

CAPÍTULO 14

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE TALUDE A PARTIR DE DADOS COLETADOS POR VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANTS)



<https://doi.org/10.22533/at.ed.9231125180313>

Data de aceite: 19/09/2025

Henrique João Faedo Thives

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Rafael Pacheco dos Santos

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Michael Renê Mix Visintainer

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Luana Schuster

Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

de instabilidade. Os resultados revelaram diferenças entre os métodos, sendo Fellenius mais conservativo, Bishop menos restritivo e Spencer próximo da realidade, enquanto o método de elementos finitos se mostrou conservativo de todos, embora mais exigente em recursos computacionais. Conclui-se que a integração entre VANTS e softwares especializados representa alternativa eficaz para análises geotécnicas, otimizando tempo, custo e segurança em projetos de engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de estabilidade; Equilíbrio Limite, Veículo aéreo não tripulado; Elementos finitos.

RESUMO: O artigo apresenta uma análise comparativa da estabilidade de taludes a partir de dados topográficos obtidos por veículos aéreos não tripulados (VANTS). Foram avaliados os métodos clássicos de equilíbrio limite, como Fellenius, Bishop e Spencer, além da modelagem numérica por elementos finitos. O estudo de caso, realizado em encosta localizada em Santa Catarina, demonstrou que o uso de drones possibilita levantamentos ágeis e precisos, viabilizando a geração de modelos digitais de terreno e ortofotos de alta qualidade, fundamentais para a análise

COMPARATIVE ANALYSIS OF SLOPE STABILITY ASSESSMENT METHODS BASED ON DATA COLLECTED BY UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS)

ABSTRACT: This study presents a comparative analysis of slope stability based on topographic data collected by unmanned aerial vehicles (UAVs). Classical limit equilibrium methods, including Fellenius, Bishop, and Spencer, were evaluated alongside the finite element method (FEM). A case study conducted on a slope in Santa

Catarina, Brazil, demonstrated that UAVs provide fast and accurate surveys, enabling the generation of high-quality digital terrain models and orthophotos, which are essential for slope instability assessments. The results revealed significant differences among the methods: Fellenius yielded more conservative safety factors, Bishop produced less restrictive values, and Spencer presented results closer to reality, while FEM also proved conservative but required higher computational resources. Overall, the integration of UAV-based surveys with specialized geotechnical software proved to be an effective approach, enhancing the reliability of analyses and contributing to safer, faster, and more cost-efficient engineering projects.

KEYWORDS: Stability analysis; Limit equilibrium; Unmanned aerial vehicle; Finite elements.

INTRODUÇÃO

Os episódios envolvendo movimentos de massa são objetos de conhecimento da população desde os primórdios. No entanto, devido aos problemas relacionados ao uso e ocupação do solo, juntamente ao aumento da frequência de desastres climáticos, os acidentes que compreendem as movimentações de massa tendem a ocorrer com maior frequência.

Tal problema é agravado pelo rápido desenvolvimento urbano e crescimento populacional. De acordo com o Brasil (2023), cerca de 4 milhões de brasileiros vivem em áreas de risco geológico, o que representa uma preocupação significativa para a segurança da população, uma vez que ocupar encostas pode sobrealarcar o solo, deixando a região mais suscetível aos deslizamentos.

Em situações como essa, softwares de modelagem geotécnica são ferramentas de grande utilidade. Eles facilitam o processo e apresentam ótimos resultados, embora a qualidade desses resultados dependa diretamente da qualidade dos ensaios de campo. Oliveira (2023) não só ressalta a qualidade dos resultados obtidos por método de elementos finitos, mas ainda afirma que o método permite realizar alguns outros tipos de análise do que quando comparados por métodos convencionais. Bons exemplos de ferramentas computacionais de grande utilidade incluem os softwares Slide 2, Geostudio e Plaxis.

Em paralelo, a utilização dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) como ferramenta multifuncional tem evoluído bastante e é visto como uma das tendências na área da geociência. A quantidade de funções que o VANT consegue executar aumenta a partir do desenvolvimento da tecnologia, exemplos disso são: a identificação de áreas de risco, no levantamento topográfico do talude ou encosta e no desenvolvimento do modelo digital de superfície.

O estudo desenvolvido por Neto e Ramos (2023) aponta o drone como uma ferramenta que apresenta resultados satisfatórios a respeito do mapeamento de superfícies. Além disso, Dinis et al. (2023), ressaltam a grande precisão e a rapidez obtida pelo levantamento por meio do drone e ainda afirmam que as informações levantadas são excelentes dados de entrada para softwares de avaliação de estabilidade de taludes. Soto (2017) afirma a

importância de estudos mais aprofundados sobre taludes de grande porte, tanto em análise bidimensional quanto tridimensionais considerando a presença de fraturas. Por tais fatores, correlacionar o uso do drone e dos softwares especializados surge como uma linha de pesquisa promissora, que contribui na obtenção de resultados.

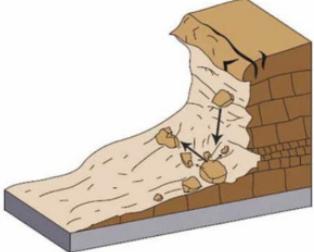
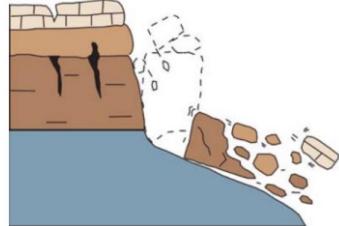
O presente estudo, caracterizado como uma pesquisa mista com análises quantitativa e qualitativas, tem por objetivo realizar uma análise comparativa dos principais métodos de análise de estabilidade a partir de dados topográficos levantados por VANTs.

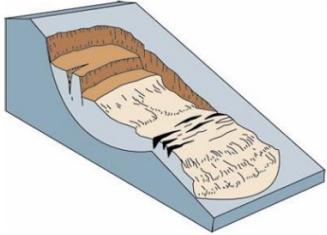
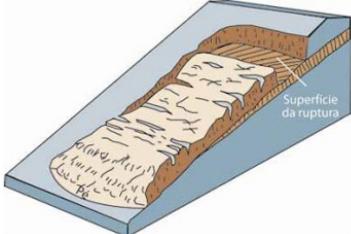
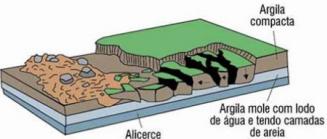
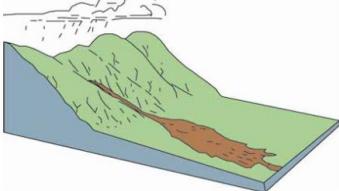
CONCEITOS GERAIS SOBRE MOVIMENTAÇÃO DE MASSA

2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Existem inúmeras maneiras de classificar os movimentos de massa, fatores associados ao deslocamento do material, a velocidade dos movimentos ou as características mecânicas do processo geralmente são utilizados para esse fim. (Ulbrich et al., 2008).

Varnes (1978) apresenta conceitos que concordam que o movimento de massa é o movimento de rochas, solo e preenchimentos artificiais, tendo esse movimento classificado em cinco grupos: quedas, tombamento, deslizamento, espalhamento e escoamento. O Quadro 1 descreve mais características.

Tipo de movimento	Características
	Queda: o movimento ocorre quando parte do solo ou rocha é desagregado do talude ou encosta, cai em queda livre, salto ou rolamento.
	Tombamento: Ocorre em sua maioria em taludes rochosos, devido as falhas geológicas, e impulsionados pelo elevado peso próprio do material, ocorrendo uma rotação em torno de um ponto.

	<p>Deslizamentos rotacionais: movimentação de massa que ocorre ao longo de superfícies curvas.</p>
	<p>Deslizamento translacional: movimentação de massa que ocorre ao longo de superfícies planas.</p>
	<p>Espalhamento lateral: ocorre devido ao aumento de uma camada de solo ou rocha, causando um movimento sobre uma camada menos rígida. Esse movimento é geralmente acompanhado por um rebaixamento generalizado na direção da camada menos resistente.</p>
	<p>Escoamento (corrida de massa): Movimento de partículas, que quando saturadas formam um fluido viscoso, podendo aumentar sua densidade, assim tornando capaz de movimentar grandes massas.</p>

Quadro 1 - Evolução da área de Desenvolvimento de Projeto

Fonte: adaptado de (Highland e Bobrowski, 2008).

Varnes (1978) destaca que, em determinadas circunstâncias, a movimentação de massas não ocorre de forma isolada, mas pode resultar da associação de diferentes tipos de processos. Nessas situações, o autor classifica esse fenômeno como movimentos complexos, evidenciando a natureza multifacetada e dinâmica das instabilidades de encostas.

No Brasil, as normas exercem papel fundamental sobre os projetos, já que são elas que determinam parâmetros, diretrizes e definem conceitos. No entanto, se tratando do tipo de movimento de massa, a NBR 11682 (ABNT, 2009) sugere uma classificação, mas deixa em aberto para que o responsável técnico determine qual tipo de classificação utilizar. A NBR 11682 (ABNT, 2009), diferente das classificações de Varnes (1978), considera apenas 4 tipos de movimento de massa: i) Queda/rolamento; ii) Tombamento, iii) Escorregamento; iv) Escoamento.

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES E ENCOSTAS

Leão e Paiva (2018) concordam que os métodos para avaliação da estabilidade de talude ou encosta pelo cálculo do “Fator de Segurança – FS” podem ser de três maneiras distintas: métodos analíticos, métodos experimentais e métodos observacionais. Guidicini e Nieble (1984), por sua vez, descrevem os métodos de maneira distinta, sendo eles análise pelos métodos físicos através análise fenomenológico e de projeto, métodos matemáticos por meio de elementos finitos e relaxação mecânica e por último método do equilíbrio limite através de análises analíticas e de gráficos

Determinar o método de análise da estabilidade das encostas não é trivial, depende de inúmeros fatores, dentre eles: o tipo de movimento, a superfície de ruptura, propriedades geotécnicas, as causas, além das solicitações envolvidas (Gerscovich, 2016).

MÉTODOS DO EQUILÍBRO LIMITE

A análise de estabilidade por meio do método de equilíbrio limite é corriqueira, principalmente pelo fato de que é uma análise simples, portanto, é menos complexa do que o nível de conhecimento sobre o próprio talude (Lima, 2023).

O método é baseado em determinar as resultantes das forças presentes em uma porção ativa de solo, delimitadas por qualquer superfície geométrica (Gerscovich, 2016). O Quadro 2 sumariza os principais métodos e suas características.

Dentre as variantes do método do equilíbrio limite, o método de Fellenius é o mais simples. O Fator de Segurança é obtido a partir de uma equação linear e não apresenta processo iterativo. A simplificação utilizada pelo método é que as solicitações laterais são paralelas à base, de tal modo que o equilíbrio dos esforços ocorra na direção normal à base da fatia (Oliveira, 2023).

O método de Bishop foi desenvolvido especialmente para superfícies de ruptura circular, no entanto, foi-se comprovado que o método é funcional também para superfícies planares (Oliveira, 2023). Apresenta resultados conservativos e é muito utilizado para estruturas de menor relevância.

O método de Spencer, por sua vez, é um método rigoroso, já que atende tanto equações de equilíbrio entre resultantes, quanto equações de equilíbrio de momentos (Correia, 2023), assim o Fator de Segurança é obtido a partir da solução de ambas as equações de equilíbrio. O processo de determinação do FS é iterativo, de tal modo que é atribuído um valor de uma resultante Q na base da fatia onde também é o ponto de aplicação de um esforço normal N e que assuma um ângulo de inclinação constante θ (Correia, 2023).

Método	Superfície de ruptura	Equilíbrio forças	Equilíbrio momentos	Vantagens	Limitações	Aplicações	Comentários
Fellenius	Circular.	Força N obtida por equilíbrio em relação à normal à superfície de ruptura.	Satisfaz.	Método simplificado.	Pode apresentar Erros na determinação do FS, em geral valores mais baixos.	Recomenda-se a utilização e métodos mais precisos.	Elimina os termos das forças (E, X) entre fatias.
Bishop	Circular.	Força N obtida por equilíbrio na direção vertical.	Satisfaz.	Método simples cálculo. Apresenta resultados conservativos	Apresenta elevada imprecisão em Solos estratigráficos.	Muito utilizado na Prática. Projetos de menor relevância.	Desconsidera a porção das forças tangenciais (X) entre fatias.
Spencer	Circular.	Satisfaz.	Satisfaz.	Apresenta fator de segurança mais próximos da realidade.	Cálculos complexos.	Análises mais detalhadas, com restrição de superfície de ruptura.	As forças entre fatias (X, E) são representadas pela resultante com direção constante (0).
Morgenstern-Price	Não circular.	Satisfaz.	Satisfaz.	Considerações de maior precisão.	Necessário processamento computacional.	Análises de maior detalhamento ou retroanálise.	A inclinação da resultante das forças entre as fatias (X, E), é obtida em função da distribuição.
Sarma	Não circular.	Satisfaz.	Satisfaz.	Menor tempo de cálculo com alta precisão.	Necessário processamento computacional.	Alternativa ao método Morgenstern-Price.	Insere uma função de distribuição para as forças tangenciais entre fatias.

Jambu	Não circular.	Satisfaz.	Satisfaz.	Superfície de Ruptura coerentes. Fácil implementação computacional.	Em solos homogêneos pode apresentar fatores de segurança mais baixos.	Muito utilizado. Atentar para aplicar as limitações das rotinas de cálculo.	Método simplificado para incorporar os efeitos das forças entre fatias.
-------	---------------	-----------	-----------	---	---	---	---

Quadro 2 – Principais métodos de equilíbrio limite

Fonte: Adaptado de GeoRio (2014 apud Gerscovich, 2016)

MÉTODOS NÚMERICOS

No âmbito da engenharia, os métodos numéricos são usualmente utilizados para determinar o estado de tensão dos objetos com geometria qualquer (Azevedo, 2003). De mesmo modo, Martins (1981) aponta os métodos numéricos como ferramentas com capacidade de solucionar problemas fundamentais da engenharia, já que são capazes de resolver problemas lineares e não lineares. No campo da geotecnia, a análise de estabilidade de taludes com base na tensão x deformação pode ser calculada por método dos elementos finitos (MEF) ou método das diferenças finitas (MDF) (Oliveira, 2023).

A divergência entre eles é que, no método das diferenças finitas, são aplicadas aproximações nas derivadas das equações diferenciais, tornando o problema com um sistema linear de equações para determinar os esforços entre os nós. Por outro lado, o método dos elementos finitos utiliza condições descritas por integrais, de tal modo que sejam aplicadas aproximações para resolver o problema (Silva, 2013).

A grande problemática envolvendo o método das diferenças finitas é que, se tratando de figuras irregulares, as fronteiras apresentem problemas numéricos, já que as malhas estruturadas apresentam formato definido (Silva, 2013). Por tais problemas, o método dos elementos finitos é mais amplamente utilizado, pois permite elementos não estruturados que podem apresentar formas variadas. Devido a sua maior aplicabilidade, apenas o método dos elementos finitos foi utilizado na presente pesquisa. Fundamentalmente, o método dos elementos finitos funciona através da subdivisão de um objeto de geometria arbitrária em elementos e junto das propriedades físicas do material, é possível explicar o seu comportamento, através de uma malha de elementos finitos (Oliveira, 2023).

Se tratando da análise da estabilidade de taludes, Martins (1981) aponta que é possível reproduzir os dados dos métodos de Bishop e de Morgenstern e Price, utilizando de elementos finitos, obtendo bons resultados.

Martins (1981) também destaca os possíveis erros apresentados pelo método do equilíbrio limite, decorrentes das simplificações matemáticas para solução da análise. Por outro lado, o autor aponta o método dos elementos finitos como uma ótima alternativa, apresentando ótimos resultados para a análise.

A aplicação do método requer algumas etapas fundamentais, começando pela identificação do problema físico, seguida pelo desenvolvimento do modelo matemático, para que, então, seja apresentada uma solução em que os resultados podem ser analisados (Silva, 2013). Um ponto importante é que a qualidade dos dados exerce papel fundamental sobre o processamento das informações, já que as análises podem apresentar alguns erros que, em sua maioria, estão atrelados a qualidade dos dados utilizados (Azevedo, 2003).

LEVANTAMENTO UTILIZANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANTs)

Com os contínuos avanços tecnológicos em diferentes setores, surgiram métodos inovadores que proporcionaram expressivas otimizações nos serviços topográficos. Tais inovações têm possibilitado a redução significativa do tempo de execução e do consumo de recursos nas atividades de topografia. Um exemplo de destaque é o emprego de veículos aéreos não tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones.

A aerofotogrametria fundamenta-se no princípio da estereoscopia, técnica que permite a extração de informações de profundidade a partir da análise de imagens obtidas sob diferentes perspectivas. Atualmente, esse processo é executado por meio de plataformas computacionais específicas, capazes de realizar a reconstrução tridimensional de superfícies (Figura 1). No caso da aplicação com veículos aéreos não tripulados (VANTs), as fotografias são registradas em sequência, com áreas de sobreposição previamente planejadas. Esse procedimento possibilita, após o pós-processamento, a elaboração de modelos digitais tridimensionais de alta precisão, oferecendo uma representação detalhada da área de interesse.

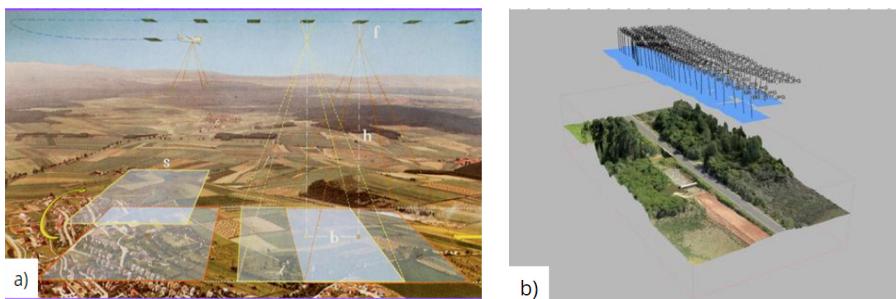


Figura 1 – Sobreposição e construção do modelo digital

Fonte: Adaptado de a) Silva Neto (2017); e b) Hoerlle (2015).

Segundo Lopes (2019), a realização adequada de um levantamento aerofotogramétrico, em conformidade com as boas práticas de engenharia, envolve o cumprimento de cinco etapas fundamentais: (i) elaboração e aprovação do plano de voo;

(ii) execução do voo e registro das fotografias; (iii) correção das coordenadas das imagens por método apropriado; (iv) pós-processamento dos dados; e (v) geração dos produtos finais, tais como nuvem de pontos, ortofoto, modelo digital de superfície (MDS) e outros resultados derivados.

Pereira (2023) ressalta que o levantamento aerofotogramétrico pode alcançar níveis de precisão comparáveis aos obtidos por métodos topográficos tradicionais. Entretanto, distingue-se por sua capacidade de gerar produtos de elevado valor agregado, que possibilitam uma representação detalhada tanto da superfície quanto das estruturas existentes, ampliando significativamente o potencial de análise e aplicação dos resultados.

MATERIAIS E MÉTODO

A presente pesquisa é classificada como mista, já que combina a abordagem qualitativa, voltada à avaliação da aplicabilidade dos VANTs, com a abordagem quantitativa, destinada à análise da estabilidade de taludes. O estudo apresenta caráter exploratório, fundamentado em um estudo de caso, a partir do qual se desenvolvem conclusões por meio de lógica dedutiva, interpretando dados representados em gráficos, diagramas, tabelas e imagens. O método de pesquisa foi estruturado em etapas, esquematicamente apresentadas na Figura 2.

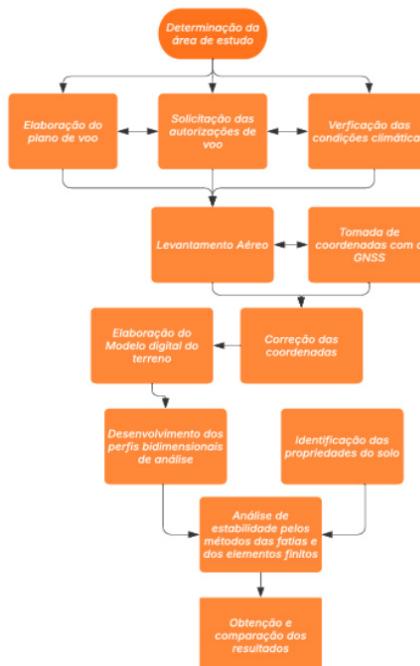


Figura 2 – Método adotado com suas etapas e principais informações.

Fonte: autor (2025).

A primeira etapa da pesquisa foi a delimitação da área de estudo. Foi escolhido uma encosta de alta declividade cortada por uma estrada sinuosa, localizada na divisa entre os municípios de Presidente Getúlio e Rio do Sul, em Santa Catarina. A escolha do local considerou a presença de cobertura vegetal significativa e a ocorrência de superfícies com geometrias irregulares, características relevantes para a análise de estabilidade e adequadas ao emprego de VANTS.

Em seguida, foi realizada a solicitação de permissão de voo pela plataforma SARPAS. O plano de voo, por sua vez, foi elaborado no aplicativo DJI Pilot, fornecido pela própria fabricante do VANT, sendo considerado a opção mais adequada.

O levantamento ocorreu em 05 de dezembro de 2024, no início da tarde, sob condições meteorológicas favoráveis (céu limpo e ventos fracos, mantidos durante todo o processo). Nesse período, foram capturadas 1.429 imagens a uma altura de 60 metros. Os parâmetros de voo encontram-se descritos no Quadro 3.

Parâmetro/Equipamento	Valor/Atributo
Aeronave	DJI Mavic 3 Enterprise, com módulo RTK
Coleção de Ortofoto	Ligado
Relação distância por pixel, [cm/pixel]	1,35
Modo de altitude	AGL
Acompanhamento em tempo real	Desligado
Arquivo DMS	Ligado
Seguir altitude, [m]	60
Otimização de elevação	Desligado
Altitude de decolagem segura, [m]	100
Velocidade, [m/s]	10
Ângulo de curso, [°]	62
Após conclusão	Voltar para o ponto de início
Proporção de sobreposição lateral, [%]	70
Proporção de sobreposição frontal, [%]	80
Margem, [m]	0
Modo de foto	Tiro com intervalo cronometrado
Ângulo de câmera personalizado	Desligado
Datum e projeção	Sirgas 200, UTM 22S

Quadro 3 – Parâmetros e atributos de voo

Fonte: autor (2025)

Com base nos dados coletados pela aeronave e pelo receptor GNSS FOIF A90, foi realizada a correção das coordenadas das imagens no software Emlid Studio, empregando o método PPK (Post Processed Kinematic). Esse procedimento possibilitou maior acurácia, assegurando a qualidade necessária para a geração da nuvem de pontos.

A partir desses dados, foi possível obter, no software Agisoft Metashape, o modelo digital de superfície, o modelo digital de terreno e a ortofoto, etapas fundamentais para a continuidade da análise.

Devido à indisponibilidade de equipamentos de sondagem, optou-se pelo uso de dados secundários, oriundos do Mapa Geológico de Santa Catarina (Wildner et al., 2014) e do Mapa Pedológico do IBGE (2023), ambos considerados referências adequadas para a determinação do tipo de solo. De acordo com o Mapa Geológico, a região insere-se no Supergrupo Tubarão, com duas formações potenciais:

- Formação Rio Bonito – composta por siltitos, arcóseos, siltitos carbonosos e quartzo-arenitos;
- Formação Rio do Sul – caracterizada pela predominância de folhelos e siltitos.

Para fins de análise, o solo local foi classificado como argila siltosa, confirmação obtida por inspeção tátil durante o levantamento aéreo. As propriedades geotécnicas adotadas encontram-se descritas no Quadro 4, com base em Minnesota (2007) e IBGE (2023).

Classificação textural do solo	Peso específico, [kN/m ³]	Ângulo de atrito, [°]	Coesão, [kPa]
Argila Siltosa	17	22	12

Quadro 4 – Propriedades geotécnicas adotadas

Fonte: Minnesota (2007) e IBGE (2023)

Por fim, as análises de estabilidade foram realizadas nos softwares **Slides 2D** – baseado em métodos de equilíbrio limite – e **Plaxis 2D**, fundamentado em elementos finitos. Ambos os programas são amplamente reconhecidos e aceitos pela comunidade científica e tecnológica, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido à grande complexidade da superfície, a análise de estabilidade acontece em uma região com vegetação rasteira devido a maior precisão topográfica. A Figura 3.a demonstra a encosta em que as análises de estabilidade foram realizadas e a Figura 3.b apresenta distribuição dos perfis topográficos da encosta.

A análise bidimensional partiu da geração de perfis de corte a partir das curvas de nível utilizando o “Autodesk Civil 3D”. Foram gerados 10 perfis da encosta, sendo selecionados os mais representativos, possibilitando analisar toda a superfície por meio das seções.

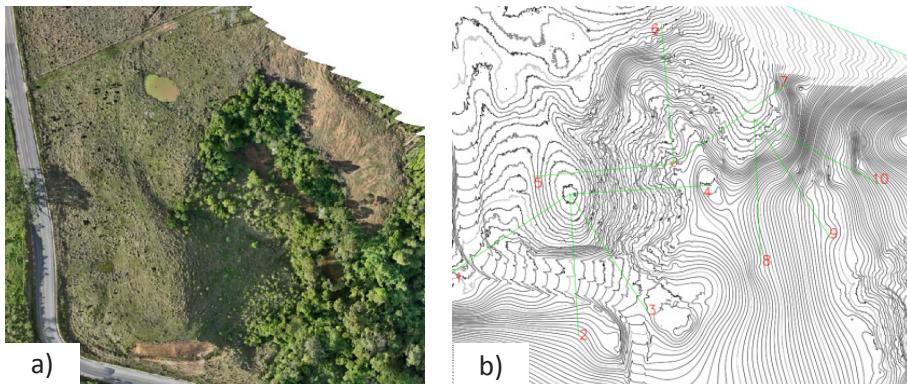


Figura 3 – A figura 3.a representa a ortofoto da área de análise enquanto a figura 3.b mostra os perfis selecionados.

Fonte: Autor, 2025

Partindo do pressuposto de que o solo analisado pode ser considerado homogêneo e isotrópico, admite-se que a superfície potencial de ruptura, em casos de instabilidade de taludes, tende a assumir forma aproximadamente circular. Para esse tipo de comportamento, os métodos clássicos de equilíbrio limitem mais adequados são os de Fellenius, Bishop e Spencer, cada um com diferentes formulações matemáticas e graus de aproximação. Além desses, as técnicas baseadas em elementos finitos representam uma alternativa robusta, permitindo a modelagem do comportamento não linear do solo e a consideração de deformações progressivas ao longo da superfície de ruptura.

A Figura 4 apresenta uma síntese comparativa dos fatores de segurança obtidos pelos três métodos de equilíbrio limite e pelo método de elementos finitos, possibilitando a análise integrada dos resultados.

De modo geral, o método desenvolvido por Fellenius apresentou em todos os perfis resultados mais conservadores, ou seja, apresentou um fator de segurança mais baixo. Já o método desenvolvido por Bishop apresentou fatores de segurança mais elevados, ou seja, resultados mais arrojados. Ponto importante entre essa comparação, é que métodos diferentes, apresentaram superfícies de ruptura crítica com raios diferentes.

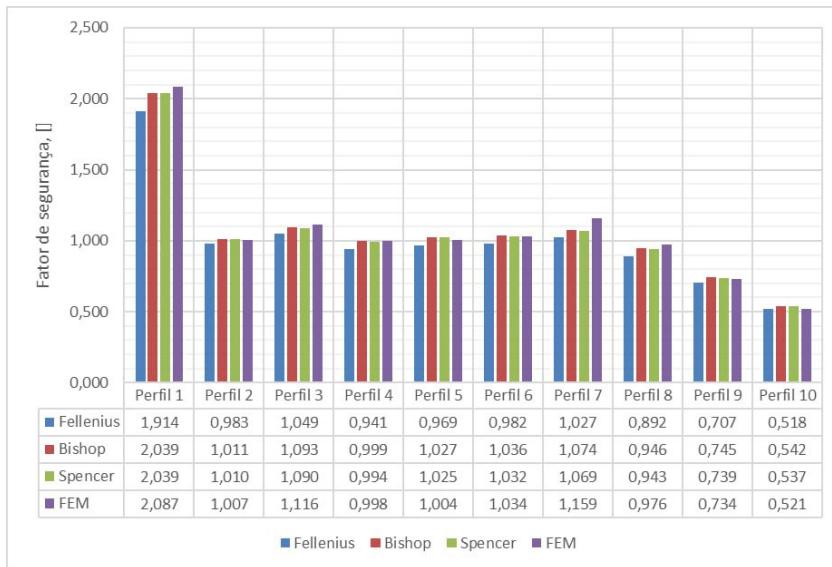


Figura 4 – Comparativo entre os métodos de equilíbrio limite (Fellenius, Bishop e Spencer) com o método de elementos finitos

Fonte: Autor, 2025

Quando comparados com a literatura, GeoRio(2014) aponta que o método de Fellenius pode apresentar erros na determinação do FS e apresentar valores mais baixos, sendo exatamente o que foi observado em todos os perfis de análise da serra do tucano. Todos os valores de FS do método foram inferiores quando comparados aos métodos de Bishop simplificado e Spencer. Ainda GeoRio (1999 apud Gerscovich, 2016) destaca que o método de Bishop apresenta valores mais conservativos e o método de Spencer com valores de FS mais próximos da realidade. Mesmo que resultados apresentados por Bishop e Spencer apresentarem resultados muito próximos, dentre as análises o método de Bishop foi o menos conservativo, o já que apresentou os maiores valores de FS em todos os perfis.

Os métodos baseados em elementos finitos, por sua vez, mostraram resultados mais conservativos. Dentre as diferenças apresentadas pelos métodos, ainda é possível ressaltar que, nas análises de MEF é possível determinar o deslocamento apresentado pelo material presente na encosta, o que não possível de ser calculado através dos métodos do MEL. Ainda é motivo de comparação a demanda computacional, que se demonstraram mais elevadas nas análises utilizando MEF, observado através do tempo de cálculo levado para determinação do FS.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de estabilidade de taludes tem papel fundamental na segurança das pessoas e na economia, já que no caso de rodovias, um possível deslizamento interfere diretamente na logística de transporte. Portanto, é essencial que os órgãos responsáveis desenvolvam levantamentos e análises das encostas para balizar as decisões e melhores formas de estabilização dos taludes e assim evitar possíveis desastres.

Partindo disso, o VANT demonstrou-se uma ferramenta eficaz e precisa nos levantamentos topográficos, já que agilizou o processo de tomada de dados das encostas. Vale ressaltar a dificuldade apresentada na geração do modelo digital de terreno em áreas com vegetação extremamente densa, inviabilizando a obtenção de dados topográficos coerentes no local. Porém, em regiões com densidade mediana de vegetação, ou pouca vegetação, o equipamento apresentou excelentes resultados.

Outra dificuldade que deve ser ressaltada é a perda de sinal, que em regiões de relevo mais acentuado demonstrou-se presente, portanto, podendo ser um problema se tratando de voos mais longos. Mesmo com esses problemas, os VANTs demonstraram ser uma alternativa e uma excelente ferramenta no levantamento topográfico de encostas.

A comparação dos métodos de análise tem papel fundamental na decisão de qual método de análise utilizar para uma determinada situação, visto que para encostas mais complexas e de alto risco é recomendado a utilização de métodos mais conservativos como é o caso FEM, já que favoreceu a segurança apresentando valores de FS mais baixos, porém para encostas menores e de menor importância, os demais métodos apresentam resultados coerentes, visto que todos os métodos convergiram e apresentaram FS com boa proximidade, ou seja, com erro consideravelmente pequeno.

REFERÊNCIAS

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

AZEVEDO, A.F.M. **Método dos elementos finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2003

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico da população em áreas de risco**. 2023. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/diagnostico-da-populacao-em-areas-de-risco-geologico>>. Acesso em: 18 de jun. 2025.

CORREIA, Twany Mirele. **Avaliação geotécnica de cenários de estabilidade de taludes do Alto da Telha na Região Metropolitana do Recife**. 2023. 111p. Monografia (Trabalho final de curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco

DE ALMEIDA NETO, R. J.; RAMOS, A. P. Mapeamento de superfícies topográficas com uso de Drones e Técnicas de Aerofotogrametria. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar- ISSN 2675-6218**, v. 4, n. 5, p. e453157-e453157, 2023

GEORIO, MANUAL. Manual técnico de encostas". **Volume I-Rio de Janeiro**, 2014.

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

GUIDICINI, G; NIEBLE, C. M. **Estabilidade De Taludes Naturais e De Escavação**. São Paulo: Blucher, 1984

HIGHLAND, L. M; BOBROWSKI, P. **O manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos**. Reston: U.S Geological Survey, 2008

HOERLLE, G. S.. **Monitoramento de áreas de proteção permanente através de imagens e ortofotos geradas por VANTS e fotogrametria**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305346782_Monitoramento_de_Areas_de_Preserva_cao_Permanente_atraves_de_ortofotos_geradas_por_VANTS_e_Fotogrametria?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6I9kaXJIY3QiLCJwYWdljoiX2RpcmVjdCJ9fQ. Acesso em: 12 mai. 2024.

IBGE. **Banco de Dados e Informações Ambientais**. 2023 Mapa Pedológico de Santa Catarina. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>. Acesso em: 16 de jun. 2025

LEÃO, M.F; PAIVA, G.V.C **Mecânica dos Solos Avançada e Introdução a Obras de Terra**: Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018

LIMA, D. A. **Modelagem Tridimensional Para Análise Da Estabilidade De Taludes**. 2023. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande

LOPES, E. E.. **MBA Engenharia rodoviária: Topografia e aerofotogrametria com RPAs aplicadas às rodovias**. 2019. Acesso em: 12 mai. 2024

MARTINS, J. **Numerical Methods in Geomechanics**. Lisboa: D. Reidel, 1981

MINESOTA. Minnesota Department of Transportation, **Pavement Design Manual**. 2007

OLIVEIRA, M. A. M. **Comparação entre os métodos de equilíbrio limite e elementos finitos para análise de estabilidade dos taludes**. 2023. 93p. Monografia (Trabalho final de curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto

PEREIRA, D. C.; FERNANDES, L. F. S.; FERNANDES, D.. As vantagens da utilização de drones no agronegócio e na agricultura de precisão. **Revista Alomorfia**, v. 7, n. 2, p. 705-716, 2023. Disponível em: <https://alomorfia.com.br/index.php/alomorfia/article/view/163/92>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SILVA, E. M. **Análise De Estabilidade De Talude Por Meio De Simulação Numérica**: Método dos elementos finitos. 2013.64p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Minas e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Pará.

SILVA NETO, M.. **Modelos 3D: Como são gerados através dos drones?** 2017. Disponível em: <https://blog.droneng.com.br/modelos-3d-como-sao-gerados/>. Acesso em: 12 mai. 2024

SOTO. J. G. **Estabilidade 2D e 3D de taludes de grande altura em mina a céu aberto.** 2017. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

ULBRICH, H. H. G. *et al/Geologia básica para engenheiros*: São Paulo: USP – Instituto de Geociências, 2008

VARNES, D.J. **Slope movement types and process. Landslides – analysis and control:** Special Report 176. Washington: Transportation Research Board National Academy of Sciences, 1978

WILDNER, W. *et al. Mapa geológico do estado de Santa Catarina*. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional