ANÁLISE GEOTÉCNICA DA INSTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA NA SERRA DA ALIANÇA (ES-177)

ÉDER CARLOS MOREIRA[1], MIKELE DA SILVA FERREIRA[2] , LUIZ HENRIQUE KELLER FARIA[3] FELIPE DE SOUZA PIZETTA [4] , SAMUEL ELOI MOL NOLASCO ABREU [5]

[1]Dr. Prof. Adjunto, Pós-Doc Eng. Civil, UFES, edercmoreira67@gmail.com;
[2]Graduanda em Geologia, UFES, Alegre-ES, mikele.ferreira@edu.ufes.br;
[3]Graduando em Geologia, UFES, Alegre-ES, luiz.k.faria@edu.ufes.br;
[4]Graduando em Geologia, UFES, Alegre-ES, felipe.pizetta@edu.ufes.br;
[5]Graduando em Geologia, UFES, Alegre-ES, samuel.e.abreu@edu.ufes.br.

RESUMO: A Rodovia ES-177, principal ligação entre os municípios de Muqui e Jerônimo Monteiro (ES), apresenta histórico recorrente de instabilidade geológica no trecho da Serra da Aliança, caracterizado por deslizamentos e quedas de blocos rochosos que comprometem a segurança viária e a mobilidade regional. Este trabalho teve como objetivo analisar os fatores geológicos, geotécnicos e climáticos associados aos processos de movimentos de massa na área. Para isso, foram utilizados mapeamento geológico-estrutural, aerofotogrametria com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), análises cinemáticas em estereogramas por meio do software DIPS e dados pluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os resultados indicaram que o principal mecanismo de ruptura corresponde ao tombamento direto (direct toppling), condicionado pela orientação dos planos de foliação, pela intensa fraturação do maciço rochoso e pelo elevado volume de precipitação registrado antes do evento de dezembro de 2019. Os resultados reforçam a importância da caracterização geológico-geotécnica para a compreensão dos processos de instabilidade em taludes rochosos e para o planejamento de ações voltadas à segurança da infraestrutura rodoviária.

PALAVRAS-CHAVE: Movimentos de massa; Geologia de Engenharia; Mecânica das Rochas; Estabilidade de Taludes; ES-177.

GEOTECHNICAL ANALYSIS OF SLOPE INSTABILITY AT SERRA DA ALIANÇA (ES-177)

ABSTRACT: Highway ES-177, the main road connecting the municipalities of Muqui and Jerônimo Monteiro, Espírito Santo State, has a long history of geological instability along the Serra da Aliança section, where landslides and rockfalls have compromised road safety and regional mobility. This study aimed to analyze the geological, geotechnical, and climatic factors associated with the slope instability processes observed in the area. The methodology included geological-structural mapping, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based photogrammetry, kinematic analyses using DIPS software, and rainfall data provided by the Brazilian National Water and Basic Sanitation Agency (ANA). The results indicated that the predominant failure mechanism was **direct toppling**, controlled by the unfavorable orientation of foliation planes, intense rock mass fracturing, and the high rainfall recorded prior to the December 2019 event. These findings highlight the importance of geological and geotechnical characterization for understanding slope instability processes and supporting the planning of actions aimed at improving the safety of road infrastructure.

KEYWORDS: Mass movements; Engineering Geology; Rock Mechanics; Slope Stability; Highway Engineering.

INTRODUÇÃO

A Rodovia ES-177 é uma importante via de ligação entre os municípios de Muqui e Jerônimo Monteiro, no sul do Espírito Santo, desempenhando papel fundamental na mobilidade regional e no escoamento da produção agrícola. Entretanto, o trecho da Serra da Aliança, localizado entre os quilômetros 13,3 e 14, apresenta histórico recorrente de instabilidade geológica, caracterizado por deslizamentos e quedas de blocos rochosos que comprometem a segurança dos usuários e a continuidade do tráfego.

Entre os principais eventos registrados destacam-se a interdição total da rodovia em 2018, um grande deslizamento em dezembro de 2019, o soterramento parcial de um veículo em 2020 e o tombamento de um caminhão no desvio provisório em 2021. Esses episódios evidenciam a elevada suscetibilidade da área a movimentos de massa, ocasionando impactos econômicos e sociais, como o aumento de aproximadamente 40 km no percurso por rotas alternativas.

Segundo Hoek e Bray (1981), a estabilidade de taludes rochosos está diretamente relacionada às características estruturais do maciço, à geometria do talude e às condições hidrogeológicas. Nesse contexto, investigações geológico-geotécnicas tornam-se fundamentais para identificar os mecanismos de ruptura e definir medidas de estabilização adequadas.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar os fatores condicionantes da instabilidade da Serra da Aliança e apresentar as principais metodologias empregadas na caracterização geotécnica do maciço, bem como as soluções de engenharia adotadas para a recuperação da Rodovia ES-177.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo baseou-se na integração de técnicas de investigação geológica, geotécnica e geoespacial para caracterizar a instabilidade da Serra da Aliança e subsidiar as obras de estabilização da Rodovia ES-177.

Inicialmente, foi realizado o mapeamento geológico-estrutural do maciço rochoso conforme as recomendações da International Society for Rock Mechanics (ISRM), identificando litologias, planos de foliação, fraturas e demais descontinuidades relevantes para a estabilidade da encosta.

Em seguida, utilizou-se a aerofotogrametria com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), possibilitando a obtenção de ortofotomosaicos, modelos digitais de superfície e estimativas da área e do volume dos blocos desprendidos.

Os mecanismos potenciais de ruptura foram avaliados por meio de análises cinemáticas em estereogramas utilizando o software DIPS. Além disso, dados pluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) foram analisados para correlacionar os períodos de maior precipitação com os eventos de movimentação de massa registrados na rodovia.

As informações obtidas foram complementadas com documentos técnicos, literatura especializada e dados das obras de recuperação da ES-177, permitindo a interpretação dos mecanismos de instabilidade e a avaliação das soluções de engenharia adotadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os levantamentos geológico-geotécnicos evidenciaram que a instabilidade observada na Serra da Aliança está diretamente relacionada às características estruturais do maciço rochoso, associadas à influência dos fatores climáticos e geomorfológicos da região.

O evento de maior magnitude ocorreu em 08 de dezembro de 2019, quando houve o desprendimento de grande volume de blocos rochosos, ocasionando o bloqueio total da Rodovia ES-177. A análise realizada por meio da aerofotogrametria permitiu estimar aproximadamente 72,74m³ de material deslocado, distribuídos sobre uma área de cerca de 283 m², demonstrando a elevada energia envolvida no processo de ruptura.

Os levantamentos estruturais indicaram que o maciço apresenta intensa compartimentação devido à presença de planos de foliação bem desenvolvidos e duas famílias principais de fraturas de alto ângulo. A orientação dessas descontinuidades mostrou-se desfavorável em relação à geometria do talude, favorecendo o desprendimento de blocos por tombamento direto (*direct toppling*).

Segundo Hoek e Bray (1981), esse tipo de ruptura ocorre quando descontinuidades mergulham em direção ao vazio da escavação, permitindo que blocos individualizados percam estabilidade por ação da gravidade. Na Serra da Aliança, observou-se exatamente esse comportamento, sendo confirmado pelas análises cinemáticas realizadas no software DIPS.

Outro aspecto importante identificado foi a elevada influência da água no comportamento mecânico do maciço. As fraturas funcionam como condutos preferenciais para infiltração das águas pluviais, aumentando as pressões internas, reduzindo a resistência ao cisalhamento das descontinuidades e favorecendo a propagação das rupturas.

Os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico demonstraram que, nos meses anteriores ao evento de dezembro de 2019, ocorreu um acumulado pluviométrico de aproximadamente 475 mm, valor considerado elevado para o período analisado. Esse cenário promoveu significativa saturação dos materiais alterados presentes nas encostas e aumento das pressões neutras ao longo das descontinuidades, configurando o principal fator desencadeador da ruptura.

A análise histórica evidencia que a instabilidade da Serra da Aliança não constitui um evento isolado. Em junho de 2018 foi necessária a interdição total da rodovia devido ao risco iminente de colapso da encosta. Em dezembro de 2019 ocorreu o maior deslizamento registrado na área. Em fevereiro de 2020 um veículo foi parcialmente soterrado por blocos rochosos e, em 2021, um caminhão tombou durante a utilização do desvio provisório implantado para garantir a circulação.

Esses episódios demonstram que a região apresenta comportamento geodinâmico ativo e elevada suscetibilidade à ocorrência de novos movimentos de massa caso medidas permanentes de estabilização e monitoramento não sejam mantidas.

Sob o ponto de vista socioeconômico, as consequências também foram significativas. A interrupção da ES-177 obriga motoristas a utilizarem rotas alternativas que aumentam o percurso em aproximadamente 40 quilômetros, elevando custos de transporte, tempo de deslocamento, consumo de combustível e despesas operacionais. Os impactos foram especialmente relevantes para o transporte da produção agrícola regional, além de comprometerem o acesso da população a serviços de saúde, educação e comércio.

Soluções de engenharia adotadas

Após a caracterização geológico-geotécnica, foi desenvolvido um conjunto de intervenções visando à estabilização definitiva da encosta.

As obras compreenderam inicialmente a remoção controlada dos blocos instáveis identificados durante os levantamentos de campo, eliminando elementos com elevado potencial de desprendimento.

Em seguida foram executados serviços de conformação e retaludamento dos setores mais críticos, reduzindo a inclinação local e melhorando as condições gerais de estabilidade.

Também foram implantados sistemas de drenagem superficial e profunda destinados ao controle das águas pluviais, minimizando a infiltração no interior do maciço e reduzindo o desenvolvimento de pressões de poros responsáveis pelo desencadeamento das rupturas.

Nos setores mais suscetíveis foram executadas estruturas de contenção e proteção contra queda de blocos, incluindo barreiras, dispositivos de estabilização e proteção da plataforma rodoviária.

Durante toda a execução das obras, a utilização de levantamentos aerofotogramétricos por drones permitiu acompanhar continuamente a evolução dos serviços, avaliar volumes movimentados e verificar a eficiência das intervenções implantadas.

A integração entre Geologia de Engenharia, Mecânica das Rochas, topografia, geotecnologias e engenharia civil mostrou-se fundamental para o sucesso do projeto, permitindo que as decisões de projeto fossem baseadas em informações técnicas precisas.

Além da recuperação da infraestrutura, as obras proporcionaram significativa redução do risco geológico, melhoria das condições de segurança dos usuários e restabelecimento da mobilidade entre os municípios atendidos pela rodovia.

CONCLUSÃO

A análise da Serra da Aliança demonstrou que a instabilidade da encosta está associada à interação entre fatores geológicos, estruturais e climáticos. A orientação desfavorável dos planos de foliação, a intensa fraturação do maciço rochoso e o elevado volume de precipitação registrado antes do evento de dezembro de 2019 favoreceram a ocorrência do mecanismo de ruptura por tombamento direto (direct toppling).

A integração do mapeamento geológico-estrutural, da aerofotogrametria com VANT, das análises cinemáticas no software DIPS e dos dados pluviométricos permitiu compreender os principais fatores condicionantes dos movimentos de massa registrados na área. Os resultados evidenciam a importância da caracterização geológico-geotécnica para o diagnóstico de encostas rochosas e para a compreensão dos mecanismos de instabilidade em rodovias localizadas em regiões montanhosas.

Dessa forma, o estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre os processos de instabilidade da Serra da Aliança, fornecendo informações relevantes para futuras investigações e para o monitoramento de áreas com características geológicas semelhantes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ana. Acesso em: 30 jun. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Ed.). **Landslides: Investigation and Mitigation**. Washington, DC: Transportation Research Board, 1996. p. 36–75. (Special Report, 247).

DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E DE RODOVIAS DO ESPÍRITO SANTO (DER-ES). **Recuperação da Rodovia ES-177 – Serra da Aliança**. Vitória: DER-ES, 2025.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock Slope Engineering**. 4. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM). **The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006**. Ulusay, R.; Hudson, J. A. (Ed.). Ankara: ISRM, 2007.

PECK, R. B.; HANSON, W. E.; THORNBURN, T. H. **Foundation Engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1974.

WYLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. 4. ed. London: Spon Press, 2004.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilidade de encostas. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 293–336.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

ROCSCIENCE INC. **DIPS – Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data**. Toronto, Canada, 2024. Disponível em: https://www.rocscience.com. Acesso em: 30 jun. 2026.

SANTOS, A. R. et al. **Aerofotogrametria com veículos aéreos não tripulados aplicada à engenharia e ao mapeamento ambiental**. Alegre: Universidade Federal do Espírito Santo, 2020.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Taludes de Rodovias**. Brasília, DF: DNIT, 2022.