

Além do Fator de Segurança: Investigação sobre a Influência das Variabilidades Inerentes à Estabilidade de Taludes

Angelo Dotto Ragagnin Prior

Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, angelodrprior@hotmail.com

Enzo Borin Souza

Discente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, enzoborinsouza@hotmail.com

Kauan Baumhardt Itau

Discente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, kauanitau2003@gmail.com

Patricia Rodrigues Falcão

Doutoranda, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Magnos Baroni

Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@gmail.com

RESUMO: Apesar dos Métodos de Equilíbrio Limite serem eficientes, estes ainda proporcionam uma relevante variabilidade de respostas para uma mesma problemática. Nessa perspectiva, o presente artigo investiga as diferentes superfícies de ruptura e fatores de segurança, utilizando no software *Slide*, os Métodos de Fellenius, Janbu Corrigido, Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Ainda, avalia de forma probabilística, pela Simulação de Monte Carlo, Método de Primeira Ordem Segundo Momento e Hipercubo Latino, os índices de confiabilidade em diferentes cenários. Os principais resultados demonstraram que o Método de Fellenius apresentou os menores valores de fator de segurança e índice de confiabilidade. Na sequência, o Método de Janbu também evidenciou índices de confiabilidade inferiores quando comparado aos métodos de Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Os métodos de Spencer e Morgenstern-Price consideram simultaneamente as equações de equilíbrio de forças e momentos, proporcionando maior rigor nas análises. Observou-se que, à medida que os coeficientes de variação dos parâmetros aumentaram, os valores de índice de confiabilidade caíram expressivamente. Além disso, não foram observadas diferenças significativas nos resultados entre as simulações de Monte Carlo e Hipercubo Latino. Por fim, o método FOSM permitiu verificar que o ângulo de atrito do colúvio foi o parâmetro mais influente na estabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Fator de segurança, Índice de confiabilidade, Probabilística, Superfície de ruptura, Coeficientes de variação.

ABSTRACT: Although Limit Equilibrium Methods are widely used and effective, they still present significant variability in the results for the same problem. In this context, the present study investigates different slip surfaces and safety factors using the *Slide* software, applying the Fellenius, Corrected Janbu, Simplified Bishop, Spencer, and Morgenstern-Price methods. Additionally, it evaluates, through a probabilistic approach using Monte Carlo Simulation, the First Order Second Moment method, and Latin Hypercube, the reliability indices under different scenarios. The main results showed that the Fellenius method consistently produced the lowest safety factors and reliability indices. Similarly, the Corrected Janbu method also exhibited lower reliability indices compared to the Simplified Bishop, Spencer, and Morgenstern-Price methods. The Spencer and Morgenstern-Price methods, which simultaneously satisfy both force and moment equilibrium equations, provided more rigorous and consistent results. It was observed that, as the coefficients of variation of the geotechnical parameters increased, the reliability indices significantly decreased. Furthermore, no notable differences were found between the results obtained using Monte Carlo and Latin Hypercube simulations. Finally, the First Order Second Moment method revealed that the friction angle of the colluvium was the most influential parameter in the overall slope stability.

KEYWORDS: Safety factor, Reliability index, Probabilistic analysis, Slip surface, Coefficients of variation.

1 INTRODUÇÃO

Dentro da engenharia geotécnica, a análise de estabilidade permite avaliar a condição de segurança de um talude. Definido por Caputo (1988), como qualquer superfície inclinada que enquadra um maciço de solo ou rocha. O material presente nestas estruturas pode ter diversas origens, visto que a formação do solo é determinada por um conjunto de processos físicos e químicos, que geram um material heterogêneo composto por partículas de diferentes tamanhos e composições mineralógicas (PINTO, 2006).

Nesse sentido, a grande variabilidade da formação dos solos torna sua heterogeneidade um critério de grande relevância, principalmente, quando pondera-se quais características permitem a melhor compreensão do seu comportamento. A alterabilidade espacial das propriedades do solo, se ignorada, pode modificar, significativamente, a probabilidade de ruptura, sendo crucial ir além das abordagens tradicionais e determinísticas (ASSIS, 2020).

Nessa perspectiva, o Método do Equilíbrio Limite é amplamente utilizado para avaliar a estabilidade de taludes, esta metodologia fundamenta-se na aplicação de princípios da mecânica dos solos e da resistência dos materiais (RISELO et al., 2022). Tipicamente, o método consiste na discretização do maciço situado acima da superfície potencial de ruptura, em um conjunto de fatias verticais, sobre as quais se aplicam as condições de equilíbrio estático. Ao se aplicar esta metodologia, os cálculos podem ser realizados por meio de uma abordagem determinística ou probabilística (FALCÃO et al., 2024).

Segundo Assis e Nogueira (2023), uma das principais fontes de incerteza na análise da estabilidade refere-se à variabilidade nos resultados obtidos a partir dos Métodos do Equilíbrio Limite. Conforme Becher et al., (2023), a abordagem determinística não é capaz de quantificar adequadamente as incertezas inerentes ao sistema, o que pode resultar em valores de fator de segurança não condizentes com a realidade. Desse modo, a análise probabilística possibilita a inclusão das variabilidades associadas aos projetos geotécnicos, abrangendo aquelas influenciadas por processos de origem geológica, condições ambientais e fatores físico-químicos (LI et al., 2015).

Diante do exposto, o presente artigo apresenta a análise da estabilidade de um talude próximo à rodovia RS 149, no Rio Grande do Sul. A instabilidade do maciço foi examinada a partir da utilização do software *Slide*, por meio de análises determinísticas e probabilísticas. Além disso, buscou-se demonstrar como estas respostas se comportam em função da escolha de diferentes Métodos de Equilíbrio Limite e Probabilísticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo do presente trabalho é oriunda de um talude disposto nas proximidades da rodovia RS 149, mais precisamente, no km 149 + 150, no município de Faxinal do Soturno, região central do estado do Rio Grande do Sul. A região em análise está localizada entre a rodovia e as margens do Rio Soturno, sendo esta submetida às oscilações do nível da água do rio. Os parâmetros geotécnicos que balizaram as investigações, assim como o perfil transversal, são provenientes da pesquisa de Porto (2019), a qual efetuou sete sondagens mistas e ensaios de cisalhamento direto sob condições inundadas. Ainda, baseou-se nesta referência para efetuar a disposição e elevação do nível de água nas simulações, uma vez que esta utilizou três medidores de nível freático, em diferentes períodos do ano.

Para a verificação do fator de segurança e do índice de confiabilidade, foram avaliados quatro modelos distintos do talude utilizando o software *Slide*. O Modelo 01 representou a configuração original do talude, sem qualquer alteração, conforme apresentado na Figura 1 (a). No Modelo 02, foi realizado o incremento da sobrecarga devido à rodovia RS 149, como ilustrado na Figura 1 (b). O Modelo 03 considerou o levantamento do nível do lençol freático (Figura 1 (c)). E o Modelo 04 combinou ambas as modificações anteriores, ou seja, sobrecarga devido ao tráfego e elevação do nível d'água, conforme a Figura 1 (d).

Para a disposição da carga de tráfego, se adotou uma largura total por faixa de 3,60 m, correspondente à soma da largura do veículo-padrão (2,60 m), e das bordas de segurança (0,50 m) em cada lado. Em relação às solicitações atuantes sobre o aterro, considerou-se uma carga específica de 26 kN/m², conforme estabelecido pela norma NBR 7188 (ABNT, 2024). Já a carga móvel rodoviária, foi definida com base na configuração de um veículo-tipo com peso total de 450 kN, composto por seis rodas (P: 75 kN) distribuídas em três eixos espaçados entre si em 1,50 m, circundada por uma carga uniformemente distribuída de 5 kN/m², em conformidade a normativa supracitada e com o empregado por Ben et al. (2022).








Os parâmetros geotécnicos adotados na análise, detalhados na Figura 1, foram inseridos na ferramenta computacional do *Slide*. As análises de estabilidade do talude foram conduzidas por meio de abordagens determinísticas e probabilísticas. No âmbito determinístico, utilizou-se os métodos de cálculo propostos por Fellenius (TONUS, 2009), Janbu Corrigido (1973), Bishop Simplificado (1955), Spencer (1967) e Morgenstern-Price (1965). As análises probabilísticas foram conduzidas utilizando os métodos de Monte Carlo e Hipercubo Latino, com o objetivo de gerar múltiplos conjuntos de valores para os parâmetros em estudo, a partir de suas médias e desvios padrão. O processo foi repetido de maneira iterativa até que os resultados atingissem estabilidade e convergência estatística. Foram realizadas diversas simulações, e observou-se que, após 10000 iterações por simulação, não havia mais variação significativa nos resultados, indicando que o fator de segurança (FS) havia estabilizado e que a variabilidade foi minimizada.

Fundamentado em Duncan (2000) e no princípio da regra dos três sigmas (*Three Sigma Rule*), adotou-se um intervalo de variação correspondente a três desvios padrão em torno da média, o qual abrange, aproximadamente, 99,7% dos dados assumidamente distribuídos segundo uma distribuição normal. Além disso, os pares dos coeficientes de variação utilizados para a coesão, em conjunto, com o ângulo de atrito, foram de 20,0% e 2,0%, 25,0% e 8,0% e 30,0% e 15,0%, respectivamente, bem como recomenda Duncan (2000) e utilizada por Prior et al. (2022).

Outro método probabilístico empregado foi o First Order Second Moment (FOSM), cuja principal vantagem reside no fato de exigir apenas os valores médios e os desvios padrão dos parâmetros, dispensando o conhecimento detalhado de suas distribuições de probabilidade (FALCÃO et al., 2020). Outra característica relevante do FOSM é a sua capacidade de quantificar a influência individual de cada parâmetro sobre os resultados obtidos pelo modelo. Por fim, os valores dos índices de confiabilidade (β) derivados das abordagens probabilísticas dos métodos supracitados foram avaliados com base nos critérios demonstrados pela Tabela 1, os quais foram estabelecidos pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (1997), permitindo uma interpretação mais robusta da segurança do talude frente às incertezas dos parâmetros geotécnicos.

Tabela 1. Classificação de β e da probabilidade de falha (PF) pelo *U.S. Army Corps of Engineers*.

Desempenho	β	PF (%)
Alto	5,0	0,0000003
Bom	4,0	0,0003
Acima da média	3,0	0,01
Abaixo da média	2,5	0,006
Ruim	2,0	0,023
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi
Colúvio		15.31	Mohr-Coulomb	0	29.5
Siltito		18.3	Mohr-Coulomb	11	38
Arenito Alterado		19.18	Mohr-Coulomb	0	40
Aterro		20	Mohr-Coulomb	5	35
Basalto		22	Mohr-Coulomb	33	50
Arenito		21	Mohr-Coulomb	14.9	45.2
Rio		10	Mohr-Coulomb	0	0

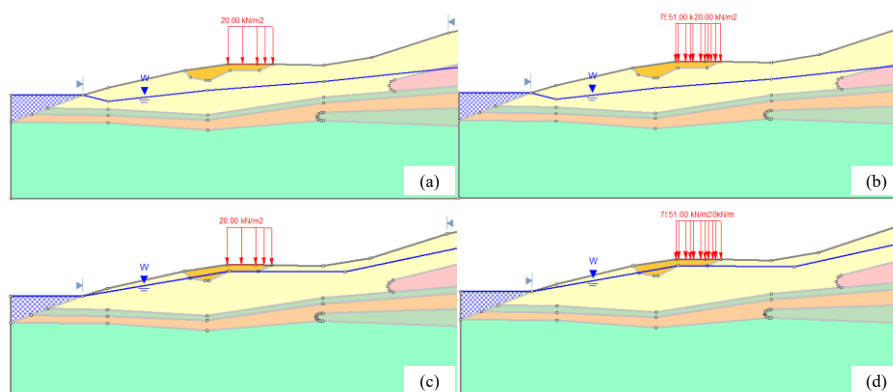


Figura 1. Parâmetros geotécnicos e Modelos utilizados.

3 RESULTADOS

3.1 Abordagem Determinística

Por intermédio da Figura 2, pode-se visualizar os resultados de FS para cada modelo e método analisado. Diante disso, é perceptível que o Modelo 01 demonstrou, para todas as metodologias, fatores de segurança acima do requerido por norma ($FS \geq 1,5$), considerando um alto risco quanto a vidas humanas e danos ambientais. Isso porque, nesta condição, não são incorporadas as cargas de tráfego no sistema, bem como a elevação do nível de água de períodos chuvosos.

Ademais, para o Modelo 02, apenas o método de Fellenius apresentou FS abaixo do admissível. Enquanto, para o Modelo 03, Fellenius e Janbu Corrigido ficaram abaixo do desejado. Tais premissas podem ser explicadas pelo fato de que estes métodos preterem, parte, das forças e momentos envolvidos no processo, o que gera uma subestimação da resistência, compensatória a esta insuficiência. Por fim, o Modelo 04 evidenciou que todos os Métodos de Equilíbrio Limite indicaram FS abaixo do requerido. Isto está vinculado ao levantamento do nível de água e à introdução das cargas de tráfego da rodovia, visto que tais considerações aumentam a poropressão e a sobrecarga no talude, portanto, diminuem a resistência ao cisalhamento.

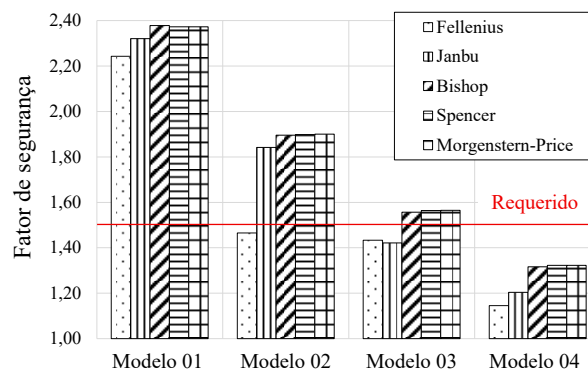


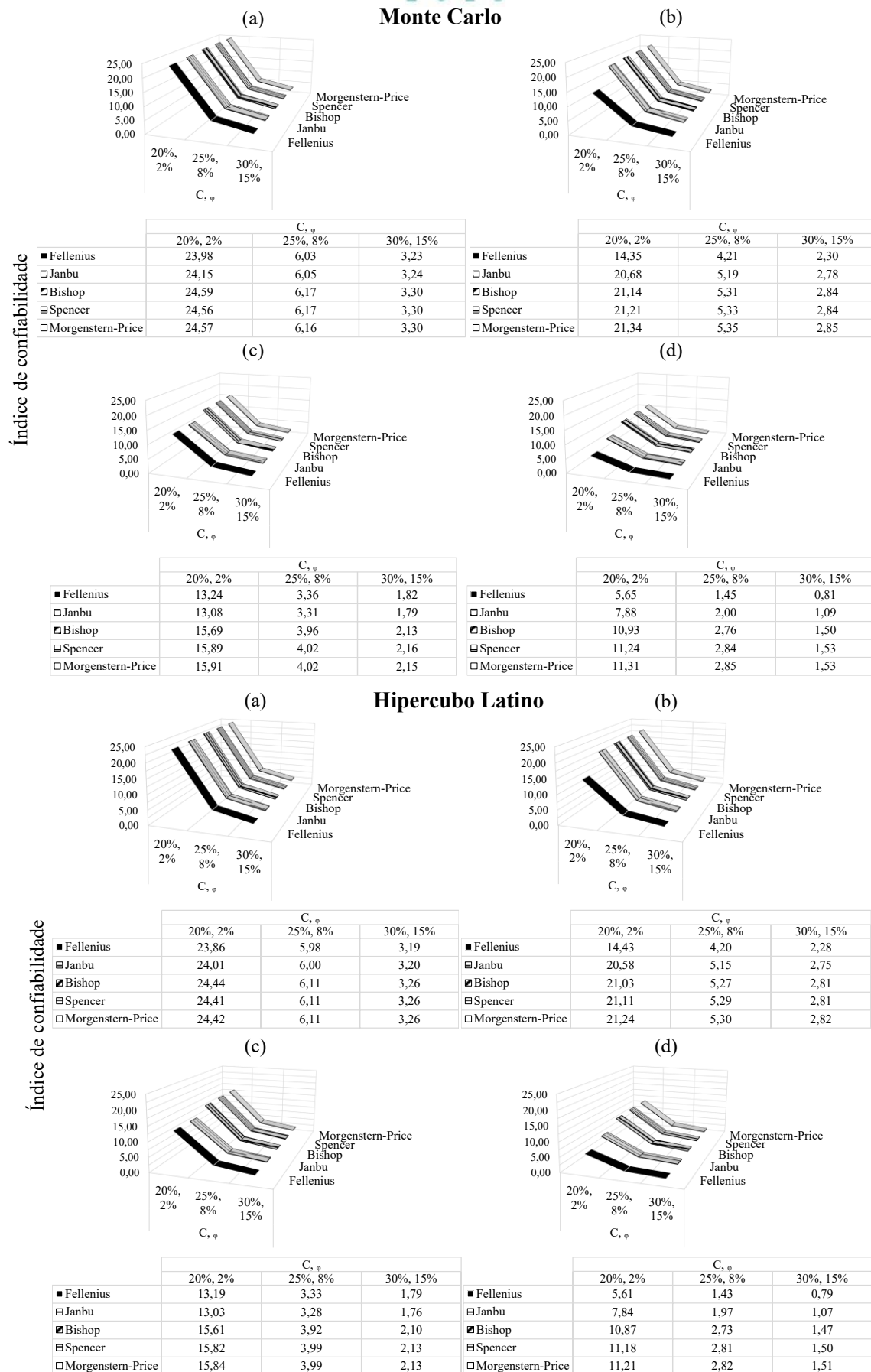
Figura 2. Avaliação do FS para os diferentes modelos.

3.2 Abordagem Probabilística

A Figura 3 ilustra os índices de confiabilidade adquiridos, pelos métodos de Monte Carlo e Hipercubo Latino, para os métodos e coeficientes de variação utilizados, sendo (a), (b), (c) e (d), correspondentes aos Modelos 01, 02, 03 e 04, respectivamente. Nessa perspectiva, fica evidente que, para todos os modelos estudados, à medida que se elevou os coeficientes de variação, foram diminuídos os índices de confiabilidade. Tal fato ocorre pois uma maior variabilidade dos parâmetros geotécnicos das camadas está vinculado com uma menor confiabilidade na resistência das mesmas.

Ademais, notou-se que, assim como os fatores de segurança (Figura 2), os índices de confiabilidade foram decrescendo ao passo que se alterou os Modelos 01, 02, 03 e 04, respectivamente. O motivo deste decréscimo é semelhante ao descrito anteriormente, sendo que a elevação do nível de água pareceu ter mais influência do que o incremento da sobrecarga, visto que, seus índices de confiabilidade e fatores de segurança foram menores para esta condição. Ainda, percebeu-se que os métodos de Fellenius e Janbu Corrigido, em todos os modelos, demonstraram confiabilidades menores que os outros (Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price), já que possuem simplificações inerentes (FALCÃO et al., 2024).

Ao visualizar os β e compará-los com o desempenho sugerido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, verifica-se que, para os coeficientes de variação de 20% da coesão e 2% do ângulo de atrito, em todos os modelos analisados, os índices de confiabilidade indicaram um desempenho alto. Já quando ponderado os coeficientes de variação de 25% e 8%, identificou-se que para os Modelos 01 e 02, obteve-se um desempenho alto, enquanto, para os Modelos 03 e 04, se atingiu um comportamento bom ou acima da média e abaixo da média ou ruim, respectivamente.



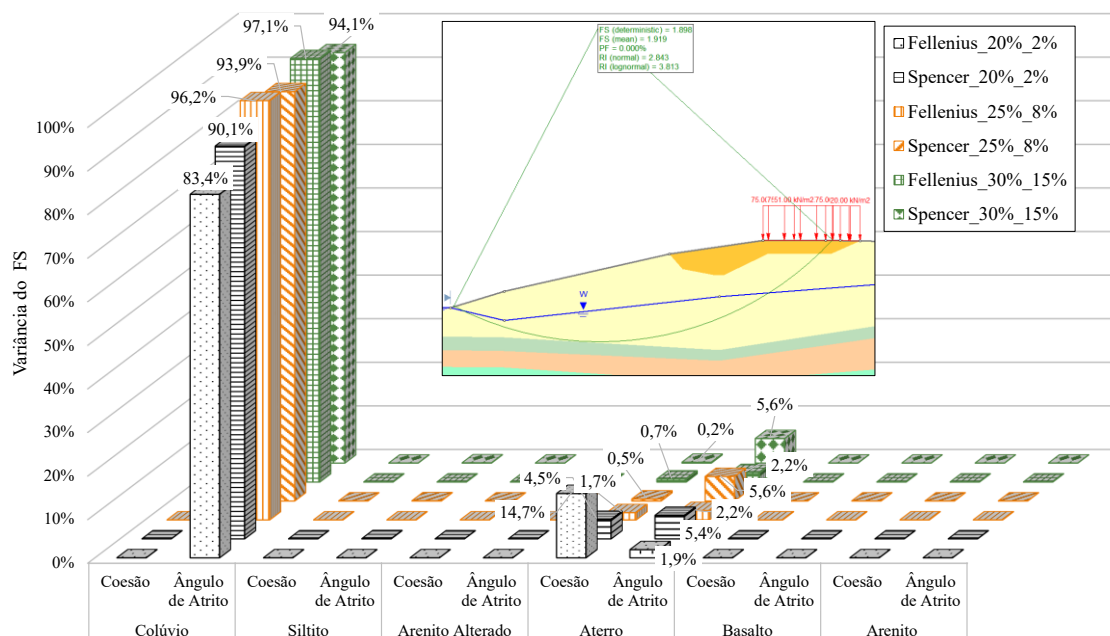
Além disso, ao verificar as variações de 30% para a coesão e 15% para o ângulo de atrito, percebeu-se que para o Modelo 01 o β enquadrou-se como acima da média, já para o Modelo 02 este se identificou como abaixo da média. O Modelo 03 apresentou um desempenho ruim ou insatisfatório, já que possuiu β entre 1,5 e 2,5, e o Modelo 04 demonstrou um comportamento insatisfatório ou perigoso, uma vez que seus índices de confiabilidade ficaram entre 0,0 e 2,0.

Ao visualizar as porcentagens de diminuição do índice de confiabilidade com o decorrer do aumento dos coeficientes de variação, percebeu-se que, em geral, para todos os modelos estudados, existe um decréscimo de 70 a 75% para o primeiro aumento, isto é, de 20% para 25% e de 2% para 8%. Já quando analisado a segunda elevação, existiu uma diminuição, para todos os modelos, de aproximadamente, 46,0%. Ainda, é possível visualizar que não existiram grandes diferenças dos resultados de índice de confiabilidade obtidos pelos métodos de Monte Carlo, em relação ao Hipercubo Latino, sendo que todas as constatações evidenciadas para um, igualitárias para o outro.

Ao aplicar o método de FOSM, foi possível quantificar a influência da variação dos parâmetros dos solos sobre os resultados dos FS. Nesse contexto, a Figura 4 (a) e (b) contempla as análises para os Modelos 02 e 03, respectivamente, utilizando os métodos de Fellenius e Spencer para os três pares de coeficientes de variação. Nessa perspectiva, identificou-se que o ângulo de atrito do colúvio governou o comportamento resistivo do talude em questão. Esta premissa pode ser compreendida, visto que o colúvio não possui intercepto coesivo, e que, praticamente, todas as superfícies de ruptura passaram por esta camada, bem como demonstra a Figura 4. Ainda, é perceptível que os parâmetros de resistência do aterro auxiliam de forma moderada na resistência ao cisalhamento, assim como a coesão da camada mais profunda de arenito. Os parâmetros de resistência das demais camadas não contribuem, apenas auxiliam de maneira extremamente limitada, na resistência.

Cabe mencionar, que tendo em vista uma camada menos resistente, como o colúvio, sobre regiões de boa capacidade, como o siltito, deve-se verificar superfícies planares de ruptura, as quais foram também verificadas. Entretanto, a superfície atuava inteiramente no colúvio ou possuía FS menores que os das superfícies circulares. Portanto, devido a isso, em conjunto com a possibilidade de se utilizar todos os métodos, o presente artigo demonstrou análises de estabilidade por meio de rupturas circulares.

(a)



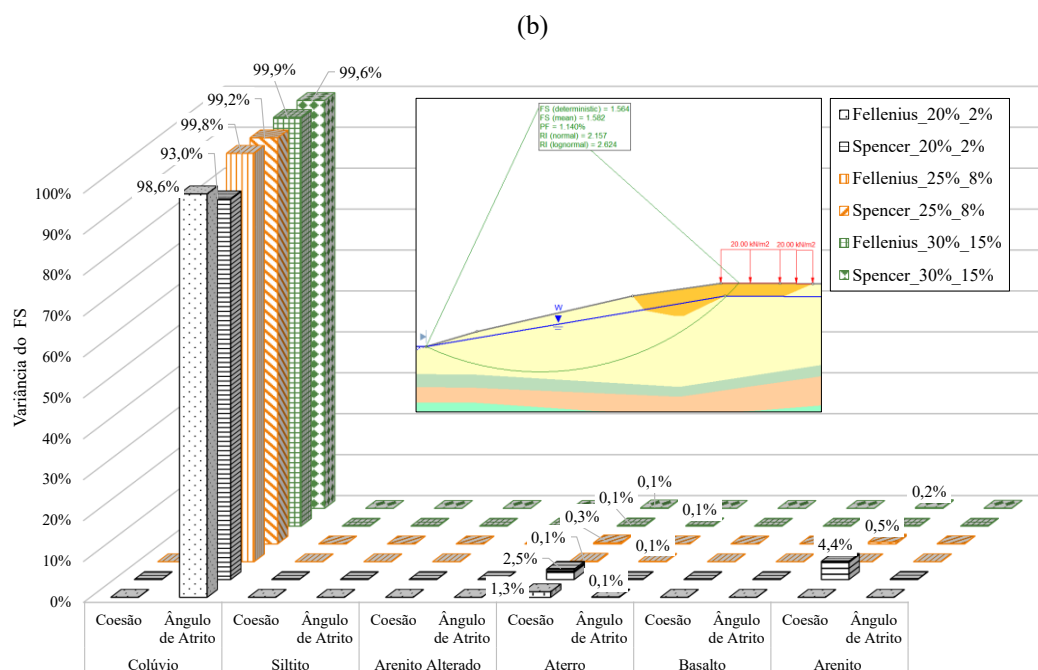


Figura 4. Influência dos parâmetros nos Modelos 02 e 03 .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem determinística demonstrou que, sob as condições iniciais do Modelo 01, todos os métodos de equilíbrio limite geraram FS superiores ao limite normativo ($FS \geq 1,5$), pois não foram consideradas as cargas de tráfego e a elevação do nível de água. No Modelo 02, apenas o método de Fellenius indicou FS abaixo do admissível, enquanto no Modelo 03, tanto Fellenius, quanto Janbu Corrigido, ficaram aquém do requerido, em função das simplificações inerentes a esses métodos. Já no Modelo 04, em que se combinou a elevação do lençol freático e a sobrecarga viária, todos os métodos apontaram FS inferiores a 1,5, confirmando que o aumento da poropressão e da sobrecarga reduzem, significativamente, a resistência ao cisalhamento do talude.

Os resultados dos índices de confiabilidade revelaram que, em todos os modelos, o incremento dos pares de coeficientes de variação ocasionou queda nos valores de β . Os métodos de Fellenius e Janbu Corrigido apresentaram consistentemente os menores índices de confiabilidade em todos os modelos, devido às suas hipóteses simplificadoras. Não foram observadas diferenças significativas nos resultados de β entre Monte Carlo e Hipercubo Latino, mantendo-se todas as tendências idênticas. O método FOSM quantificou que o ângulo de atrito do colúvio domina o comportamento resistivo do talude, visto que o mesmo não possui intercepto coesivo e que, praticamente, todas as superfícies de ruptura passaram pelo colúvio e pelo aterro.

AGRADECIMENTOS

Os autores deixam seu agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento as pesquisas realizadas na Universidade Federal de Santa Maria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis, A.P., Nogueira, C.G. (2023) Comparative study of deterministic and probabilistic critical slip surfaces applied to slope stability using limit equilibrium methods and the First-Order Reliability Method. *Soils and Rocks*, 46 (2), p.1-12.



- Assis, A.P. (2020) Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice, *Soil and Rocks*, 43 (3), p.311-336.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 7188. *Ações devido ao tráfego de veículos rodoviários e de pedestres em pontes, viadutos e passarelas*. Rio de Janeiro.
- Becher, D., Rodrigues, P., Souza, T., Querelli, A., Baroni, M. (2023) Análise de estabilidade determinística e probabilística de uma estrutura de contenção em solo reforçado por geotêxtil. In: X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO, Salvador.
- Ben, L.H.F., Prior, A.D.P., Pascoal, P.T., Falcão, P.R., Baroni, M. (2022) Influência da energia de compactação na estabilidade de um aterro em solo laterítico. In: XI Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul - GEORS, Santa Maria.
- Caputo, H.P. (1988) *Mecânica dos Solos e suas aplicações*, 7nd ed., Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, RJ, BR, 272 p.
- Duncan J.M. (2000) Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (4).
- Falcão, P.R., Fagundes, D.F. (2024) Análise de estabilidade determinística e probabilística de estrutura em solo grampeado. In: XIII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul - GEORS, Rio Grande.
- Falcão, P.R., Fagundes, D.F., Alves, A.M.L. (2020) Análise probabilística de aterro sobre solos moles. *VETOR*, 30 (1), p. 38-48.
- Li, D.Q., Qi, X.H., Cao, Z.J., Tang, X.S., Zhou, W., Phoon, K.K., Zhou, C.B. (2015) Reliability analysis of strip footing considering spatially variable undrained shear strength that linearly increases with depth. *Soils and Foundations*, 55 (4), p.866-880.
- Pinto, C.S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos*, 3nd ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, BR, 368 p.
- Porto E.Z. (2019) *Estudo de estabilidade de uma encosta em Faxinal do Soturno – RS*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, 153 p.
- Prior, A.D.R., Falcão, P., Souza, T.J., Querelli, A., Baroni, M. (2022). Estudo da estabilidade de um reservatório enterrado sob a luz dos conceitos da confiabilidade. In: XI Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul - GEORS, Santa Maria.
- Riselo, B., Passini, L.B., Kormann, A. (2022) Stability analysis of a slope and runout analysis movement of the mobilized-mass volume. *Soils and Rocks*, 45 (4), p.1-12.
- Tonus, B.P.A. (2009) *Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná / UFPR, 147 p.
- U.S. Army Corps Engineers (1997). Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Department of the Army, Washington, United States.