superficial através de precipitações.

Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia, a média anual de chuvas para a cidade de Juiz de Fora entre os anos de 1991 e 2020 foi de 1564,80 mm, tendo seu período chuvoso, de outubro a março, uma média esperada de 1339,40 mm. Além disso, a Secretaria de Proteção e Defesa Civil da cidade de Juiz de Fora (2018, *apud* MARTINS, 2022) registrou 1714 ocorrências de movimentos de massa na cidade durante tais períodos chuvosos entre 2017 e 2022, tendo mais de 90% delas ocorrido em regiões mapeadas como sendo de risco geológico. Martins (2022) aponta que 51% destes movimentos de massa ocorreram com chuvas de volumes superiores a 100 mm acumuladas em 96 horas, estabelecendo uma relação de grande influência de precipitações intensas a tais fenômenos geológicos.

Considerando, então, a importância do entendimento da interação entre precipitações e taludes de solos não saturados, o objetivo deste trabalho é executar a modelagem de fluxo de precipitação intensa, seguida de análise de estabilidade, em um talude de solo residual na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Movimentos de massa são conceituados como deslocamentos de volumes de solo. Podem ser classificados de acordo com diversas propostas (VARNES, 1958; VARGAS, 1985), de acordo com as condições geológicas e climáticas do local. De maneira geral, este fenômeno está associado a um estado de tensões normais e cisalhantes que ultrapassam a capacidade de resistência de uma massa de solo. Por meio de ensaios de laboratório, como o de cisalhamento direto, tal resistência pode ser quantificada através de dois parâmetros, o intercepto coesivo e o ângulo de atrito.

Com o objetivo de verificar a probabilidade de ruptura de uma porção de solo em um talude, realiza-se a análise de estabilidade. O objetivo é obter o Fator de Segurança (FS), que é definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível no solo e a resistência ao cisalhamento mobilizada pelas solicitações atuantes. No Brasil, a análise de estabilidade é norteada pela NBR 11682 da ABNT (2009), que propõe valores mínimos de FS de acordo com os riscos oferecidos à sociedade e ao meio ambiente, conforme mostra a Tabela 1.

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

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	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 condição de estabilidade de um talude é influenciada pela presença de água, uma vez que atua diretamente nas poropressões e, consequentemente, na tensão efetiva de uma massa de solo. O movimento de massa induzido pela infiltração de águas de chuva em encostas naturais não saturadas é um fenômeno comum em regiões montanhosas tropicais, como é o caso de Juiz de Fora/MG. Há duas formas em que este fenômeno pode acontecer: quando a frente de infiltração atinge o nível freático e provoca a sua elevação; e quando a água não provoca a elevação do nível d'água, mas altera o estado de tensões do maciço. Neste último caso, à medida em que o fluxo ocorre, a umidade da região não saturada é gradativamente alterada, modificando a sucção do solo e diminuindo a resistência ao cisalhamento do material.



2 0 2 5

Para estas situações, consequentemente, a sucção do solo deve ser considerada no cálculo da resistência ao cisalhamento. A Equação 1 a seguir apresenta a equação proposta por Fredlund *et al.* (1978).

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

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;

3 LOCAL DE ESTUDO

O talude escolhido para a realização da modelagem de fluxo e das análises de estabilidade foi objeto de estudo para outros autores anteriormente, como Oliveira Júnior (2016) e Fernandes (2016). Ele está situado próximo à Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFRA) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), com a localização mostrada na Figura 1. O local apresenta solo residual de coloração amarelada e, para este trabalho, será denominado Solo PROINFRA.



Figura 1. Localização do talude solo PROINFRA (GOOGLE EARTH, 2025)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização física, parâmetros de resistência

Os parâmetros de resistência a serem usados nas análises, apresentados na Tabela 2, foram extraídos dos resultados obtidos por Oliveira Júnior (2016) a partir de ensaios de cisalhamento direto. No que diz respeito aos ensaios de caracterização física, também realizados pelo autor, o material apresentou 62% de argila, 33% de areia, 5% de silte e 1% de pedregulho, sendo classificado como uma argila arenosa.

Tabela 2. Valores dos parâmetros de resistência do Solo PROINFRA (OLIVEIRA JÚNIOR, 2016)

γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)
16,9	19,5	20

4.2 Curva característica

Fernandes (2016) realizou ensaios do papel filtro para o Solo PROINFRA para determinar a curva característica. Com os resultados dos pontos experimentais no ensaio de sucção, a curva foi ajustada pelo modelo de Fredlund e Xing (1994). Os parâmetros obtidos pelo autor são apresentados na Tabela 3 e a curva é ilustrada na Figura 2.



Tabela 3. Valores dos parâmetros da curva de sucção mátrica do Solo PROINFRA (FERNANDES, 2016)

a	m	η	Ψ_r	θ_s
$-5,9437 \times 10^{-5}$	2,060278	$-2,4882 \times 10^{-8}$	50	62,7

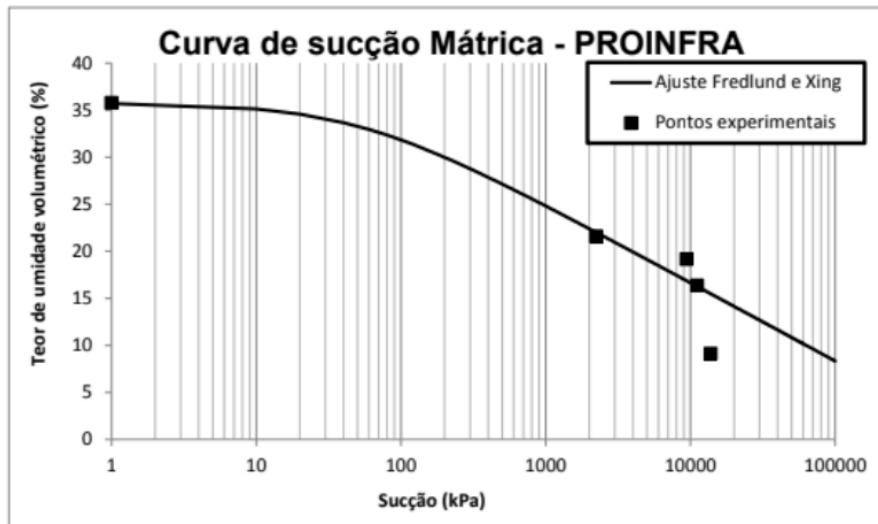


Figura 2. Curva de sucção mátrica do Solo PROINFRA (FERNANDES, 2016)

4.3 Infiltração

A infiltração foi aferida por meio de ensaio de campo com uso de um infiltrômetro, de acordo com a metodologia descrita pela norma 107/2024 da ABGE (2024). O infiltrômetro usado é composto por um cilindro interno de 12 cm de diâmetro e um cilindro externo de 24 cm de diâmetro, ambos com 15 cm de altura. A cravação dos cilindros foi feita até a profundidade de 7,5 cm e as medições foram feitas durante um período de duas horas.

4.4 Dados de chuvas acumuladas

Martins (2022) realizou um estudo sobre as chuvas acumuladas em períodos de 24 e 96 horas durante o período de chuvas da cidade de Juiz de Fora/MG entre os anos de 2017 e 2022, correlacionando estes fenômenos aos registros de movimento de massa registrados pela Defesa Civil local. Com base nisso, a simulação apresentada neste trabalho faz uso do maior volume de chuvas acumuladas em 96 horas considerando o período mais recente analisado – entre 2020 e 2022 –, sendo este volume de 193,8 mm.

4.5 Modelagem de Fluxo

A modelagem de fluxo foi feita usando o software Seep/W, do pacote GeoStudio. A análise feita foi do tipo transiente com duração de 96 horas, com registros a cada hora desse período. Para caracterizar o material, foi usada a curva característica apresentada no Item 4.2 deste trabalho. A curva de infiltração foi estimada com base no resultado obtido pelo ensaio de infiltração usando o método de Fredlund e Xing, disponível no software. O nível d'água, requisito essencial para a execução da modelagem, foi inserido manualmente na base da geometria desenhada. A geometria, por sua vez, foi reproduzida com base nas análises de estabilidade feitas por Oliveira Júnior (2016). Como condição de contorno, foi inserida uma função de fluxo unitário para representar a chuva no valor de $5,607683 \times 10^{-7}$ m/s sob a superfície do talude, correspondente ao valor de chuva apresentado no Item 4.4. Além disso, foi inserida como condição de contorno uma carga de 0 m junto ao nível d'água, com o objetivo de direcionar o fluxo para baixo e aproximar o modelo do comportamento observado no talude.



4.6 Análise de Estabilidade

A análise de estabilidade foi feita usando o software Slope/W, do pacote GeoStudio. Foi usada como análise parente a modelagem de fluxo realizada no Seep/W, de forma que foram obtidos fatores de segurança e superfícies de ruptura para cada um dos 96 registros horários. O método de cálculo escolhido foi o de Morgenstern-Price, com uso de superfícies de entrada e saída e de movimento da esquerda para a direita.

O FS estabelecido como critério para este trabalho seguiu o critério estabelecido por Oliveira Júnior (2016) em suas análises. Por se tratar de uma região de baixo risco de danos ambientais e materiais, assim como de perdas humanas, foi considerado o valor de 1,2.

5 RESULTADOS

5.1 Infiltração

Os resultados obtidos para o ensaio de infiltração são apresentados na Figura 3 por meio de um gráfico da variação da taxa de infiltração em função do tempo. Ao final do ensaio, obteve-se certa constância da infiltração para as três últimas medições e o valor de condutividade hidráulica saturada obtido foi de $0,0136 \text{ cm/s}$ ($1,36 \times 10^{-5} \text{ m/s}$).

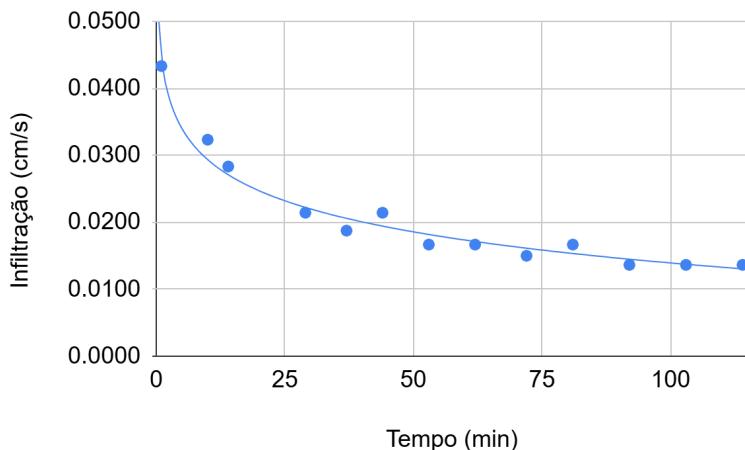


Figura 3. Curva de permeabilidade Solo PROINFRA (AUTORES, 2025)

5.2 Modelagem de fluxo

Os resultados obtidos pela modelagem de fluxo no Seep/W são apresentados nas Figura 4 e 5. A Figura 4 representa o estado inicial de poropressões, que antecede a inserção de chuvas no maciço. A variação de tais poropressões entre o pé e o topo do talude foi de -20 a -50, respectivamente. Já a Figura 5 representa o estado final de poropressões após a chuva de 96 horas. Nesse caso, a variação entre o pé e o topo do talude foi de -16 a -34, respectivamente. A diferença entre as situações apresentadas indica uma redução na sucção do solo na região superficial do talude, provocada pela infiltração de água da chuva.

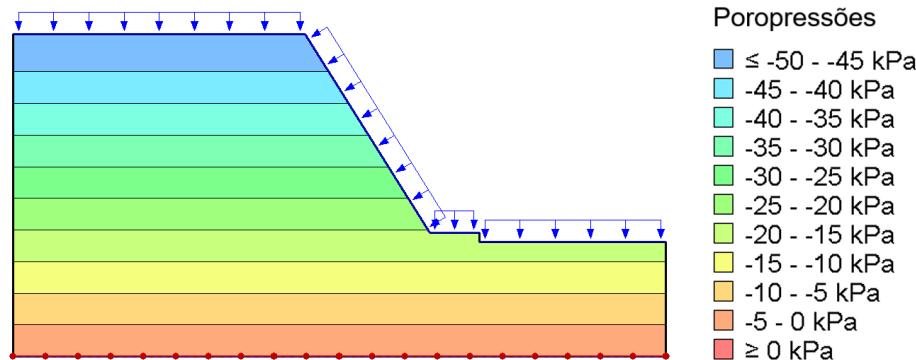


Figura 4. Poropressões iniciais (AUTORES, 2025)

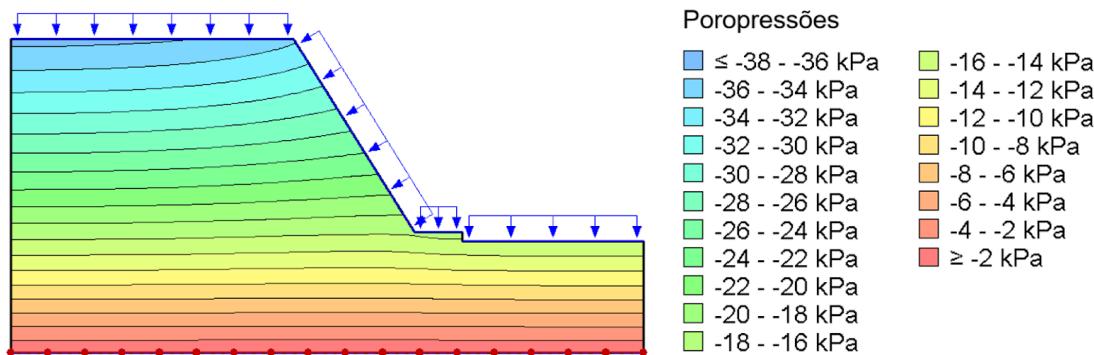


Figura 5. Poropressões após chuva de 96 horas (AUTORES, 2025)

5.3 Análise de estabilidade

Os resultados obtidos pela análise de estabilidade no Slope/W são apresentados na Figura 6. Nas Figuras 7 e 8 são ilustrados resultados das análises de estabilidade inicial e após a chuva de 96 horas. O FS no estado inicial, que antecede a inserção de chuvas, foi de 3,668. Com as chuvas, houve uma redução exponencial até a 16^a hora, atingindo um FS de 3,532 e apresentando a constância deste valor até o final do período avaliado.

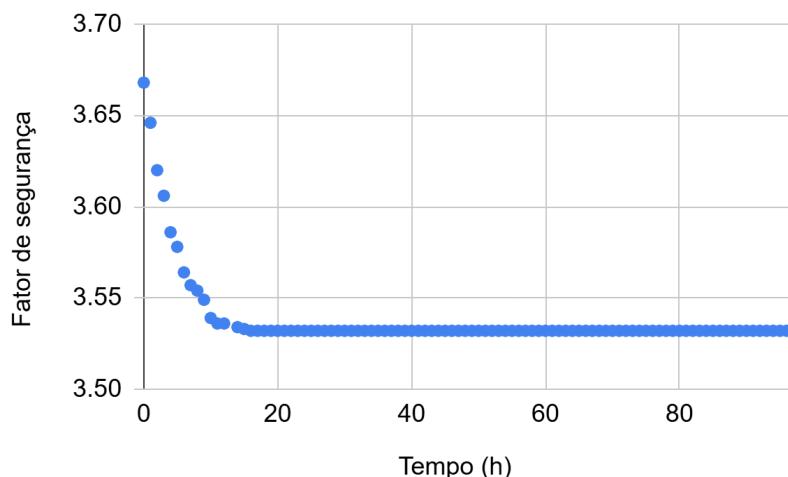


Figura 6. Variação do fator de segurança ao longo de chuva de 96 horas (AUTORES, 2025)

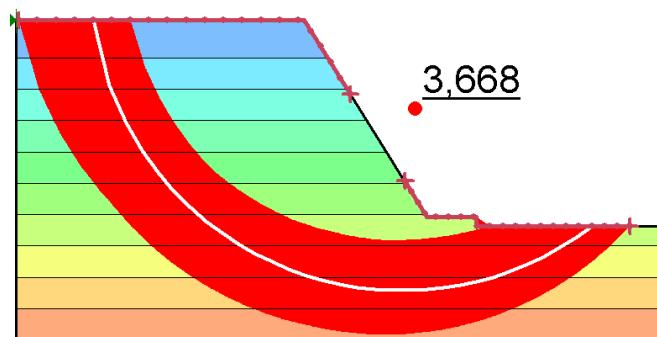


Figura 7. Análise de estabilidade inicial (AUTORES, 2025)

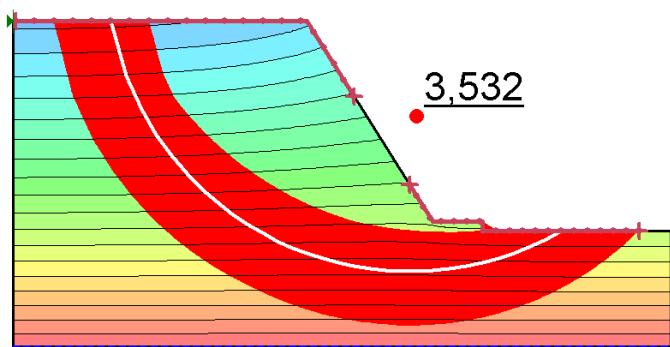


Figura 8. Análise de estabilidade após chuva de 96 horas (AUTORES, 2025)

De maneira geral, observa-se uma queda de aproximadamente 3,7% no FS entre a situação inicial e a chuva de 96 horas, sendo as 16 primeiras horas o período de decréscimo e o restante do tempo um período de constância. Além disso, todos os valores encontrados se encontram acima do valor mínimo de 1,2 adotado para esta análise.

6 CONCLUSÃO

O solo do talude próximo ao PROINFA, na UFJF, foi classificado como argila arenosa por Oliveira Júnior (2016), com valor de peso específico de 16,9 kN/m³, intercepto coesivo de 19,5 kPa e ângulo de atrito 20°. Com os valores dos parâmetros da curva de sucção mátrica encontrados por Fernandes (2016), foi possível gerar a curva característica em função da sucção mátrica e do teor de umidade volumétrico.

Foi executado um ensaio de campo para aferir a infiltração do solo, que apresentou um condutividade hidráulica saturada de 0,0136 cm/s. Com os dados de chuva apresentados por Martins (2022), adotou-se uma chuva de 193,8 mm acumulada em 96 horas, o maior registrado entre os anos de 2020 e 2022, para a modelagem de fluxo no talude e a sua análise de estabilidade.

Os resultados da modelagem de fluxo apresentaram uma pequena variação nas poropressões do talude, indicando uma diminuição na sucção do solo por parte da frente de infiltração. Os resultados das análises de estabilidade, por sua vez, apresentaram queda significativa no FS nas primeiras 16 horas de chuvas e atingindo constância de valor a partir de 16 horas até o tempo final.

Conclui-se que a variação de poropressões exercida pela precipitação intensa no talude interferiu na sua estabilidade. Entretanto, para o caso apresentado, os resultados apresentados encontram-se acima do critério estabelecido com base na norma. A partir dos resultados obtidos, sugere-se para trabalhos futuros que tais verificações sejam repetidas para taludes localizados em regiões de risco.



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 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.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009) NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Fernandes, A. L. O. (2016) *Determinação da curva característica de solos não saturados pela técnica do papel filtro*. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016, 80 p.
- 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.
- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (2022). *Normais Climatológicas (1991/2020)*. Brasília.
- 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.
- Oliveira Júnior, M. R. (2016) *Análise de estabilidade de talude por método probabilístico*. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 84 p.
- 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.