

Influência da Variabilidade de Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento na Estabilidade de Talude da Formação Serra Geral

Karen Santos Schmidt

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, karenschmidt@ufpr.br

Murillo Vinícius Bednarczuk

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, murillobednarczuk@ufpr.br

Vitória Becker de Toledo Piza

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitoria.becker@ufpr.br

Tainá Silva Sá Britto

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, tainabritto@ufpr.br

Vítor Pereira Faro

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vpfaro@ufpr.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em formações geológicas como a Serra Geral é sensível à variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, demandando análises quantitativas de sua influência. Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto da variabilidade da coesão (c') e do ângulo de atrito (ϕ') na estabilidade de taludes desta formação. A metodologia consiste em: (i) variação controlada dos parâmetros c' e ϕ' em modelos geotécnicos; e (ii) cálculo dos fatores de segurança correspondentes através de métodos de equilíbrio limite. Como resultados esperados, destaca-se a identificação do parâmetro mais crítico para a instabilidade (coesão ou ângulo de atrito), quantificado por meio de análise paramétrica e correlacionado com taludes em solos de propriedades geológico-geotécnicas semelhantes. A abordagem proposta visa estabelecer relações quantitativas entre a variabilidade dos parâmetros de resistência e a estabilidade de taludes na Formação Serra Geral, fornecendo subsídios técnicos para avaliações de risco geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência ao cisalhamento, Análise paramétrica, Formação Serra Geral, Estabilidade de taludes, Fator de segurança.

ABSTRACT: Slope stability in geological formations such as the Serra Geral is sensitive to the variability of shear strength parameters, requiring quantitative assessments of their influence. This study aims to evaluate the impact of cohesion (c') and internal friction angle (ϕ') variability on the stability of slopes within this formation. The methodology consists of: (i) controlled variation of c' and ϕ' parameters in geotechnical models; and (ii) calculation of the corresponding safety factors using limit equilibrium methods. The main result is the identification of the most critical parameter for instability (cohesion or friction angle), quantified through sensitivity analysis and correlated with slopes in soils of similar geological and geotechnical characteristics. The proposed approach seeks to establish quantitative relationships between parameter variability and slope stability in the Serra Geral Formation, providing technical support for geotechnical risk assessments.

KEYWORDS: Shear strength, Parametric analysis, Serra Geral Formation, Slope stability, Safety factor.

1 INTRODUÇÃO

Em 2024 o Rio Grande do Sul enfrentou uma das maiores enchentes já registradas, superando a cheia de 1941, que por 40 dias aproximadamente tiveram 26% de moradias afetadas, cerca de 70 mil habitantes (Silveira, 2020). De acordo com Mantovani, et al. (2025), as possíveis causas para o incidente foram as chuvas muito fortes intensificadas pelo El Niño, que ocasionou acúmulos pluviométricos acima de 500 mm em várias áreas, aumentando as chances de cheias, somando com a urbanização acelerada que faz com que diversas áreas



verdes sejam perdidas, retardando o escoamento da água e agravando ainda mais a enchente, que no cenário apresentado evoluiu para uma inundação, resultando em óbitos e severos prejuízos socioambientais e econômicos.

A Formação Serra Geral, que abrange extensas áreas da região Sul do Brasil, é palco de recorrentes eventos de movimentos de massa (SBG, 2025), representando um desafio constante para a engenharia geotécnica. Segundo Kaul (1990), esta formação, de origem vulcânica, é caracterizada por derrames de lavas basálticas que, ao longo do tempo geológico, foram intensamente fraturadas e intemperizadas. O resultado é um perfil geotécnico complexo, onde maciços rochosos de baixa qualidade são recobertos por solos residuais e depósitos coluvionares, frequentemente em condições de equilíbrio precário (Marinos, Marinos e Hoek, 2007), onde aumenta-se processos erosivos, algo a se considerar em relação a estrutura geotécnica e processos erosivos para prever chances de rupturas e deslizamentos. O entendimento das características locais nos dão discernimento às principais propriedades das estruturas do terreno, que permitem conhecimentos de parâmetros que influenciam na estabilidade dos taludes (Goodman, 1989).

A estabilidade das encostas é governada pela resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes descrita pelo modelo de Mohr-Coulomb, por meio dos parâmetros (Barton, Lien e Lunde, 1974) de coesão efetiva (c') e ângulo de atrito interno (ϕ'). No entanto, a determinação precisa desses parâmetros é um dos maiores desafios em projetos geotécnicos, devido à heterogeneidade natural dos solos e à dificuldade de se obter amostras representativas (Ledesma, 2024), a incerteza associada a c' e ϕ' pode levar a avaliações de segurança imprecisas, com consequências potencialmente catastróficas, evidenciando a necessidade de interpretações e conhecimentos técnicos. Conforme apontado por Paravidino, Rodriguez e Penasso (2024), a variabilidade desses parâmetros, como a coesão que é especialmente crítica em solos com frações finas, impacta diretamente o fator de segurança, abordado na norma da ABNT NBR 11682:2009, que traz parâmetros e diretrizes do fator de segurança a serem adotados, sendo estes a relação entre os momentos resistentes e momentos atuantes.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de análise paramétrica, a influência da variabilidade da coesão e do ângulo de atrito na estabilidade de um talude típico da Formação Serra Geral. A contribuição principal do estudo é fornecer uma análise quantitativa que auxilie na compreensão dos mecanismos de ruptura e na tomada de decisão em projetos de contenção e mitigação de riscos em áreas com características geológico-geotécnicas semelhantes.

2 METODOLOGIA

O presente estudo tem como área de análise um trecho da Rodovia BR-470, localizado entre os municípios de Veranópolis e Bento Gonçalves, na Serra Gaúcha, estado do Rio Grande do Sul. A região é caracterizada por declividades acentuadas, presença de maciços fraturados e frequentes processos de instabilidade superficial. O traçado da rodovia neste setor cruza áreas recobertas por colúvios espessos que se sobrepõem a derrames basálticos da Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento (Perazzolo, 2003). De acordo com o mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2025), o trecho em questão insere-se em uma das zonas de maior risco geotécnico da região Sul, apresentando ocorrências recorrentes de escorregamentos em taludes rodoviários. Essa vulnerabilidade decorre da combinação entre condições geológicas locais, saturação frequente do solo por chuvas intensas e ausência de estruturas adequadas de contenção ou drenagem.

A avaliação da estabilidade foi realizada por meio de modelagem numérica bidimensional no software Slide2 (Rocscience, 2023), com aplicação do método de Morgenstern-Price (1965), baseado no princípio do equilíbrio limite. Esse método permite a consideração de rupturas circulares e não circulares, sendo especialmente adequado para taludes compostos por materiais com diferentes resistências e interfaces geométricas marcadas, como colúvios sobre rochas fraturadas. A escolha por este método se justifica pela sua capacidade de representar superfícies de ruptura complexas, incorporando a variação de forças entre fatias, o que aumenta a precisão da estimativa do fator de segurança (FS) em cenários geotécnicos heterogêneos (Duncan e Wright, 2005).

O modelo geotécnico adotado representa uma seção típica da encosta da Formação Serra Geral, composta por três camadas: uma camada superficial de aterro, uma camada intermediária de colúvio, e a base de rocha basáltica alterada. Essa composição estratigráfica foi definida com base no perfil geotécnico descrito por Perazzolo (2003) para taludes naturais na região de Bento Gonçalves (RS). Os materiais foram modelados com critérios constitutivos compatíveis com seu comportamento mecânico: os solos (aterro e colúvio) foram

representados pelo modelo Mohr-Coulomb, enquanto o maciço rochoso foi caracterizado segundo o critério Hoek-Brown Generalizado. O colúvio foi definido com coesão efetiva (c') de 17 kPa, ângulo de atrito interno (ϕ') de 31° e peso específico de 16 kN/m^3 , dentro da faixa experimental obtida por Perazzolo (2003). O aterro superficial foi modelado com parâmetros fixos, definidos com base em critérios conservadores, sendo estes coesão efetiva (c') de 8 kPa, ângulo de atrito interno (ϕ') de 29° e peso específico de 16 kN/m^3 , típicos de solos não compactados. A rocha basáltica alterada da Formação Serra Geral foi representada com os seguintes parâmetros: UCS = 30 MPa, GSI = 40, $m_i = 15$ e fator de distúrbio $D = 1$, conforme recomendações de Hoek, Carranza-Torres e Corkum (2002). Esses parâmetros também são compatíveis com os adotados por Pauli (2021) para o mesmo contexto geológico, e permaneceram inalterados em todos os cenários de análise, devido à elevada resistência do maciço rochoso e sua função de suporte inferior.

A análise paramétrica consistiu em variações controladas dos parâmetros de resistência do colúvio, com o objetivo de quantificar sua influência sobre a estabilidade global do talude. Foram aplicadas reduções progressivas de 20%, 50% e 80% na coesão (c'), com o ângulo de atrito (ϕ') mantido constante, e, posteriormente, reduções de 4%, 10% e 20% em ϕ' , com c' fixado. As faixas de variação foram estabelecidas com base no estudo de Paravidino, Rodriguez e Penasso (2024), que propuseram tais percentuais como representativos de incertezas reais em projetos geotécnicos. Por fim, foi avaliado um cenário crítico combinado, com as reduções máximas aplicadas simultaneamente a ambos os parâmetros. O nível d'água (NA) foi mantido constante ao longo de todas as simulações, assumindo-se uma condição de saturação plena da camada coluvionar, de forma a representar um cenário conservador.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises de estabilidade e a discussão sobre a influência dos parâmetros de resistência no fator de segurança (FS) do talude. A análise está estruturada em cenários que avaliam o impacto isolado e combinado da variação da coesão e do ângulo de atrito.

3.1 Análise de Estabilidade do Cenário Atual

O cenário de referência corresponde à análise do talude com os parâmetros geotécnicos originais, sem aplicação de fatores de redução. A modelagem numérica resultou em um fator de segurança (FS) mínimo de 1,215, conforme apresentado na Figura 1. Apesar de superior ao limiar de instabilidade ($FS = 1,0$), esse valor não atende aos critérios da ABNT NBR 11682:2009, que recomenda FS maior ou igual a 1,3 para taludes permanentes em solo natural. Considerando que o trecho estudado localiza-se em uma área de alta suscetibilidade a escorregamentos, o valor obtido indica condição de segurança limitada, justificando a realização de uma análise paramétrica para avaliar as incertezas nos parâmetros de resistência.

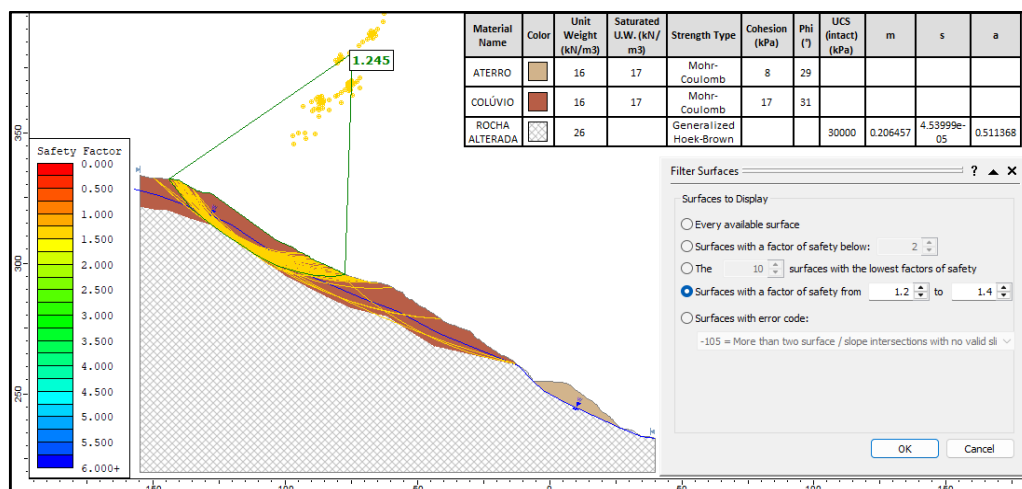


Figura 1. Análise de estabilidade no cenário atual.

3.2 Análise Paramétrica da Coesão (c')

A influência da coesão foi avaliada por meio de reduções progressivas em seu valor, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Os resultados, apresentados na Figura 2, demonstram uma queda acentuada do fator de segurança à medida que a coesão é reduzida. Com uma redução de 80% (de 17,0 kPa para 3,4 kPa), o FS atinge o valor de 0,988, indicando a condição de ruptura do talude (FS < 1,0). Este resultado evidencia que a coesão é um parâmetro crítico para a estabilidade do talude estudado, o que é consistente com as observações de Paravidino, Rodriguez e Penasso (2024), que destacam a elevada incerteza da coesão em solos com comportamento coesivo.

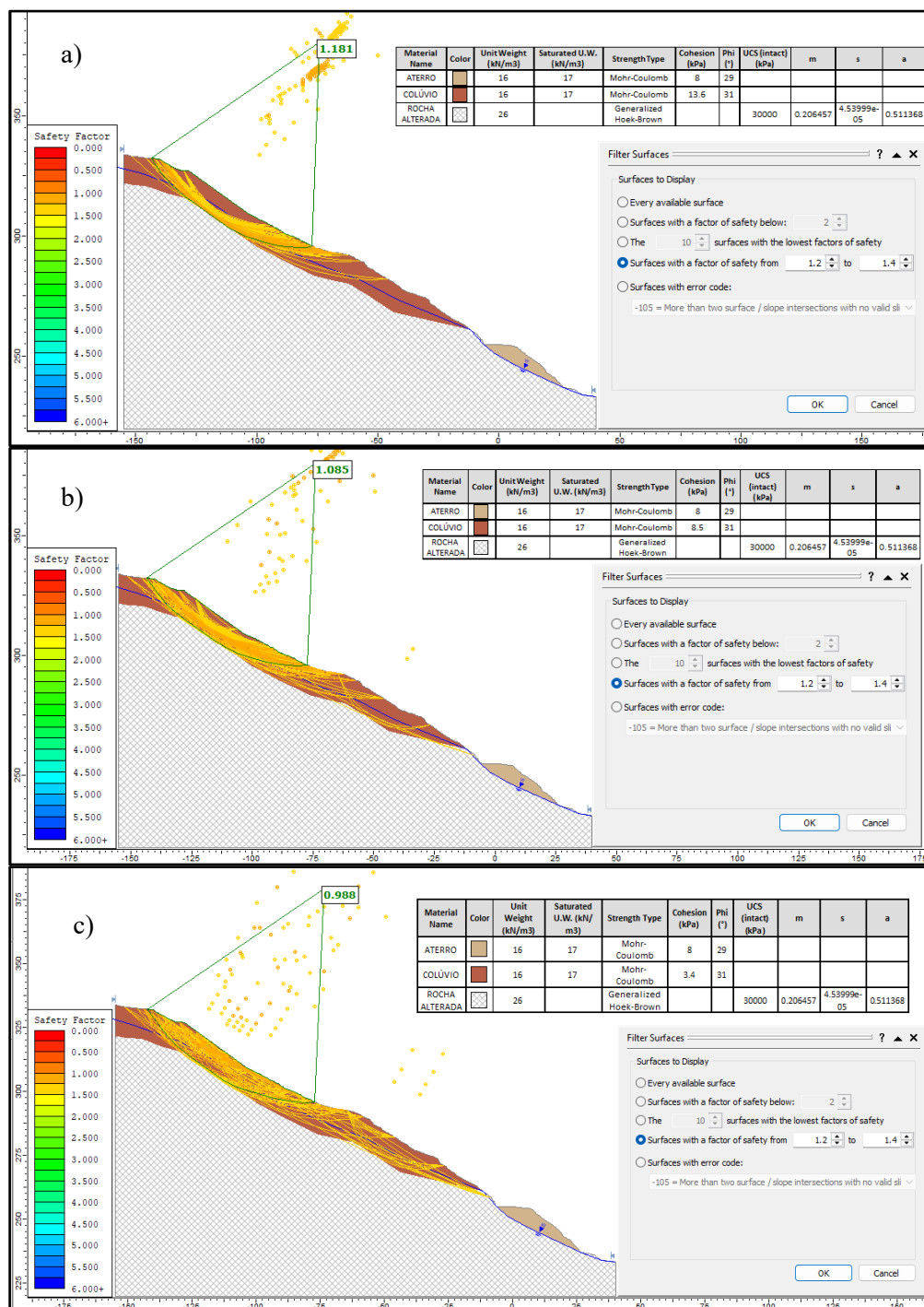


Figura 2. Variação da coesão em: a) -20%; b) -50%; e c) -80%.

3.3 Análise Paramétrica e do Ângulo de Atrito (ϕ')

De forma análoga, investigou-se a incerteza do ângulo de atrito interno. Conforme a Figura 3, a redução de ϕ' também provoca uma diminuição no fator de segurança, porém com um impacto notavelmente menos acentuado que o da coesão. Mesmo no cenário mais pessimista, com uma redução de 20% no ângulo de atrito (de 31° para $24,8^\circ$), o talude permaneceu tecnicamente estável, com um FS de 1,030. Este comportamento reforça a menor sensibilidade do modelo a este parâmetro quando comparado à coesão, para a geometria e as condições de saturação analisadas.

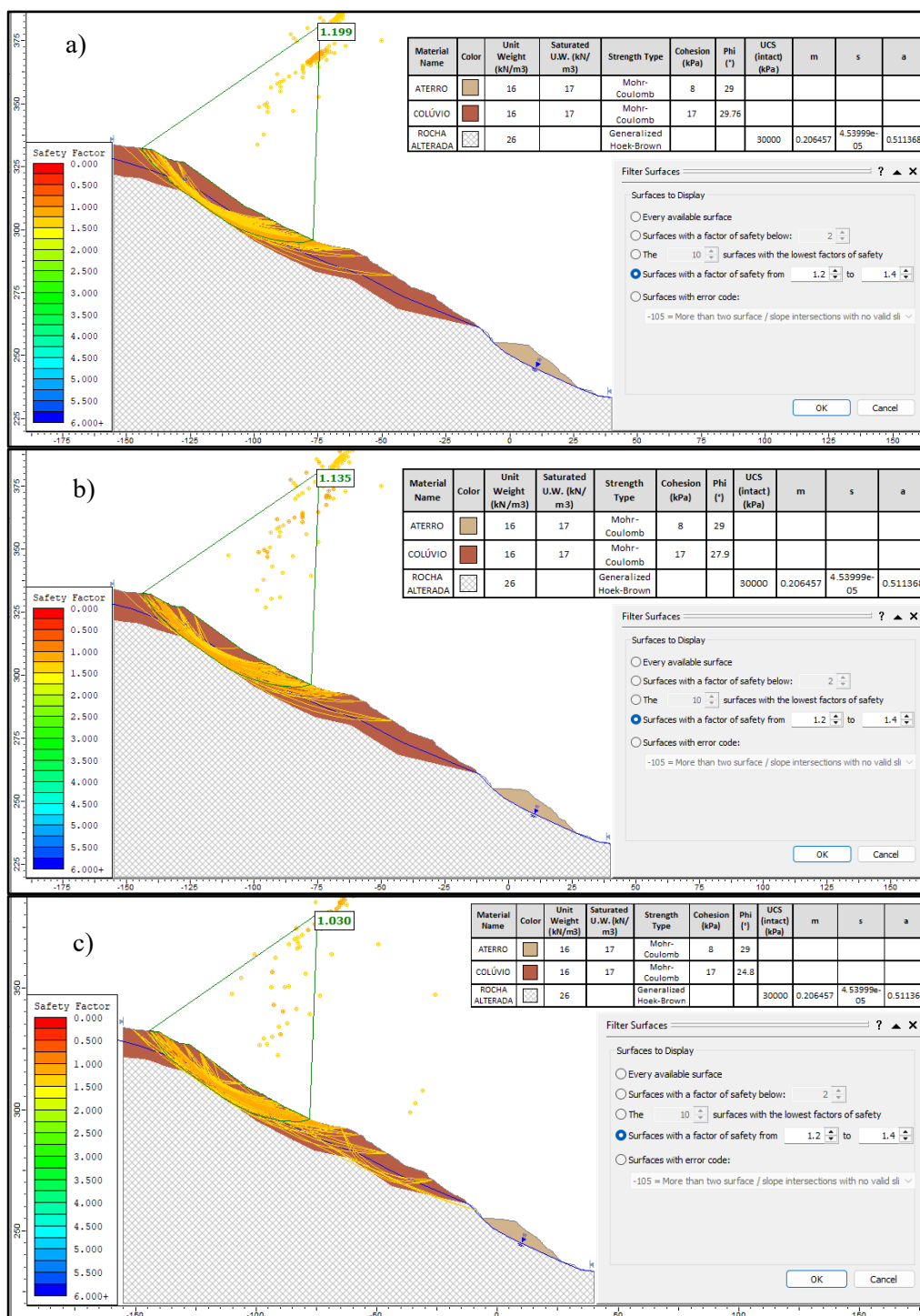


Figura 3. Variação do ângulo de atrito em: a) -4%; b) -10%; e c) -20%.

3.4 Análise do Cenário Crítico Combinado

O cenário mais conservador avaliado considera a combinação das reduções máximas aplicadas a ambos os parâmetros: 80% na coesão e 20% no ângulo de atrito. A análise desta condição, mostrada na Figura 4, resultou em um fator de segurança de 0,775, caracterizando um cenário de colapso generalizado. Essa condição, embora extrema, é relevante para simular cenários de degradação avançada do material por intemperismo ou situações em que a caracterização geotécnica inicial tenha sido excessivamente otimista.

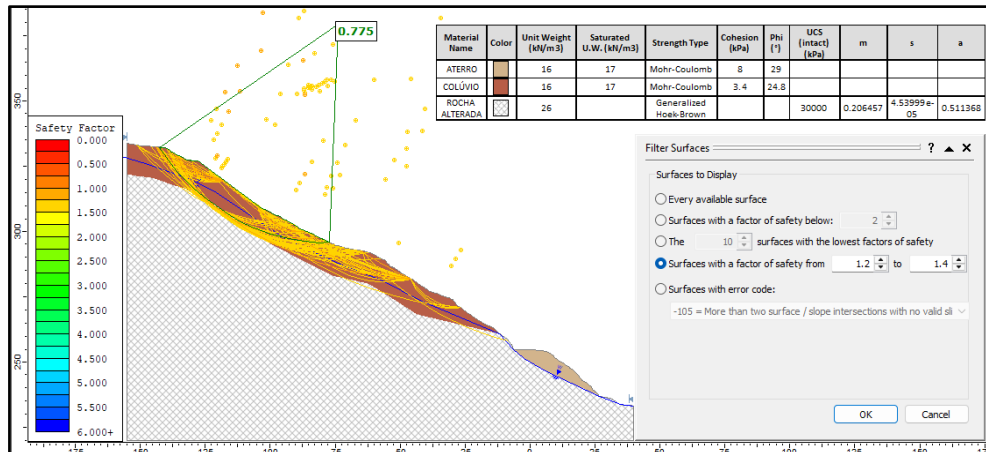


Figura 4. Variação da coesão em -80% e do ângulo de atrito em -20%.

3.5 Discussão e Comparação com Estudos Anteriores

Considerando os estudos de Perazzolo (2003), que apontam variações naturais significativas na coesão de colúvios da Formação Serra Geral, e a abordagem metodológica proposta por Paravidino, Rodriguez e Penasso (2024), que aplica reduções percentuais controladas para representar incertezas geotécnicas, foi realizada uma análise paramétrica com variação sistemática da coesão (c') e do ângulo de atrito (ϕ'). Essa análise teve como objetivo quantificar as mudanças do fator de segurança (FS) frente às incertezas típicas de projetos geotécnicos em solos coluvionares. A Tabela 1 resume os principais resultados obtidos nas simulações realizadas.

Tabela 1. Resultados da análise paramétrica da estabilidade.

Variação de c'	c' (kPa)	Variação de ϕ'	ϕ' (°)	FS
0	17,00	0	31,00	1,245
-20%	13,60	0	31,00	1,181
-50%	8,50	0	31,00	1,085
-80%	3,40	0	31,00	0,988
0	17,00	-4%	29,76	1,199
0	17,00	-10%	27,90	1,135
0	17,00	-20%	24,80	1,030
-80%	3,40	-20%	24,80	0,775

Como pode ser observado na Tabela 1, a redução da coesão efetiva (c') teve impacto mais acentuado na estabilidade do talude em comparação à redução do ângulo de atrito (ϕ'). A variação isolada da coesão levou o fator de segurança de 1,245 (cenário atual) para 0,988, mesmo com ϕ' mantido constante. Esse resultado reforça a interpretação de que, em solos coluvionares sob saturação, a coesão é o parâmetro de maior incerteza. A faixa de coesão adotada na análise, entre 3,4 kPa e 17 kPa, está de acordo com os valores obtidos experimentalmente por Perazzolo (2003), que identificou coesões variando entre 12 e 31 kPa em colúvios da Formação Serra Geral. A simulação realizada confirma que a simples variação deste parâmetro dentro de uma faixa realista é suficiente para levar o talude da estabilidade à ruptura ($FS < 1,0$), evidenciando a criticidade da incerteza associada à coesão. Em contrapartida, mesmo com redução de 20% no ângulo de atrito, o fator de segurança manteve-se acima do limiar de estabilidade ($FS = 1,030$). A análise combinada, com c' e ϕ'



simultaneamente reduzidos aos limites propostos por Paravidino, Rodriguez e Penasso (2024), resultou em um FS de 0,775, indicando um cenário de instabilidade crítica. Esses resultados indicam que a variabilidade da coesão deve ser tratada como variável dominante nas análises de estabilidade em taludes da Serra Geral, sendo essencial que investigações de campo e modelagens numéricas considerem sua flutuação como parte do processo de avaliação do risco geotécnico.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise paramétrica desenvolvida neste estudo permitiu avaliar, de forma sistemática, a influência da variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do colúvio na estabilidade de um talude da Formação Serra Geral. A modelagem numérica demonstrou que a coesão efetiva (c') é o parâmetro mais sensível na definição do fator de segurança, sendo sua redução associada a quedas expressivas na estabilidade global do maciço. A abordagem utilizada neste trabalho fornece subsídios técnicos para melhorar a confiabilidade das avaliações de risco geotécnico e apoiar a tomada de decisão em projetos de estabilização de encostas. Recomenda-se, para estudos futuros, a inclusão de variações no nível d'água de forma transiente, bem como a realização de ensaios laboratoriais mais representativos para calibração dos modelos, permitindo assim uma aproximação ainda maior entre a simulação numérica e o comportamento real dos taludes da Formação Serra Geral.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à empresa Solution IPD pela disponibilização do acesso ao software Slide2, que viabilizou a realização das análises numéricas desenvolvidas neste estudo, e também ao Departamento de Construção Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, v. 6, n. 4, p. 189-236.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2021). *Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Bento Gonçalves, RS*. Brasília. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- Duncan, J. M.; Wright, S. G. *Soil strength and slope stability*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. 2. ed. New York: Wiley.
- Guimaraens, R. (2013). *A enchente de 41*. Porto Alegre. Libretos.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. Rocscience. Disponível em: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Hoek-Brown-Failure-Criterion-2002.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- Kaul, P. F. T. (1990). *Geologia e Geografia do Brasil: Região Sul - Volume 2*. Rio de Janeiro: IBGE.
- Ledesma, A. (2024). *The difficult task of teaching shear strength of soils*. Soils and Rocks, São Paulo, v. 47, n. 2, e2024003424. Disponível em: <https://doi.org/10.28927/SR.2024.003424>. Acesso em: 09 de jul. 2025.
- Mantovani, J. R.; Alcântara, E.; Baião, C. F.; Pampuch, L.; Curtarelli, M. P.; Ribeiro, J. V. M.; Guimarães, Y. C.; Londe, L.; Massi, K.; Marengo, J.; Nobre, C. A.; Assireu, A. T.; Bortozolo, C. A.; Simões, S. J.; Tomasella, J.; Moraes, O. L. L. de.; Park, E. (2025). *Unprecedented flooding in Porto Alegre Metropolitan Region (Southern Brazil) in May 2024: Causes, risks, and impacts*. Journal of South American Earth Sciences, v. 160. 10.1016/j.jsames.2025.105533.



Marinos, P.; Marinos, V.; Hoek, E. (2007). *Geological Strength Index (GSI): A Characterisation Tool for Assessing Engineering Properties of Rock Masses*. In: TSIAMIS, G.; STAMOS, A.; PAPAIOANNOU, M. (Eds.). *Tunnelling and Underground Space Technology*. London: Taylor & Francis. p. 59-78.

Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. *Géotechnique*, 15(1), p. 79-93.

Paravidino, J. M.; Rodriguez, T. T.; Penasso, S. M. *Variabilidade de parâmetros de resistência de solo e sua influência no estudo de estabilidade de um talude*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG 2024, Balneário Camboriú. *Anais eletrônicos*, São Paulo.

Pauli, E. D. N. (2021). *Análise de Estabilidade de Talude Utilizando o Método de Scanline em uma Pedreira de Diabásio*. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 73 p.

Perazzolo, M. C. (2003). *Estudo da estabilidade de taludes naturais na Formação Serra Geral em Bento Gonçalves e Canela/RS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 73 p.

Rocscience Inc. (2023). *Slide2 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis*. Toronto, Canada.

SGB – Serviço Geológico do Brasil (2025). *Geoportal de Desastres Naturais*. Brasília: SGB. Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/desastres>. Acesso em: 10 jul. 2025.

Silveira, A. L. L. (2020). *Chuvas e vazões da grande enchente de 1941 em Porto Alegre/RS*. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, v. 35, p. 69-90.