*XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
*XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens*
*24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF*
**DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/77**

# Estudo Didático da Influência de Parâmetros Geotécnicos na Estabilidade de Taludes por Análises de Equilíbrio Limite

Vanessa de Souza Batista
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Natal-RN, Brasil, vanessa.batista@tpfe.com.br

Katia Botelho Torres Galindo de Souza
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Recife-PE, Brasil, katia.galindo@tpfe.com.br

Fernanda Yamaguchi Matarazo
Engenheira Geotecnica, TPF Engenharia, Nova Lima-MG, Brasil, fernanda.matarazo@tpfe.com.br

Geovana Almeida
Engenheira, TPF Engenharia, Recife, Brasil, geovana.almeida@tpfe.com.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise paramétrica da influência de fatores geotécnicos na estabilidade de taludes, utilizando métodos de equilíbrio limite. Foram desenvolvidos modelos bidimensionais de taludes homogêneos considerando dois materiais representativos: um solo arenoso (c = 0 kPa; φ = 32°) e um solo argiloso (c = 10 kPa; φ = 24°). As análises foram realizadas no software Slide2, empregando os métodos de Morgenstern-Price, Spencer e Sarma, com busca automática das superfícies críticas. Avaliou-se a influência isolada de seis parâmetros: nível d'água, altura, inclinação, sobrecarga, espessura de camada menos resistente na fundação e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os resultados indicam que, em solos arenosos, a estabilidade é predominantemente controlada pelo ângulo de atrito e pela inclinação do talude, enquanto, em solos argilosos, a coesão, a altura e as condições hidráulicas exercem maior influência. A sobrecarga mostrou impacto significativo em ambos os materiais, e a presença de camadas menos resistentes alterou o mecanismo de ruptura em solos argilosos. O estudo evidencia o caráter didático das análises paramétricas, contribuindo para a compreensão dos fatores que controlam a estabilidade e para a interpretação de projetos geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Análise paramétrica, Equilíbrio limite, Solos arenosos, Solos argilosos, Fator de segurança.

ABSTRACT: This study presents a parametric analysis of the influence of geotechnical factors on slope stability using limit equilibrium methods. Two-dimensional models of homogeneous slopes were developed considering two representative materials: a sandy soil (c = 0 kPa; φ = 32°) and a clayey soil (c = 10 kPa; φ = 24°). The analyses were performed using Slide2 software, applying the Morgenstern-Price, Spencer, and Sarma methods, with automatic search for critical slip surfaces. The influence of six parameters was evaluated individually: groundwater level, slope height, slope inclination, surcharge, thickness of a weak foundation layer, and shear strength parameters. The results indicate that, in sandy soils, stability is mainly controlled by the friction angle and slope geometry, while in clayey soils, cohesion, slope height, and hydraulic conditions play a more significant role. Surcharge had a considerable impact on stability in both materials, and the presence of weak layers affected the failure mechanism in clayey soils. The study highlights the didactic value of parametric analyses, contributing to a better understanding of slope stability behavior and supporting geotechnical design interpretation.

KEYWORDS: Slope stability, Parametric analysis, Limit equilibrium, Sandy soils, Clayey soils, Factor of safety.

## 1 INTRODUÇÃO

O comportamento dos taludes é governado por uma combinação de fatores, incluindo propriedades de resistência ao cisalhamento, condições hidráulicas, geometria da estrutura e carregamentos atuantes. Dentre

esses, destaca-se a influência das condições de fluxo e das pressões neutras, que afetam diretamente as tensões efetivas e, consequentemente, a resistência mobilizada ao longo das superfícies potenciais de ruptura. Estudos recentes indicam que a variação do nível d'água e a presença de solos moles ou heterogêneos podem alterar significativamente os mecanismos de ruptura e os fatores de segurança, especialmente quando consideradas análises probabilísticas e a variabilidade dos parâmetros geotécnicos (LIU; LI, 2025).

As análises de estabilidade são tradicionalmente conduzidas por métodos de equilíbrio limite (LEM), amplamente utilizados devido à sua eficiência computacional e aplicabilidade em projetos de engenharia. Trabalhos recentes demonstram que esses métodos continuam sendo ferramentas fundamentais, especialmente quando associados a técnicas modernas de busca de superfícies críticas e integração com análises numéricas, como elementos finitos (GAEL; LEROY; CHRISTIAN, 2025). Além disso, avanços recentes incluem a aplicação de análises tridimensionais e abordagens mais realistas para representação dos mecanismos de ruptura, permitindo uma melhor avaliação da estabilidade em condições complexas (ZHANG et al., 2024; VAROL; AYHAN; AKINCI, 2024).

Outro aspecto relevante refere-se à consideração de carregamentos externos, como ações sísmicas e sobrecargas, que podem reduzir significativamente o fator de segurança e alterar os modos de falha. Estudos recentes destacam a importância da análise da estabilidade sob condições dinâmicas e da incorporação de reforços geotécnicos, evidenciando a necessidade de abordagens mais abrangentes para avaliação da segurança de taludes (CHEN *et al*., 2025).

Nesse contexto, a realização de análises paramétricas torna-se uma ferramenta fundamental para compreender a influência individual dos principais fatores que controlam a estabilidade dos taludes. Essa abordagem permite avaliar a sensibilidade do fator de segurança frente às incertezas dos parâmetros geotécnicos e das condições hidráulicas, contribuindo para o desenvolvimento de projetos mais seguros e otimizados (RAHMAN *et al*., 2023).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de análises de estabilidade baseadas em métodos de equilíbrio limite, a influência de diferentes parâmetros geotécnicos no fator de segurança e nos mecanismos potenciais de ruptura de taludes homogêneos, considerando materiais representativos de comportamento arenoso e argiloso.

## 2 METODOLOGIA

As análises de estabilidade foram realizadas por meio de métodos de equilíbrio limite utilizando o software Slide2, desenvolvido pela Rocscience. Foram elaborados modelos bidimensionais representando taludes homogêneos considerando dois materiais representativos: um solo arenoso, com parâmetros de resistência ao cisalhamento $c = 0$ kPa e $\varphi = 32°$, e um solo argiloso, com $c = 10$ kPa e $\varphi = 24°$.

As análises de estabilidade foram conduzidas utilizando os métodos de Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973), considerando superfícies potenciais de ruptura não circulares. A busca pelas superfícies críticas foi realizada por meio do algoritmo de otimização Cuckoo Search.

A partir desses modelos, foi realizada uma análise paramétrica na qual seis fatores foram avaliados individualmente: poropressão, altura do talude, sobrecarga no coroamento, inclinação do talude, espessura de uma camada fraca na fundação e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Em cada etapa, apenas um parâmetro foi modificado, mantendo-se os demais constantes, permitindo avaliar sua influência direta no fator de segurança e no mecanismo potencial de ruptura.

## 3 RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir das análises de estabilidade realizadas são apresentados a seguir, com o objetivo de evidenciar a influência individual dos parâmetros investigados no fator de segurança e no mecanismo potencial de ruptura dos taludes analisados. A comparação entre os cenários modelados para o solo arenoso e o solo argiloso permite observar diferenças no comportamento geotécnico associadas às propriedades de resistência ao cisalhamento de cada material. Dessa forma, os resultados são apresentados de maneira comparativa, destacando como variações nos fatores analisados afetam a estabilidade global do talude e a configuração das superfícies críticas de ruptura.

### 3.1 Nível d'água

O teste para avaliar a influência do nível d'água na estabilidade foi realizado considerando um talude com 10 m de altura e inclinação de 1V:2H, analisado com dois materiais representativos: um solo arenoso (c = 0 kPa; φ = 32°) e um solo argiloso (c = 10 kPa; φ = 24°). Para investigar a sensibilidade da estabilidade em relação às condições hidráulicas, foi definida uma superfície freática mínima e uma máxima, sendo realizada uma análise paramétrica em que o nível d'água foi progressivamente elevado entre esses dois limites. No gráfico apresentado, o valor 0 representa a posição mínima do nível freático, enquanto o valor 1 representa sua posição máxima (Figura 1).

Para o solo arenoso, observa-se que o aumento do nível d'água inicialmente não provoca variações significativas no fator de segurança, mantendo-se aproximadamente constante até cerca de 0,65 na escala de variação do NA. Esse comportamento ocorre porque, até esse ponto, a superfície freática permanece abaixo da superfície crítica de ruptura, não gerando pressões neutras relevantes ao longo do plano potencial de cisalhamento. A partir desse nível, quando a superfície freática passa a interceptar a superfície de ruptura, observa-se uma redução acentuada do fator de segurança, que decresce de aproximadamente 1,37 para 0,92 no nível máximo considerado. Esse resultado evidencia a forte influência das pressões neutras e da redução das tensões efetivas na estabilidade de solos predominantemente friccionais.

Por outro lado, no solo argiloso, a influência do nível d'água manifesta-se desde os níveis mais baixos da superfície freática. Isso ocorre porque a superfície crítica de ruptura identificada é mais profunda, interceptando regiões do maciço onde as pressões neutras já estão presentes mesmo para níveis freáticos relativamente baixos. Como resultado, observa-se uma redução gradual e contínua do fator de segurança ao longo de toda a variação analisada, passando de aproximadamente 1,60 no nível mínimo para cerca de 1,10 no nível máximo do NA. Esse comportamento indica maior sensibilidade do sistema à presença de poropressões ao longo de uma extensão significativa da superfície potencial de ruptura.

A comparação entre os dois cenários evidencia que a geometria da superfície de ruptura e o mecanismo de mobilização da resistência do solo exercem papel determinante na forma como o nível d'água influencia a estabilidade. No solo arenoso, o efeito hidráulico torna-se crítico apenas quando o nível freático intercepta diretamente a superfície de ruptura, resultando em uma queda abrupta do fator de segurança. Já no solo argiloso, a presença de superfícies de ruptura mais profundas faz com que o aumento do nível d'água produza uma redução progressiva da estabilidade, refletindo a interação contínua entre as pressões neutras e a resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo do maciço. Esses resultados ilustram de forma clara como a posição da superfície freática e a profundidade do mecanismo de ruptura controlam a sensibilidade do talude às condições hidráulicas, aspecto fundamental na avaliação da estabilidade de encostas naturais e taludes de engenharia.

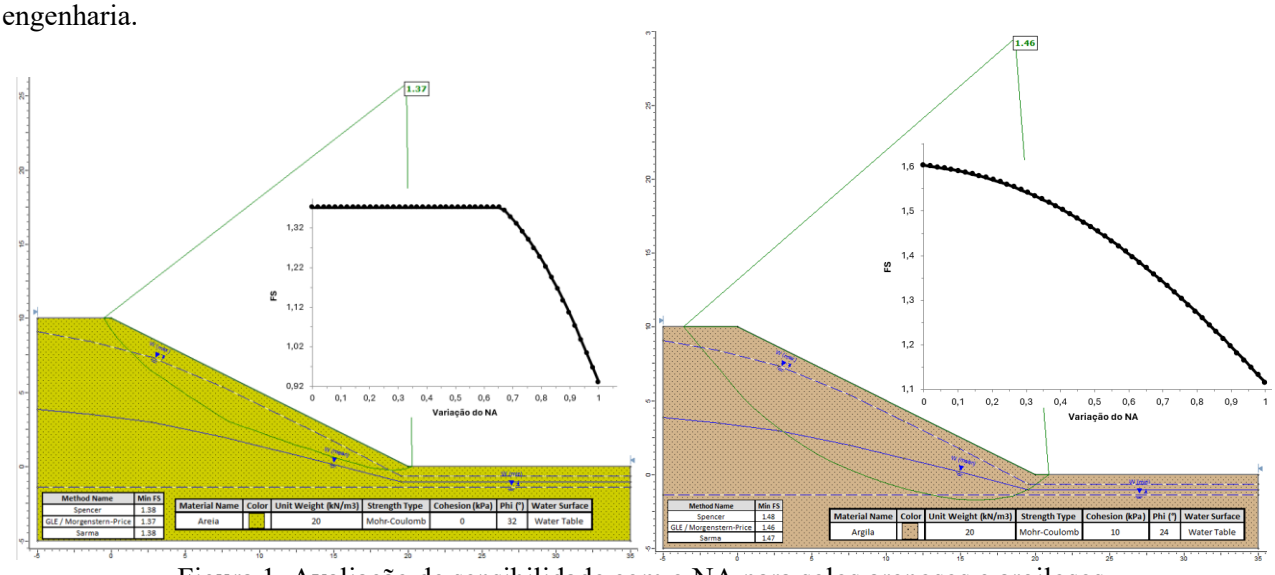


Figura 1. Avaliação de sensibilidade com o NA para solos arenosos e argilosos.

### 3.2 Altura e inclinação do talude

A análise dos resultados (Tabela 1) indica que a inclinação do talude exerce maior influência no fator de segurança em solos arenosos quando comparada à variação da altura. Observa-se que a alteração da inclinação de 1V:1H para 1V:2H provoca um aumento significativo do fator de segurança, enquanto a variação da altura, dentro da faixa analisada, resulta em mudanças relativamente menos expressivas. Esse comportamento está associado ao fato de que, em solos predominantemente friccionais, a estabilidade é fortemente controlada pela geometria do talude e pela mobilização do atrito ao longo da superfície potencial de ruptura, tornando taludes mais íngremes consideravelmente mais suscetíveis à instabilidade.

Tabela 1. Resultados das análises variando altura e inclinação.

| Variáveis | | | FS | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de solo | Inclinação | Altura | GLE | Spencer | Sarma |
| Solo arenoso | 1V:1H | 5 | 0,69 | 0,69 | 0,69 |
| | | 10 | 0,64 | 0,64 | 0,64 |
| | | 20 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| | 1V:2H | 5 | 1,31 | 1,31 | 1,31 |
| | | 10 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| | | 20 | 1,25 | 1,25 | 1,25 |
| Solo argiloso | 1V:1H | 5 | 1,36 | 1,38 | 1,5 |
| | | 10 | 1,0 | 1,02 | 1,0 |
| | | 20 | 0,78 | 0,8 | 0,8 |
| | 1V:2H | 5 | 1,98 | 2 | 1,99 |
| | | 10 | 1,54 | 1,56 | 1,56 |
| | | 20 | 1,29 | 1,3 | 1,3 |

Por outro lado, para solos argilosos, os resultados indicam que a altura do talude possui influência mais significativa na variação do fator de segurança. À medida que a altura aumenta, observa-se uma redução mais pronunciada do fator de segurança, refletindo o aumento das tensões atuantes no maciço e a maior extensão da superfície potencial de ruptura. Nesses materiais, embora a inclinação também afete a estabilidade, o incremento da altura tende a mobilizar volumes maiores de solo e ampliar os esforços solicitantes, tornando esse parâmetro particularmente relevante para a avaliação da segurança do talude.

Esses resultados evidenciam que a sensibilidade da estabilidade do talude à geometria depende do tipo de material, sendo a inclinação mais crítica em solos friccionais, como areias, e a altura do talude um fator de maior impacto em solos com comportamento mais coesivo, como as argilas. Essa distinção é importante para a interpretação de análises de estabilidade e para o dimensionamento adequado de taludes em diferentes condições geotécnicas.

### 3.3 Sobrecarga

Os resultados mostram que o aumento da sobrecarga aplicada no coroamento do talude provoca redução progressiva do fator de segurança em ambos os tipos de solo. Esse comportamento ocorre porque a carga adicional aumenta as tensões atuantes no maciço e ao longo da superfície potencial de ruptura (Figura 2).

No solo arenoso ($c = 0$ kPa; $\varphi = 32°$), o fator de segurança reduz de aproximadamente 1,26 para cerca de 0,80 com o aumento da carga até 500 kN/m². Já no solo argiloso ($c = 10$ kPa; $\varphi = 24°$), o fator de segurança inicial é maior, cerca de 1,53, devido à presença de coesão, porém também diminui com o incremento da sobrecarga, atingindo valores próximos de 0,83.

De modo geral, observa-se que a sobrecarga tem influência significativa na estabilidade do talude, reduzindo o fator de segurança de forma semelhante em ambos os solos, especialmente quando a superfície de ruptura intercepta a região onde a carga é aplicada.

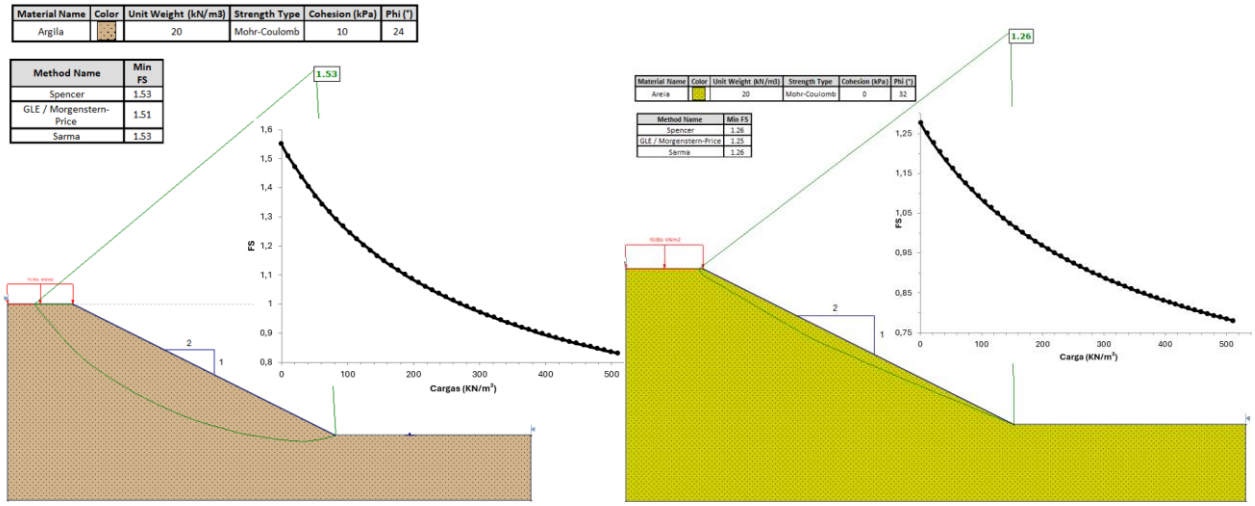



Figura 2. Avaliação de sensibilidade com sobrecarga para solos arenosos e argilosos.

### 3.4 Espessura de camada menos resesistente na fundação

Para esta análise, considerou-se apenas o solo argiloso, uma vez que, no caso do solo arenoso, as superfícies críticas de ruptura identificadas são relativamente rasas e não atingem profundidades suficientes para que a elevação da camada mais resistente exerça influência significativa na geometria da superfície de ruptura. Dessa forma, a variação da profundidade do estrato resistente não altera de maneira relevante o mecanismo de ruptura nesse material nas condições consideradas nesse estudo.

Os resultados mostram que a profundidade da camada resistente influência a geometria da superfície de ruptura e o fator de segurança do talude. Quando a camada resistente se encontra mais profunda, a superfície de ruptura se desenvolve inteiramente no solo. Por outro lado, quando a camada resistente está mais próxima da base do talude, ela limita o desenvolvimento da superfície de ruptura. Assim, a posição do estrato resistente influência o mecanismo de ruptura e o nível de estabilidade do talude.

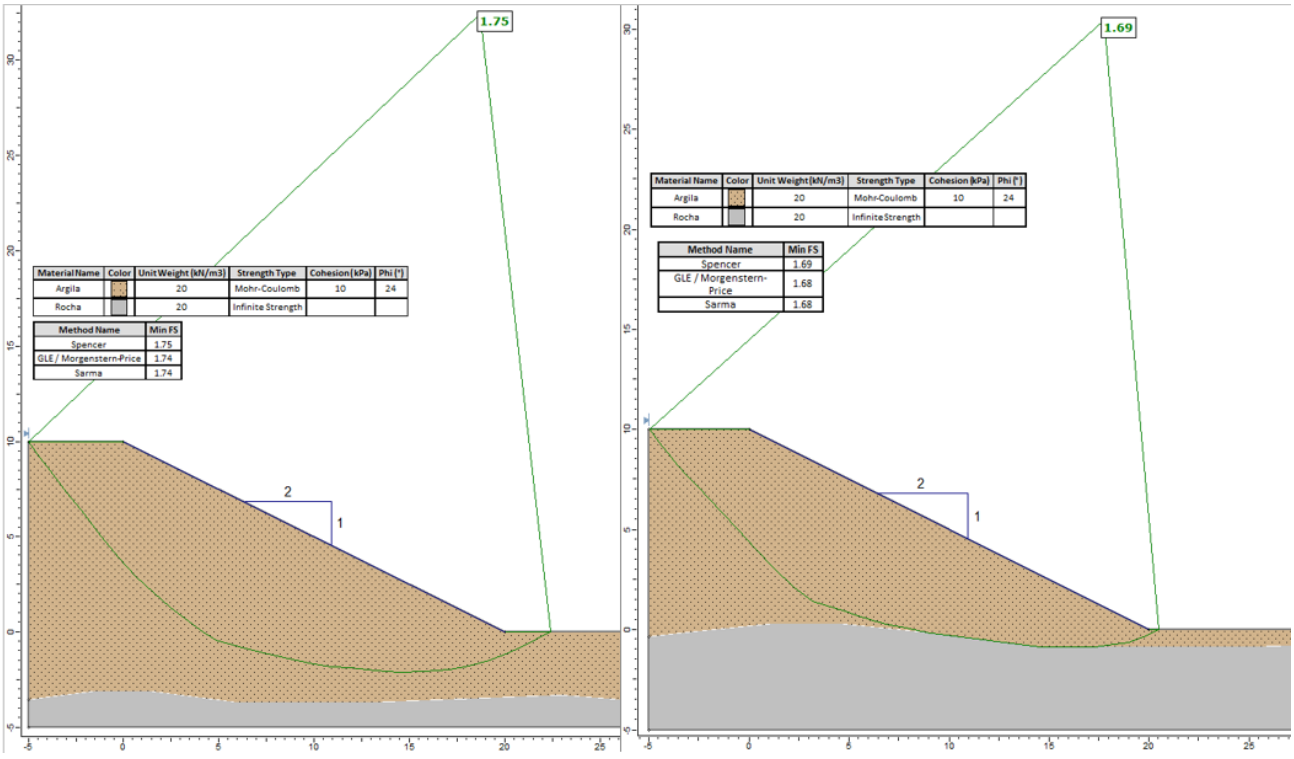



Figura 3. Avaliação com variação da cota da camada mais resistente.

### 3.5 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

Observa-se, na Figura 4 (solo argiloso), uma relação linear direta entre a coesão do material e o fator de segurança do talude, com coeficiente de determinação igual a 1, indicando comportamento perfeitamente proporcional no contexto da análise determinística adotada. O aumento da coesão resulta em elevação significativa da estabilidade, evidenciando a forte dependência de taludes argilosos em relação a esse parâmetro. Destaca-se que, mesmo na ausência de coesão, o fator de segurança permanece superior à unidade, o que indica a contribuição relevante do ângulo de atrito na resistência global.

Entretanto, essa elevada sensibilidade do fator de segurança à coesão requer cautela na definição desse parâmetro, uma vez que, em condições reais, a coesão pode apresentar significativa variabilidade e redução ao longo do tempo, especialmente em função de processos de saturação e amolecimento. Ressalta-se que a linearidade observada é característica das análises determinísticas em equilíbrio limite, nas quais os parâmetros de resistência são considerados constantes. Nesse contexto, a coesão atua como o principal parâmetro estabilizante em solos argilosos, sobretudo em geometrias moderadas, como a inclinação 1V:2H, onde a contribuição friccional isoladamente não é suficiente para garantir elevados fatores de segurança.

Por outro lado, conforme apresentado na Figura 4 (solo arenoso), observa-se uma relação aproximadamente linear entre o ângulo de atrito e o fator de segurança do talude, também com elevado coeficiente de determinação. Esse comportamento evidencia que, em solos arenosos, a estabilidade é governada predominantemente pela resistência friccional, uma vez que não há contribuição coesiva. Verifica-se ainda a existência de um valor crítico de φ', abaixo do qual o talude se torna instável, refletindo a relação direta entre a geometria do talude e a resistência ao cisalhamento mobilizada.

Adicionalmente, a elevada sensibilidade do fator de segurança a variações no ângulo de atrito reforça a importância de uma adequada caracterização geotécnica, visto que pequenas alterações nesse parâmetro podem resultar em impactos significativos na estabilidade. Dessa forma, a análise comparativa entre as Figuras A e B evidencia comportamentos distintos, nos quais a estabilidade é controlada por mecanismos resistentes diferentes, sendo a coesão dominante nos solos argilosos e o atrito nos solos arenosos.

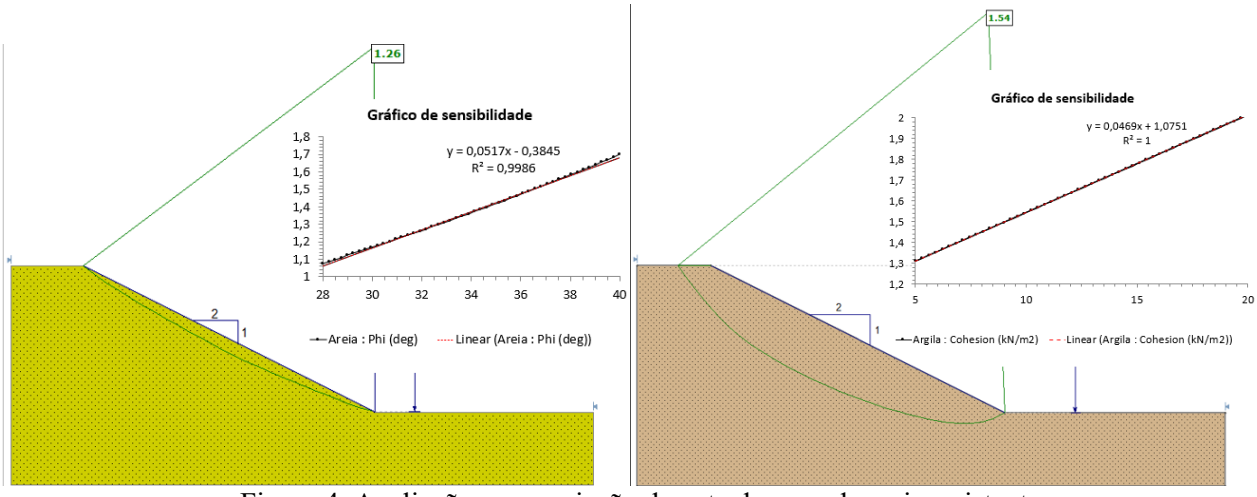



Figura 4. Avaliação com variação da cota da camada mais resistente.

## 4 Conclusões

Com base nas análises paramétricas realizadas por meio de métodos de equilíbrio limite, foi possível avaliar de forma sistemática a influência dos principais parâmetros geotécnicos na estabilidade de taludes homogêneos, considerando materiais representativos de comportamento arenoso e argiloso.

Os resultados evidenciam que a resposta do fator de segurança está diretamente relacionada ao mecanismo resistente predominante de cada material. Em solos arenosos, a estabilidade mostrou-se fortemente dependente da resistência friccional, sendo a inclinação do talude e o ângulo de atrito os parâmetros de maior influência. Pequenas variações em φ' resultaram em alterações significativas no fator de segurança, indicando elevada sensibilidade e reforçando a importância da adequada caracterização desse parâmetro em campo.

Por outro lado, nos solos argilosos, a coesão exerceu papel dominante na estabilidade, com comportamento linear e proporcional entre esse parâmetro e o fator de segurança. Além disso, verificou-se maior influência da altura do talude e das condições hidráulicas, especialmente em função da maior profundidade das superfícies potenciais de ruptura. A presença de poropressões mostrou-se crítica, promovendo reduções progressivas na estabilidade.

A análise da sobrecarga indicou comportamento semelhante para ambos os materiais, com redução consistente do fator de segurança, evidenciando a importância da consideração de carregamentos externos no dimensionamento de taludes. Já a presença de camadas menos resistentes na fundação demonstrou influência relevante no solo argiloso que apresenta superfície de ruptura mais profundas, alterando o mecanismo de ruptura e limitando o desenvolvimento das superfícies críticas.

De forma geral, os resultados demonstram que a estabilidade de taludes não depende apenas da geometria ou de um único parâmetro isolado, mas da interação entre as propriedades do material, condições hidráulicas e configuração geométrica. A análise comparativa entre solos com comportamentos mecânicos distintos permitiu evidenciar diferenças fundamentais na sensibilidade dos parâmetros, contribuindo para uma melhor interpretação dos resultados de análises de estabilidade.

Por fim, destaca-se o caráter didático do estudo, que possibilita a visualização clara da influência individual de cada variável, servindo como ferramenta de apoio à formação de engenheiros geotécnicos e à tomada de decisão em projetos. Os resultados reforçam a necessidade de abordagens integradas e criteriosas na definição de parâmetros geotécnicos, especialmente considerando suas incertezas e variabilidade em condições reais.

## AGRADECIMENTOS

À TPF Engenharia, pelo apoio e pela disponibilização do software, que constituíram condições essenciais para condução das atividades experimentais e para a consolidação dos resultados apresentados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen, X. et al. Evaluating seismic stability of reinforced soil slopes using the limit equilibrium method. *Frontiers in Physics*, v. 12, 2025.

Gael, C. N.; Leroy, M. N.; Christian, F. B. Research on slope stability assessment methods: a comparative analysis of limit equilibrium, finite element, and analytical approaches. *AI in Civil Engineering*, 2025.

Liu, G.; Li, D. Probabilistic stability assessment of slope considering soft soil and silty clay foundations. *Scientific Reports*, v. 15, 2025.

Rahman, A. U. et al. Geotechnical assessment of rock slope stability using kinematic and limit equilibrium analysis. *Water*, v. 15, n. 10, 2023.

Varol, O. O.; Ayhan, M.; Akinci, M. Comparative slope stability analyses using 3D limit equilibrium and finite element methods. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2024.

Zhang, F. et al. Recent advances in stability analysis and design of 3D slopes. *Frontiers in Built Environment*, v. 10, 2024.