DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/64

Estabilidade de um Talude de Voçoroca em Lavras (MG) com Proposição de Estabilização

Paula Ferreira Campos
Graduanda em Engenharia Civil, Lavras, Brasil, paula.ferreira.campos1904@gmail.com

Mirian Diniz Manso
Engenheira Civil, Grupo Vinci Highways, Belo Horizote, Brasil, mirian.dinizz12@gmail.com

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

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

Priscilla Abreu Pereira Ribeiro
Docente do magistério superior, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, priscilla.ribeiro@ufla.br

RESUMO: Com o constante crescimento e adensamento populacional, cada vez mais surge a necessidade de se ocuparem espaços desafiadores, cabendo à engenharia civil garantir condições seguras, dignas e confortáveis de uso destes locais. Dentre estes, as voçorocas urbanas destacam-se como áreas críticas de atenção, devido ao processo de erosão contínuo que as formam, e ao potencial de expansão que pode tomar grandes áreas urbanas em poucos anos. No presente trabalho, foram estudados os aspectos geotécnicos da viabilização de um projeto arquitetônico sugerido para uso de parte de uma voçoroca no município de Lavras destinado ao lazer e bem-estar da população local. Fez-se um levantamento topográfico utilizando aerofotogrametria digital com uso de veículo aéreo não tripulado (VANT), de onde foi gerado um modelo tridimensional de toda a voçoroca por meio do software 3D Zephyr e, posteriormente, foram retiradas as curvas de nível do local. Após locado o projeto arquitetônico, foram determinados os volumes e seções de corte e aterro necessários à sua implementação. Foi definida como seção crítica aquela de maior desnível, onde foram conduzidas análises de estabilidade de taludes por meio de softwares de equilíbrio limite das situações de talude natural e taludes de corte e aterro advindos do projeto arquitetônico. Os cortes para o projeto arquitetônico diminuiriam o Fator de Segurança (FS) do talude natural de 1,416 para o limiar da ruptura (1,032). Logo, foram propostas soluções de estabilização visando o FS mínimo preconizado por norma de 1,5, garantindo a segurança dos usuários do novo empreendimento e das moradias existentes a montante do local. Para tal, sugeriram-se a inserção de grampos, que elevaram o FS para 1,373, finalizando com a execução de berma de equilíbrio, que elevaram o FS para 1,509.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Voçoroca, Solo grampeado, Bermas de equilíbrio, Fotogrametria digital.

ABSTRACT: Rapid population growth and urban densification have driven the need to occupy geologically challenging areas, leaving it to civil engineering to promote safe, adequate, and comfortable conditions in these spaces. Particularly critical are urban areas affected by gully erosion due to the continuous erosion process and the expansion potential that can overtake urban areas in a few years. This study evaluates the geotechnical feasibility of an architectural project designed for public leisure using part of a gully in Lavras. A topographic survey was performed using digital aerial photogrammetry with an unmanned aerial vehicle (UAV). A three-dimensional model of the gully using 3D Zephyr software was generated and, subsequently, the area contour lines. After the architectural project was positioned, the cut and fill volumes needed for its implementation were determined. The critical section was defined as the one with the highest elevation difference, where Slope

Stability Analysis using Limit Equilibrium Methods (LEM) was conducted on the natural slope and the slopes originated from the earthworks determined by the project. The cuts for the project implementation diminished the Factor of Safety (FS) of the natural slope from 1.416 to the rupture threshold (1.032). Afterwards, stabilization solutions were proposed aiming for the regulatory minimum Factor of Safety (1.5), ensuring the safety of the users of the new facility and the houses upstream. For this, the insertion of Soil Nails, which raised the FS to 1.373, was suggested, combined with the execution of stability berms that raised the FS to 1.509.

KEYWORDS: Slope stability, Gully erosion, Soil nailing, Stability Berms, UAV photogrammetry.

1 INTRODUÇÃO

As voçorocas são grandes sulcos ou buracos formados em solos suscetíveis à erosão a partir de um processo hídrico. A sua formação se inicia pelo escoamento superficial, com a formação de sulcos rasos. Com o passar do tempo, estes sulcos tendem a se aprofundar até atingirem o lençol freático, gerando um fluxo contínuo de água que dá origem ao fenômeno piping, caracterizado pelo arraste de partículas pela água subterrânea em um tubo de erosão (Lacerda; Becker, 2025).

Tais incisões, quando presentes em áreas urbanas, podem representar situações de risco para as pessoas e edificações, pois torna a região suscetível a deslizamentos de terra. No campo, os processos erosivos resultam na perda de camadas férteis do solo com o carreamento progressivo das suas camadas superiores, um consequente declínio da produtividade, diminuição de renda e, muitas vezes, o êxodo rural (Maciel Filho; Nummer, 2014; Pereira; Tôsto; Romeiro, 2019). Além disso, as partículas carreadas durante o processo erosivo assoreiam cursos d'água que passam pelo perímetro urbano, podem colmatar o sistema de drenagem e formar bancos de areia em reservatórios, culminando a redução da sua capacidade de armazenamento e transbordamentos (Iwasa; Fendrich, 1998; Maciel Filho; Nummer, 2014; Pereira; Tôsto; Romeiro, 2019).

Apesar do alto custo com insumos e mão de obra, as áreas atingidas por voçorocas podem ser recuperadas. Para isso, é necessária a realização de análises química e textural do solo, que possibilitem a determinação das práticas para controle da erosão e dos insumos necessários ao desenvolvimento das plantas a serem cultivadas no local, podendo ser realizadas obras de drenagem e terraceamento para controle do escoamento superficial e das águas subterrâneas (Cardoso; Pires, 2009). Iwasa e Fendrich (1998) alertam que, para os cofres públicos, a prevenção da degradação, ainda durante as fases de planejamento urbano, representa um melhor investimento de recursos.

A região Sul de Minas Gerais apresenta grandes áreas em estado avançado de degradação do solo pela erosão hídrica, demonstrado pelo volume total de poros, macro e micro porosidade e densidade do solo (Gomide; Silva; Soares, 2011). Segundo Ferreira (2005), as voçorocas dessa região têm sua origem associada ao desmatamento e à mineração do ouro no século XVIII, potencializadas pela presença de solos com alta erodibilidade, baixa fertilidade natural, uso agrícola fora das classes de capacidade do uso da terra, manejo incorreto do solo e ausência de práticas conservacionistas.

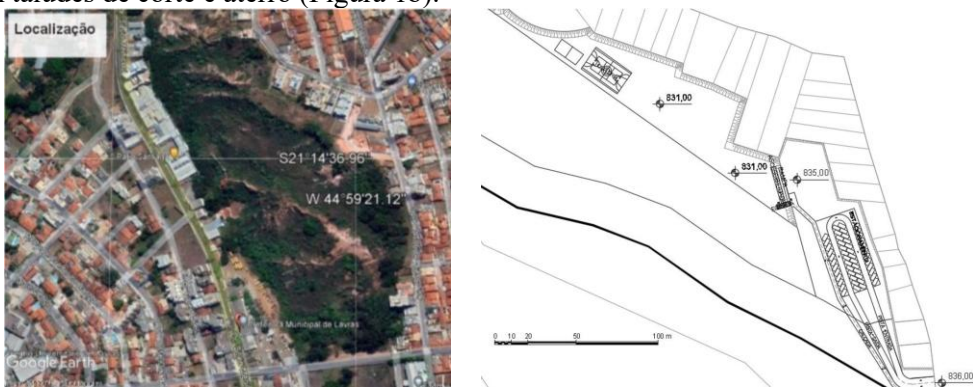
A cidade de Lavras, pertencente à região geográfica intermediária de Varginha (núcleo do Sul de Minas) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017), é caracterizada pela forte presença de voçorocas em áreas urbanas. Logo, torna-se imperativo o manejo, pelo poder público, destas áreas degradadas, direcionando uso seguro pela população, sempre que possível. Tendo isso em vista, neste trabalho foi proposta a intervenção com cortes e aterros de uma área degradada por voçoroca e sugeridas soluções de estabilização geotécnica local.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo e definição da seção crítica

O voçorocamento estudado tem aproximadamente 93.310,93 m² e abrange os bairros Belo Horizonte e Monte Líbano, na região central da cidade (Figura 1a). Foi proposto um projeto arquitetônico para transformar uma área de aproximadamente 11.133,65 m² no montante da voçoroca em um local destinado ao lazer e às

atividades físicas da população da cidade de Lavras (Silva, 2025). Assim foram definidos os platôs de projeto, resultando em taludes de corte e aterro (Figura 1b).



(a) (b)

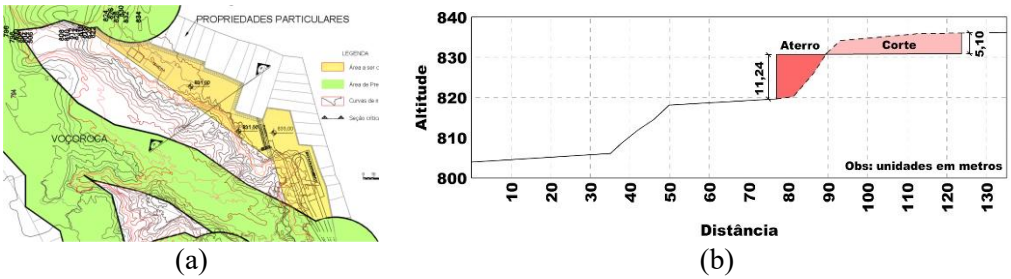
Figura 1. (a) área estudada (Fonte: Google Earth) e (b) projeto proposto por Silva (2025).

Em visita ao local, foi feito levantamento aerofotogramétrico da voçoroca por meio de Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT), com obtenção de 126 fotos aptas ao uso (bem iluminadas, focadas e sem sombras). Com base na técnica *Structure from Motion* (SfM) e utilizando o software 3DF Zephir em sua modalidade licença educacional gratuita, foi gerado modelo tridimensional (Figura 2), tendo a sua escala ajustada com medidas realizadas *in loco*.



Figura 2. Representação do modelo tridimensional da voçoroca.

A partir do modelo tridimensional, foram geradas as curvas de níveis utilizadas para definição da seção crítica após a implementação do projeto (Figura 3a), caracterizada pelos maiores desníveis. Na Figura 3b, vê-se o perfil do projeto arquitetônico sobreposto ao perfil natural do terreno na seção crítica de análise, onde houve a criação de um talude vertical de aterro com desnível de 11,24 m, além de um talude de corte vertical de 5,10 m de altura. Após, foram propostas soluções de estabilização deste último perfil visando um Fator de Segurança (FS) de 1,5, preconizado pela norma ABNT NBR 11682 (2019) para áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, locais urbanos em que há a possibilidade de elevada concentração de pessoas.



(a) (b)

Figura 3. Implementação do projeto: (a) curvas de níveis e (b) seção crítica.

2.2 Parâmetros geotécnicos e métodos de análise

A estabilidade geotécnica da seção crítica e seus FS foram determinados em três cenários distintos: (i) perfil natural do terreno, (ii) perfil de implementação do projeto, após cortes e aterros e (iii) perfil de implementação do projeto estabilizado, com as sugestões de estruturas de contenção. Para tal, foi utilizado software de análise de estabilidade de taludes por método de equilíbrio limite.

Utilizou-se método das fatias com determinação matemática de Morgenstern & Price, formato da Superfície Potencial de Ruptura (SPR) meia senóide com 100 fatias, método de superfície de entrada e saída, e um total de 2000 iterações. Admitiu-se talude homogêneo de solo natural e modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, tanto para solo natural, quanto para aterro. De acordo com Silva (2018), um dos tipos de solos presentes na área estudada é o argissolo vermelho-amarelo distrófico típico (PVAd), que, segundo a Embrapa ([s.d.]), é um tipo de solo profundo e altamente intemperizado, com um grande teor de argila nos horizontes subsuperficiais em relação aos superficiais, sendo seus parâmetros de resistência obtidos por Rocha *et al.* (2002). Para o solo de aterro, admitiram-se parâmetros de resistência usuais de um material arenoso, conforme metodologia de Dominoni (2011) (Tabela 1).

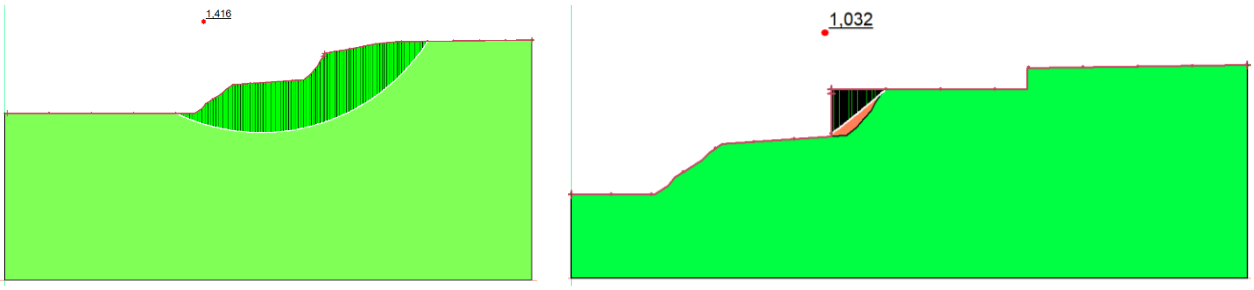
Tabela 1. Parâmetros de resistência dos solos natural e de aterro.

Parâmetro	Solo natural (Rocha *et al.*, 2002)	Aterro (Dominoni, 2011)
ϕ (°)	7,80	30
c (kPa)	42,39	10
γ (kN/m³)	12,65	17

3 RESULTADOS

3.1 Perfil natural do terreno e de implementação do projeto

Apesar de um baixo valor de ângulo de atrito do solo natural (7,80°), foi obtido um FS crítico de 1,416 e ruptura global para a seção natural do terreno (Figura 4a), provavelmente devido à geometria e à contribuição da coesão (42,39 kPa). Segundo a ABNT NBR 11682 (2009), este valor é considerado baixo tanto para o nível de segurança contra danos a vidas humanas, quanto contra danos materiais e ambientais. Já para o perfil de implementação do projeto, com seus cortes e aterros sem contenções, obteve-se um FS crítico de 1,032, uma redução significativa da estabilidade do talude natural (≈27%), abrangendo um nível de segurança que sequer está enquadrado em norma, sendo o menor FS considerado de 1,2 (ABNT NBR 11682, 2009). Observa-se que a Superfície Potencial de Ruptura (SPR), neste caso, corresponde a uma ruptura local, que engloba apenas a área de aterro (Figura 4b).



(a) (b)

Figura 4. FS e SPR do perfil: (a) natural e (b) de implementação do projeto.

3.2 Perfil de implementação estabilizado

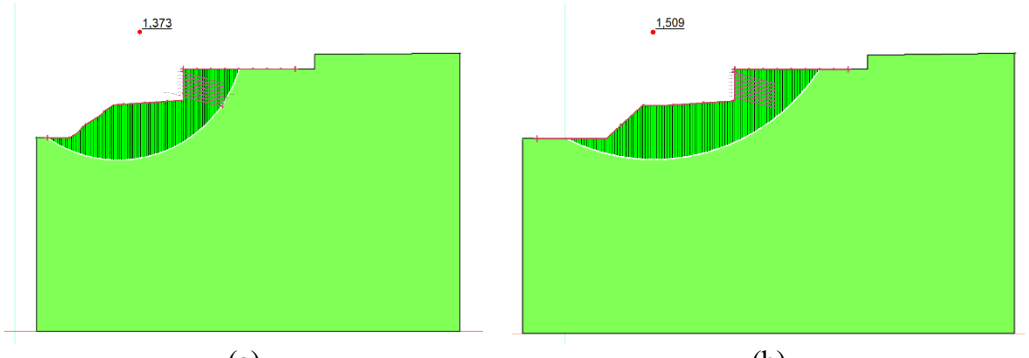
De forma a aumentar o FS da seção crítica para o mínimo exigido em norma (1,5), foi proposta a instalação de uma cortina em solo grampeado no talude de aterro. Para tal, foram seguidas as diretrizes de FHWA (2015) para a definição dos parâmetros de projeto, sendo eles: espessura da parede de concreto (e), inclinação dos grampos com a horizontal (α), espaçamento horizontal entre grampos (SH), espaçamento vertical entre grampos (SV), espaçamento do ponto mais alto da escavação até a primeira fileira de grampos (SV0), espaçamento entre a última fileira de grampos e o pé do talude (SVN), comprimento dos grampos (L), altura da etapa de escavação (H) e resistência a tração admissível (RTadm), também calculada segundo metodologia proposta pela instituição. Os valores adotados encontram-se na Tabela 2. Ao total, foram utilizados 8 grampos em cada fileira vertical e barras de aço de diametro de 20 mm.

Tabela 2. Parâmetros da cortina grampeada.

Parâmetro	Valor adotado
e (cm)	10
$\gamma_{concreto}$ (kN/m³)	25
α (°)	15
SH (m)	1,4
SV (m)	1,4
SV0 (m)	0,80
SVN (m)	0,64
H (m)	1,2
L (m)	15
RTadm (kN)	136,6

Obteve-se um FS crítico de 1,373 com esta solução de estabilização, ainda considerado um nível de segurança baixo contra danos a vidas humanas e contra danos materiais e ambientais, segundo a ABNT NBR 11682 (2009). Percebeu-se, também, que o talude de corte não mais participava da SPR, passando novamente a ser observada ruptura global (Figura 5a).

Para complementar a segurança do talude, foi proposta a construção de uma berma de equilíbrio com o mesmo solo do aterro. Visando economia de recursos, iniciou-se com uma berma de 10,8 metros de altura, 35,3 metros de extensão de topo, inclinação da face do talude de 33° com a vertical, reduzindo-se paulatinamente sua extensão de forma a obter um FS crítico próximo de 1,5. Obteve-se um FS crítico para a configuração final da berma de equilíbrio otimizada de 1,509, com largura da crista de aterro de 8 metros e ruptura de caráter global (Figura 5b). A necessidade de uma largura da crista desta magnitude deveu-se ao baixo peso específico adotado para o aterro (17 kN/m³).



(a) (b)

Figura 5. FS e SPR do perfil de implementação com: (a) cortina grampeada e (b) cortina grampeada e berma de equilíbrio otimizada.

A geometria final da seção crítica, com perfil de implementação de projeto, cortina grampeada e berma de equilíbrio otimizada com extensão de topo de 8,0 m, pode ser vista na Figura 6. É importante ressaltar que

a estabilidade global do maciço depende da existência da berma de equilíbrio, sendo imprescindível a sua proteção contra erosão e o condicionamento de projetos futuros a sua manutenção. Também é fundamental esclarecer que este trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade do talude para a implementação do projeto arquitetônico e que medidas específicas para a contenção do avanço do processo erosivo necessitam ser implementadas para garantir a longevidade deste, tais como: movimentação de terra, arrimos adicionais ao previsto neste estudo, manejo de águas subterrâneas e superficiais com sistema filtrante e revegetação (Iwasa; Fendrich, 1998; Cardoso; Pires, 2009; Lacerda; Becker, 2025).

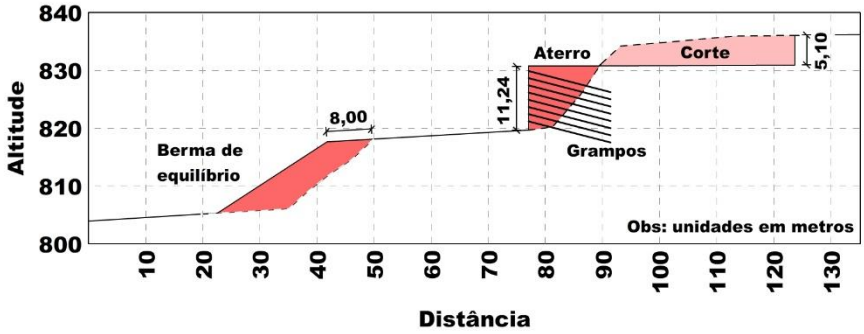


Figura 6. Configuração final do talude com as sugestões propostas de estabilização.

A Tabela 3 resume as análises de estabilidade, seus FS críticos e suas formas de ruptura.

Tabela 3. Resumo das análises de estabilidade.

Perfil	FS crítico	Ruptura
Natural	1,416	Global
Implementação	1,032	Local
Implementação com cortina grampeada	1,373	Global
Implementação com sugestões propostas de estabilização	1,509	Global

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi feita a análise de viabilidade geotécnica de uma proposta de revitalização de uma área central do município de Lavras degradada por voçoroca. Foi feito um levantamento topográfico com a utilização de VANT e posterior modelo tridimensional da voçoroca, com extração das curvas de níveis. A partir destas, foram definidos os cortes e aterros necessários para a implementação do projeto arquitetônico da intervenção. Foi definida uma seção crítica baseada no maior desnível obtido e foram feitas análises de estabilidade de taludes desta seção por meio de software de equilíbrio limite nas situações do perfil natural e do perfil de implementação. Foram sugeridas soluções de estabilização para o último caso, visando obter fatores de segurança mínimos prescritos por norma.

A seção crítica em seu perfil natural é estável (FS=1,416), contudo com FS menor do que exigido pela norma (FS>1,5). A implementação do projeto arquitetônico de revitalização culminaria em cortes e aterros que deixariam a seção crítica no limiar da ruptura (FS=1,032), apresentando ruptura local no talude de aterro. A estabilização do aterro com cortina grampeada aumentou o FS para 1, 373, ainda não atendendo os requisitos da norma. Propôs-se a construção adicional de uma berma de equilíbrio otimizada no pé da seção crítica, aumentando o FS para 1,509, reduzindo a utilização de recursos. Esta solução deve ser vista com cautela, uma vez que a estabilidade do maciço fica condicionada a existência da berma de equilíbrio ou substituição por outra solução equivalente. Medidas específicas para a contenção do avanço do processo erosivo precisam ser implementadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Cardoso, R. S. B.; Pires, L. V. (2009) Voçorocas: processos de formação, prevenção e medidas corretivas. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13., Viçosa. *Anais...* UFV, Viçosa, MG, Brasil. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301552655_Vocorocasprocessos_de_formacao_prevencao_e_medidas_corretivas. Acesso em: 26 jan. 2026.

Dominoni, C. M. B. (2011) *Análise de estabilidade e compressibilidade de um aterro sobre solo mole no Porto de Suape, região metropolitana do Recife.* .Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de janeiro, 102 p.

EMBRAPA. Solos do Brasil. Portal Embrapa, [s.d.]. Disponível em: https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil. Acesso em: 15 jun. 2026.

Ferreira, V. M. (2005) *Voçorocas no município de Nazareno, MG: origem, uso da terra e atributos do solo.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, 84 p.

FHWA (2015). FHWA-NHI-14-007: *Soil Nail Walls Reference Manual*.

Gomide, P. H. O.; Silva, M. L. N.; Soares, C. R. F. S. (2011) Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras - MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35 (2), p. 567-577. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200026.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017). Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017 / IBGE, Coordenação de Geografia. - Rio de Janeiro. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf. Acesso em: 21 jan. 2026.

Iwasa, O. Y.; Fendrich, R. (1998) Controle da erosão urbana. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (ed.). *Geologia de engenharia*, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, p. 269-278.

Lacerda, W. A.; Becker, L. de B. (2025) *Estabilidade de taludes em solos residuais e coluvionares: teoria e prática*, Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 342 p.

Maciel Filho, C. L., Nummer, A. V. (2014) *Introdução à geologia de engenharia,* 5ª Ed., UFSM, Santa Maria, 456 p.

Pereira, L. C., Tôsto, S. G., Romeiro, A. R. (2019) Uso das terras: perdas de solo por erosão e valoração econômica. In: Seabra, G. (org.) *Terra: Mudanças Climáticas e Biodiversidade,* Barlavento, Ituiutaba, MG, Brasil, p. 929-943. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1110638/1/PereiraUsodasterras2019.pdf. Acesso em: 7 jan. 2026.

Rocha, W. W., Dias Junior, M. S., Lima, J. M., Miranda, E. E. V., Silva, A. R. (2002) Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). *Revista brasileira de ciência do solo*, 26 (2), p. 297-303. https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200002.

Silva, B. A. da. (2025) *Proposta de intervenção em área degradada para uso público na cidade de Lavras-MG.* Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Lavras, 57 p.

Silva, E. (2018) *Mapeamento de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG).* Tese de Doutorado, Programa de pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, 194 p.