



INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA UTILIZANDO O MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE NA ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Glauco Fernandes De Oliveira Nunes¹

¹Doutorado Engenharia Civil UFMG — Brasil.

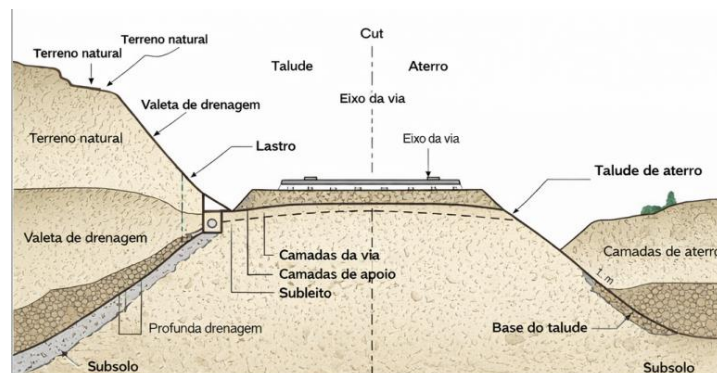
RESUMO

Infraestruturas ferroviárias estão frequentemente inseridas em ambientes geológicos complexos e sujeitos a processos de instabilidade de taludes, o que exige avaliações consistentes de segurança geotécnica. Este trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade de cinco taludes de solo e rocha ao longo de uma ferrovia no sudeste do Brasil por meio da integração entre ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica e modelagem tridimensional baseada no método do equilíbrio limite. A investigação envolveu coleta de amostras deformadas e indeformadas, realização de ensaios granulométricos, limites de Atterberg e ensaios triaxiais drenados do tipo CID, utilizados para obtenção dos parâmetros de resistência efetiva. A geometria dos taludes foi definida a partir de levantamento topográfico com VANT e empregada na modelagem no software Slide3, permitindo identificar superfícies críticas de ruptura e determinar fatores de segurança. Os valores obtidos variaram entre 1,224 e 1,561, abrangendo condições estáveis, limítrofes e potencialmente instáveis. A comparação com análises bidimensionais indicou diferenças de 3% a 7%, confirmando o caráter conservador das abordagens 2D. Os resultados evidenciam que a modelagem tridimensional fornece representação mais realista dos mecanismos potenciais de ruptura, contribuindo de forma relevante para a gestão de riscos geotécnicos em sistemas ferroviários.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes, Infraestrutura ferroviária, Modelagem tridimensional, Equilíbrio limite

1. INTRODUÇÃO

Ferrovias constituem sistemas de transporte de grande importância logística e econômica. Entretanto, devido à sua extensa implantação territorial e à interação com diferentes contextos geológicos e geomorfológicos, essas infraestruturas estão sujeitas a diversos riscos geotécnicos, entre os quais se destaca a instabilidade de taludes de corte e aterro (DUNCAN; WRIGHT, 2005).





A ocorrência de deslizamentos ao longo de linhas férreas pode provocar interrupções operacionais, danos à infraestrutura e, em casos extremos, acidentes com perdas humanas e materiais (CAMPOS *et al.*, 2024). Dessa forma, a avaliação da estabilidade de taludes torna-se uma etapa fundamental no planejamento, manutenção e gestão de riscos em sistemas ferroviários.

Tradicionalmente, análises de estabilidade são conduzidas por meio de abordagens bidimensionais baseadas na teoria do equilíbrio limite (BISHOP, 1955). No entanto, tais análises assumem condições de deformação plana e desconsideram efeitos tridimensionais associados ao confinamento lateral e à variabilidade espacial dos materiais (CHENG; LAU, 2008).

Nesse contexto, a análise tridimensional de estabilidade tem se consolidado como uma ferramenta mais robusta para avaliação geotécnica de taludes, permitindo considerar simultaneamente os efeitos geométricos, a variabilidade lateral das propriedades do maciço e as interações espaciais das superfícies de ruptura (BRETAS, 2020).

O estudo apresentado neste artigo baseia-se na aplicação de métodos de investigação geotécnica e modelagem numérica utilizados na avaliação da estabilidade de taludes associados a infraestrutura ferroviária, integrando dados obtidos em campo, ensaios laboratoriais e análises tridimensionais de estabilidade.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é avaliar a estabilidade de taludes ao longo de uma ferrovia por meio da aplicação integrada de investigações geotécnicas, ensaios laboratoriais e modelagem tridimensional baseada no método do equilíbrio limite.

Embora estudos clássicos em estabilidade de taludes tenham consolidado métodos bidimensionais como referência técnica, a literatura recente evidencia limitações importantes dessas abordagens em maciços com geometrias complexas, anisotropia espacial e heterogeneidade litológica. A lacuna científica central que este estudo aborda consiste na avaliação quantitativa do impacto da tridimensionalidade na estimativa do fator de segurança em taludes ferroviários, considerando a interação entre geometrias reais obtidas por VANT, parâmetros geotécnicos derivados de ensaios triaxiais e algoritmos avançados de busca de superfícies críticas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Área de estudo e georreferenciamento

O trecho ferroviário analisado localiza-se na região metropolitana de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, Brasil, inserido aproximadamente entre as coordenadas geográficas 19°52' S e 19°54' S de latitude e 43°55' W e 43°57' W de longitude, abrangendo segmento caracterizado por cortes e aterros ferroviários implantados em encostas naturais. O trecho investigado apresenta cerca de 32 km de extensão operacional, conectando áreas industriais e corredores logísticos de transporte de carga mineral e siderúrgica.

No contexto das investigações realizadas neste estudo, O levantamento topográfico dos taludes investigados foi realizado por meio de veículo aéreo não tripulado



(VANT) modelo DJI Phantom 4 RTK, amplamente utilizado em aplicações de aerofotogrametria e mapeamento de alta precisão. O equipamento é equipado com sistema GNSS RTK integrado, permitindo posicionamento centimétrico durante a aquisição das imagens e reduzindo a necessidade de pontos de controle em campo.

O sensor embarcado consiste em câmera digital com sensor CMOS de 1 polegada e resolução efetiva de 20 megapixels, com lente de 8,8 mm (equivalente a 24 mm em formato 35 mm) e obturador mecânico capaz de minimizar distorções de imagem durante missões fotogramétricas. O sistema possui precisão de posicionamento RTK da ordem de 1 cm + 1 ppm horizontal e 1,5 cm + 1 ppm vertical, conforme especificações do fabricante (DJI, 2023). Permitindo a geração de ortomosaicos georreferenciados e modelos digitais de terreno (MDT), amplamente utilizados em estudos geotécnicos de estabilidade (WESTOBY *et al.*, 2012).

A Tabela 1 apresenta as coordenadas georreferenciadas aproximadas dos taludes analisados.

Tabela 1 — Localização georreferenciada dos taludes analisados

Talude	Latitude	Longitude	Tipo
A	-19.856	-43.928	Corte
B	-19.861	-43.934	Corte
C	-19.868	-43.941	Aterro
D	-19.872	-43.948	Corte
E	-19.879	-43.955	Corte

2.2 Investigação geotécnica

No âmbito da investigação geotécnica desenvolvida neste estudo, foram realizadas campanhas de campo para coleta de amostras deformadas e indeformadas dos solos constituintes dos taludes analisados.

Para cada talude investigado foram coletados aproximadamente 100 kg de material, garantindo representatividade geotécnica para os ensaios laboratoriais.

As amostras indeformadas foram utilizadas na execução de ensaios triaxiais drenados com consolidação isotrópica (CID), permitindo a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em termos efetivos (CAPUTO; CAPUTO, 2022).

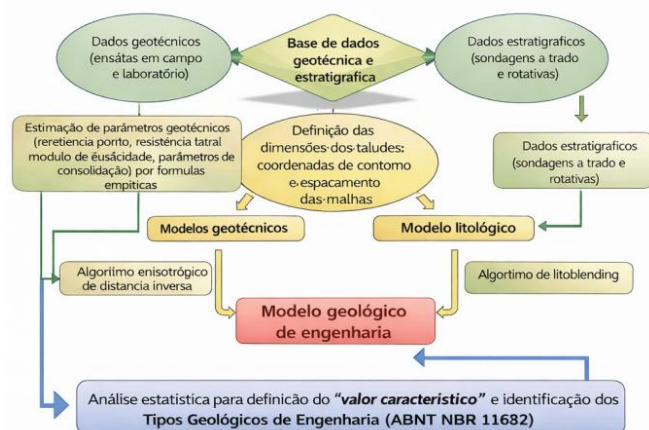


Figura 1 Fluxograma Integrado para Construção do Modelo Geológico de Engenharia a Partir de Dados Geotécnicos e Estratigráficos.

2.3 Ensaios laboratoriais

Os ensaios de caracterização física incluíram:

- Análise granulométrica
- Limites de liquidez e plasticidade
- Determinação da massa específica dos grãos

Além disso, foram executados ensaios triaxiais drenados para determinação da coesão efetiva (c') e do ângulo de atrito interno efetivo (ϕ'), parâmetros fundamentais para as análises de estabilidade (DUNCAN; WRIGHT, 2005).

2.4 Modelagem de estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o software Slide3 (Rocscience), com base na teoria do equilíbrio limite.

A geometria dos taludes utilizada nas análises **foi construída a partir dos levantamentos topográficos obtidos por VANT**, permitindo a elaboração de modelos tridimensionais de alta resolução do terreno.

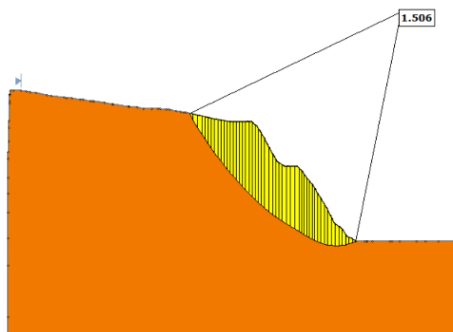


Figura 2 Seção bidimensional realizada no software Slide2 de um talude de solo com destaque para as fatias (em amarelo) e fator de segurança.



A partir dessas informações geométricas e dos parâmetros geotécnicos determinados nos ensaios laboratoriais, foi desenvolvido o modelo tridimensional de estabilidade dos taludes analisados, permitindo a identificação das superfícies críticas de ruptura e a determinação dos respectivos fatores de segurança.

O método de Morgenstern-Price foi adotado para o cálculo do fator de segurança, considerando a discretização volumétrica do maciço e a busca automática por superfícies críticas de ruptura (CHENG; LAU, 2008).

Para comparação metodológica, análises bidimensionais também foram conduzidas em seções críticas utilizando o software Slide2 e o algoritmo de busca Particle Swarm Search.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise das propriedades geotécnicas dos solos indicou predominância de materiais classificados como silte argiloso e areia siltosa, com variações significativas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

A partir dos parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios laboratoriais, foram realizadas as análises de estabilidade tridimensional dos taludes investigados, permitindo identificar as superfícies críticas de ruptura e os respectivos fatores de segurança.

Tabela 2 — Propriedades geotécnicas e fatores de segurança

Talude	Tipo de solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	FS 3D	FS 2D
A	Silte argiloso	23,47	86	25	1,559	1,506
B	Areia siltosa	23,42	17	34	1,196	1,118
C	Areia siltosa	26,54	11	34	1,224	1,157
D	Areia siltosa	26,48	79	20	1,495	1,412

Os fatores de segurança obtidos variaram entre 1,224 e 1,561, indicando diferentes condições de estabilidade ao longo dos taludes analisados.

A comparação entre as análises tridimensionais e bidimensionais evidenciou diferenças entre 3% e 7% nos fatores de segurança, resultado que confirma o caráter conservador frequentemente associado às análises bidimensionais de estabilidade (CHENG; LAU, 2008).

4. CONCLUSÃO

A avaliação da estabilidade de taludes ao longo da ferrovia analisada permitiu identificar diferentes níveis de estabilidade associados às características geotécnicas e geométricas dos maciços.

Os resultados obtidos indicaram fatores de segurança variando entre 1,224 e 1,561, evidenciando a presença de trechos estáveis, limítrofes e potencialmente instáveis.



A comparação entre as abordagens bidimensional e tridimensional demonstrou que as análises 2D apresentam caráter conservador, subestimando os fatores de segurança entre 3% e 7% (CHENG; LAU, 2008).

A modelagem tridimensional mostrou-se mais adequada para representar os mecanismos reais de ruptura, especialmente em taludes com geometrias complexas e variabilidade lateral das propriedades geotécnicas.

Dessa forma, a integração entre investigações de campo, ensaios laboratoriais e modelagem tridimensional constitui ferramenta fundamental para a gestão de riscos geotécnicos em ferrovias.

5. AGRADECIMENTOS

Caso haja agradecimento, indicar as instituições ou agências de pesquisa que financiaram o estudo ou permitiram o uso de infraestrutura institucional. Os agradecimentos são opcionais para os demais casos.

6. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 1955.

BRETAS, T. C. Retroanálise probabilística tridimensional por equilíbrio-limite de rupturas de talude em Belo Horizonte. UFOP, 2020.

CAMPOS, P. *et al.* Predisposition to mass movements on railway slopes. *Infrastructures*, 2024.

CAPUTO, H.; CAPUTO, A. Mecânica dos solos: teoria e aplicações. Rio de Janeiro: GEN, 2022.

CHENG, Y.; LAU, C. Slope Stability Analysis and Stabilization. Routledge, 2008.

DUNCAN, J.; WRIGHT, S. Soil Strength and Slope Stability. Wiley, 2005.

WESTOBY, M. *et al.* Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012.



TÍTULO DO TRABALHO EM INGLÊS

ABSTRACT

Railway infrastructures are often embedded in geologically complex environments and exposed to slope instability processes, requiring consistent geotechnical safety assessments. This study aimed to evaluate the stability of five soil and rock slopes along a railway in southeastern Brazil through the integration of laboratory characterization tests and three-dimensional limit equilibrium modeling. The investigation included the collection of disturbed and undisturbed samples, execution of grain size analysis, Atterberg limits and drained triaxial CID tests to obtain effective shear strength parameters. Slope geometries were derived from UAV-based topographic surveys and incorporated into the Slide3 software to identify critical failure surfaces and calculate safety factors. The factors of safety ranged from 1.224 to 1.561, covering stable, borderline and potentially unstable conditions. Comparison with two-dimensional analyses indicated differences between 3% and 7%, confirming the conservative nature of 2D approaches. The results demonstrate that three-dimensional modeling provides a more realistic representation of potential failure mechanisms and significantly contributes to geotechnical risk management in railway systems.

Keywords: *Slope stability, Railway infrastructure, Three-dimensional modeling, Limit equilibrium*