

Avaliação da estabilidade sob o viés determinístico e probabilístico do uso de geogrelha em uma estrutura de contenção

Dêreck Hummel Becher

Graduando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, dereckhbecher@gmail.com

Patricia Rodrigues Falcão

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

Paula Taiane Pascoal

Doutoranda, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, paulatpascoal@gmail.com

Magnos Baroni

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

RESUMO: Este trabalho busca analisar a estabilidade de uma estrutura em solo reforçado executado no município de Votorantim, no Estado de São Paulo. O estudo da estabilidade concentra-se na influência das características atreladas a geogrelha, sendo variados o comprimento, o espaçamento vertical e a resistência à tração do reforço. Para cada uma dessas variáveis foram adotadas três magnitudes de valores, resultando em 27 combinações de diferentes cenários do talude em questão. A análise de estabilidade foi conduzida pelo viés determinístico e probabilístico, com o intuito de atribuir aos resultados de fatores de segurança a probabilidade de falha e, conseqüentemente, os índices de confiabilidade. Ademais, os resultados da estabilidade foram avaliados por três diferentes modelos de cálculo, os quais utilizam-se de diferentes critérios e simplificações nos resultados. A partir da aplicação das análises supracitadas, quantificou-se a real influência que cada um dessas variáveis exerceu sobre o maciço, com destaque para o comprimento e a resistência do reforço. Além disso, notou-se certas peculiaridades nas relações de espaçamentos verticais e resistência das geogrelhas quanto à estabilidade do talude. Por fim, em relação aos diferentes métodos de cálculo, observou-se que maiores simplificações nas abordagens conduzem a fatores de segurança inferiores a resultados de métodos mais rigorosos.

PALAVRAS-CHAVE: Geogrelhas, Talude, Fator de Segurança, Índice de confiabilidade, Probabilidade de falha.

ABSTRACT: This paper aims to analyze the stability of a reinforced soil structure constructed in the city of Votorantim, in the state of São Paulo. The stability analysis focuses on the influence of geogrid parameters, including variations in length, vertical spacing, and tensile strength of the reinforcement. Three values were adopted for each of these variables, resulting in 27 combinations of different scenarios for the slope. The stability analysis was conducted from both deterministic and probabilistic perspectives, intending to assign probabilities of failure and reliability indices to the safety factor results. Furthermore, the stability results were evaluated using three different calculation models, each employing different criteria and simplifications in the outcomes. Through the application of the aforementioned analyses, the real influence of each of these parameters on the slope was quantified, with particular emphasis on length and reinforcement strength. Additionally, certain peculiarities were noted in the relationships between vertical spacings and geogrid strengths concerning slope stability. Finally, concerning the different calculation methods, it was observed that greater simplifications in the approaches lead to lower safety factors compared to results from more rigorous methods.

KEYWORDS: Geogrids, Slope, Safety Factor, Reliability index, Probability of failure.

1 INTRODUÇÃO

A análise de taludes é um tema recorrente em diversos projetos de engenharia, especialmente no que diz respeito à garantia de sua estabilidade. O estudo da estabilidade envolve uma avaliação comparativa entre as forças que tendem a desestabilizar o talude (sobrecargas, peso próprio, poropressão, tensão normal etc.) com as forças resistentes do solo (coesão e ângulo de atrito). Quando as forças que favorecem o movimento de massa se igualam ou superam as de resistência, o maciço irá à ruptura; caso contrário, ele permanece em equilíbrio (GERSCOVICH, 2012).

Com o crescimento populacional e os avanços da engenharia, torna-se inevitável a demanda por obras mais robustas e inovadoras. Nesse sentido, surgem diversas medidas mitigadoras para lidar com as instabilidades de taludes, permitindo a implementação de maciços com dimensões ampliadas e inclinações mais acentuadas. Carvalho (1991) apresenta ações mitigadoras recorrentes, como a construção de muros de contenção, obras de drenagem superficial e interna, e o uso de solos reforçados, entre outros. Conforme Ehrlich (2010), o uso de solos reforçados representou uma revolução no conceito geral utilizado em projetos geotécnicos, sendo seu uso difundido a partir da década de 1960. Uma obra em solo reforçado não difere na aparência externa de uma estrutura convencional; sua característica marcante reside na estabilidade interna, permitindo melhores resultados mecânicos ao solo e viabilizando estruturas que antes eram consideradas impraticáveis.

A premissa do uso de solos reforçados reside na interação entre o solo e a inclusão de um reforço específico, como os geossintéticos. Esses materiais são capazes de proporcionar uma redistribuição global de tensões e deformações, aumentando consideravelmente a resistência do maciço. Palmeira (2018) descreve os geossintéticos como produtos fibrosos provenientes de polímeros manufaturados ou naturais, sob a forma de mantas, tiras ou produtos tridimensionais. Há uma vasta gama de produtos geossintéticos, cada um com características adequadas às finalidades requeridas. Segundo Palmeira (2018), os geossintéticos mais comuns em aplicações geotécnicas são: geobarras (usadas para reforço), geotêxteis (com função drenante, de filtragem, reforço, separação e proteção), geogrelhas (de alta resistência à tração), geotiras (usadas para reforço), geocélulas (para controle de erosão), entre outros.

Um dos geossintéticos mais utilizados para aumentar a resistência do maciço de solo são as geogrelhas. Estas possuem altas resistências à tração, baixas deformações e são classificadas conforme o processo de fabricação (TOUZE, 2021). Segundo Ehrlich (2010), as geogrelhas podem ser uniaxiais ou biaxiais, o que implica em diferentes parâmetros de resistência conforme a direção do eixo do rolo (normal ou paralela).

A filosofia das análises tradicionais de estabilidade de taludes baseia-se no Método de Equilíbrio Limite. Este método, amplamente difundido no cenário geotécnico nacional, considera a estrutura do solo como um corpo rígido-plástico à beira do movimento, ou seja, as forças que favorecem o movimento de massa são iguais às forças de resistência da estrutura. Além disso, todo o maciço é dividido em pequenas porções (lamelas), sendo analisado por equações de equilíbrio cada uma dessas partes (MASSAD, 2003).

O uso de abordagens determinísticas permite a obtenção de um Fator de Segurança (FS), o qual é um valor único definido como a razão entre as forças resistentes e as forças cisalhantes. A NBR 11682 (ABNT, 2008) estabelece valores mínimos para o FS com base na avaliação do potencial de risco associado a perdas humanas e materiais, assim como na natureza específica da obra geotécnica. Em situações em que o risco é considerado elevado, a norma estabelece que o FS deve ser no mínimo de 1,50. Ressalta-se que toda essa análise é construída a partir de valores médios dos parâmetros geotécnicos, mas nem sempre esses dados são os mais representativos do comportamento real. Embora a análise determinística seja a mais difundida no cenário nacional, ela transmite uma "falsa segurança" ao projetista, uma vez que não considera chances de erros ou probabilidades de falhas (ASSIS, 2020).

Nesse sentido, surge a necessidade de métodos probabilísticos, os quais buscam um tratamento estatístico nos cálculos. Dentro dessa abordagem, os parâmetros de entrada são tratados como variáveis aleatórias, dentro de um intervalo determinado, com uma probabilidade de ocorrência especificada. Essa abordagem permite uma melhor representação das incertezas existentes, principalmente em relação às diferentes condições da composição do solo, e todas as incertezas inerentes em suas propriedades. Segundo El-Ramly (2001), uma análise probabilística é uma reflexão do nosso conhecimento imperfeito. Como consequência, as análises de estabilidade passam de um valor médio determinado para uma função densidade de probabilidade, dependente de variáveis aleatórias, garantindo maior confiabilidade aos resultados (FALCÃO et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar a estabilidade de um aterro projetado para um empreendimento residencial, com o uso de solo reforçado por geogrelha. Será analisada a influência da geogrelha na estabilidade do maciço, variando as características atreladas ao material, como comprimento, espaçamento vertical e resistência à tração. No total, foram desenvolvidas 27 combinações representando diferentes cenários da estrutura, e foram empregados diversos modelos de cálculo, tanto determinísticos quanto probabilísticos. As análises de estabilidade serão realizadas utilizando o Método do Equilíbrio Limite, com o auxílio do *software Slide 2.0*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição do estudo de caso

Este estudo se concentra na análise de estabilidade de uma estrutura em solo reforçado por geogrelha, localizada no município de Votorantim, no estado de São Paulo. Essa estrutura atua como contenção e serve como base para um empreendimento de um bairro planejado na região. Durante as inspeções técnicas realizadas no local, foi observada a presença de água no terreno, indicando a saturação do solo de fundação.

O talude do aterro reforçado tem 7,0 m de altura, com uma inclinação de 4:1 (vertical: horizontal), e está sujeito a uma sobrecarga de 2 tf/m² sobre seu platô. Uma camada de 2,0 m de aterro no pé do talude funciona como berma de equilíbrio. No entanto, neste trabalho, optou-se por desconsiderar a existência dessa berma, com o objetivo de reduzir a estabilidade do maciço, permitindo uma avaliação mais precisa da influência da variação das características da geogrelha na estabilidade. A investigação do solo local para servir como fundação do aterro foi realizada por meio de sondagens do tipo *Standard Penetration Test* (SPT) até 10 metros de profundidade. Essas sondagens revelaram camadas de areia argilosa medianamente compacta até 8 metros de profundidade, seguidas por camadas de solo residual de silte arenoso compacto. O valor médio do NSPT até 5,0 metros de profundidade foi de 5. Entre 6,0 e 8,0 metros, esse valor aumentou para 12, enquanto que para as camadas finais, o NSPT alcançou valores de 36. Os parâmetros geotécnicos foram obtidos a partir da literatura especializada (JOPPERT JUNIOR, 2007), com base na classificação dos solos mencionados anteriormente.

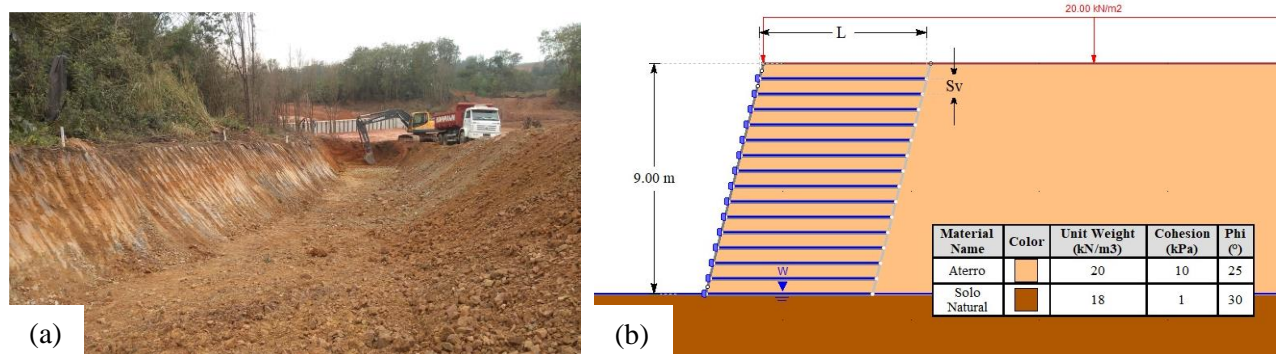


Figura 1. (a) Início da execução do talude. (b) Representação gráfica da geometria do talude e dos parâmetros dos solos presentes no maciço.

2.2 Modelagem numérica

Para realizar os cálculos sobre a estabilidade do maciço, utilizou-se o *software Slide 2.0* como ferramenta auxiliar. Dentro desse programa, o modelo do talude foi construído com base na geometria previamente descrita. Com o objetivo de investigar a influência da geogrelha sobre a estabilidade da estrutura, foram elaborados 21 modelos envolvendo diferentes comprimentos (L) da geogrelha (4,5 m, 6,5 m e 8,5 m), diferentes espaçamentos verticais (Sv) (0,3 m, 0,6 m e 0,9 m) e distintas resistências à tração (35 kN/m, 110 kN/m e 300 kN/m). Os parâmetros das geogrelhas foram obtidos através de catálogos do fabricante *Huesker*, sendo todas pertencentes ao modelo *Fortrac* e implementadas na ferramenta computacional *Slide 2.0*. Ressalta-se que o programa aplica automaticamente alguns fatores de redução sobre os valores de resistência da

geogrelha, resultando numa redução do valor característico de aproximadamente 40%. Além disso, foram atribuídas distribuições normais aos parâmetros do solo, com diferentes desvios padrão (40% para a coesão, 10% para o ângulo de atrito e 3% para o peso específico do solo), valores justificados com base em Becher (2023). Salienta-se que o estudo de caso apresentado foi anteriormente investigado por Becher (2023), onde se avaliou a influência de diferentes níveis de coeficiente de variação nos parâmetros do solo. Entretanto, no estudo em questão, o foco recai sobre a influência de diferentes características da geogrelha (comprimento, espaçamento vertical e resistência) na estabilidade do maciço, não considerando coeficientes de variação sobre esses valores.

Os métodos de cálculo selecionados para determinar os valores dos FS foram o de Spencer (1967), Janbu Corrigido (1954) e Bishop Simplificado (1955). O método de Spencer é reconhecido por sua abordagem rigorosa, uma vez que busca satisfazer todas as equações de equilíbrio e não negligencia as forças interlamelares, utilizando superfícies circulares de ruptura em suas análises. Por outro lado, o Método de Janbu Corrigido permite a adoção de qualquer superfície de ruptura e também satisfaz todas as equações de equilíbrio, embora negligencie as forças entre as lamelas. Já o Método de Bishop Simplificado considera apenas rupturas circulares e simplifica o cálculo ao não levar em conta a resultante vertical das forças entre as fatias, tornando-o mais simplista em comparação com os demais (GERSCOVICH, 2016).

Quanto à análise probabilística, optou-se pela abordagem de simulação de Monte Carlo. Esta técnica estatística é utilizada para avaliar o comportamento de sistemas sujeitos a incertezas, em situações em que não é viável obter uma solução única direta. Em suma, essa simulação gera múltiplas amostras aleatórias dos parâmetros de entrada, baseadas em distribuições de probabilidade e desvios padrão predefinidos. Assim, diversas simulações são realizadas, e a cada execução do modelo, os valores dos parâmetros são selecionados aleatoriamente. Ao repetir esse processo milhares de vezes, obtém-se resultados na forma de uma distribuição de probabilidade dos fatores de segurança, permitindo a atribuição de probabilidades de falha (PF) e índices de confiabilidade (β). No modelo em estudo, optou-se por adotar 4500 iterações para cada cálculo, observando que para esse número, a variação entre os valores de FS cessava. O *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1997) possui uma classificação própria para o β e a PF, sendo estabelecido critérios de desempenho de estruturas para diferentes faixas desses valores.

3 RESULTADOS

Inicialmente, os valores de FS do maciço foram avaliados utilizando os três métodos selecionados pela abordagem determinística: Spencer (S), Bishop Simplificado (B.S.) e Janbu Corrigido (J.C.). Os valores dos FS obtidos por esses métodos para todas as diferentes análises executadas estão resumidos na Figura 2. De forma geral, observa-se um aumento significativo no FS à medida que ocorre o incremento no comprimento da geogrelha. Além disso, a influência da resistência da geogrelha nos resultados é notável, uma vez que resistências maiores resultaram em maiores FS. Em relação aos métodos de análise, as abordagens de Spencer resultaram, em sua maioria, em FS superiores às demais metodologias. Das 27 diferentes combinações sobre a estrutura da contenção, apenas em uma (geogrelha de 300 kN/m, $L=4,5$ m e $S_v=0,9$ m) o método de Spencer não produziu os maiores FS, nos quais o Método de Bishop Simplificado obteve um resultado ligeiramente superior, 1,21 e 1,22, respectivamente. Por outro lado, os resultados das menores estabilidades foram em sua totalidade atribuídos à abordagem de Janbu Corrigido. O maior valor de FS obtido ($FS=1,46$) ocorreu com o método de Spencer, utilizando a geogrelha mais resistente (300 kN/m), com as condições de $L=8,5$ m e $S_v=0,9$ m, enquanto o menor FS encontrado ($FS=0,97$) ocorreu com o método de Janbu Corrigido, utilizando a geogrelha de 35 kN/m, $L=4,5$ m e $S_v=0,9$ m.

O comportamento do FS em relação aos diferentes métodos abordados pode ser explicado pela maneira como cada um considera as variáveis envolvidas nos cálculos, especialmente quanto às simplificações adotadas. O método de Spencer se destaca por sua abordagem mais rigorosa, realizando menores simplificações em comparação com os outros métodos, como a consideração das forças interlamelares. Devido a essa precisão maior, os resultados dos FS tendem a ser maiores em comparação com os outros métodos e, estima-se que mais fidedignos ao comportamento real do maciço. Por outro lado, os métodos de Bishop Simplificado e Janbu Corrigido apresentam simplificações mais pronunciadas, o que resulta em valores de FS menores. Além disso, é importante ressaltar que o método de Janbu Corrigido é recomendado para solos homogêneos. No entanto, o maciço em questão consistia em um solo reforçado com geogrelha, onde havia a presença de dois tipos de solos distintos (um referente ao solo de fundação e outro ao aterro).

Essa discrepância pode ser atribuída à observação dos valores inferiores de FS para o método de Janbu Corrigido. Sua aplicação em um maciço com solos heterogêneos pode não capturar adequadamente as interações complexas entre os diferentes tipos de solo e as características da geogrelha. Isso ressalta a importância de selecionar o método de análise mais apropriado de acordo com as características específicas do maciço e as condições do solo. Escolher o método adequado não só garante resultados mais precisos, mas também oferece uma compreensão mais completa da estabilidade do talude reforçado com geogrelhas.

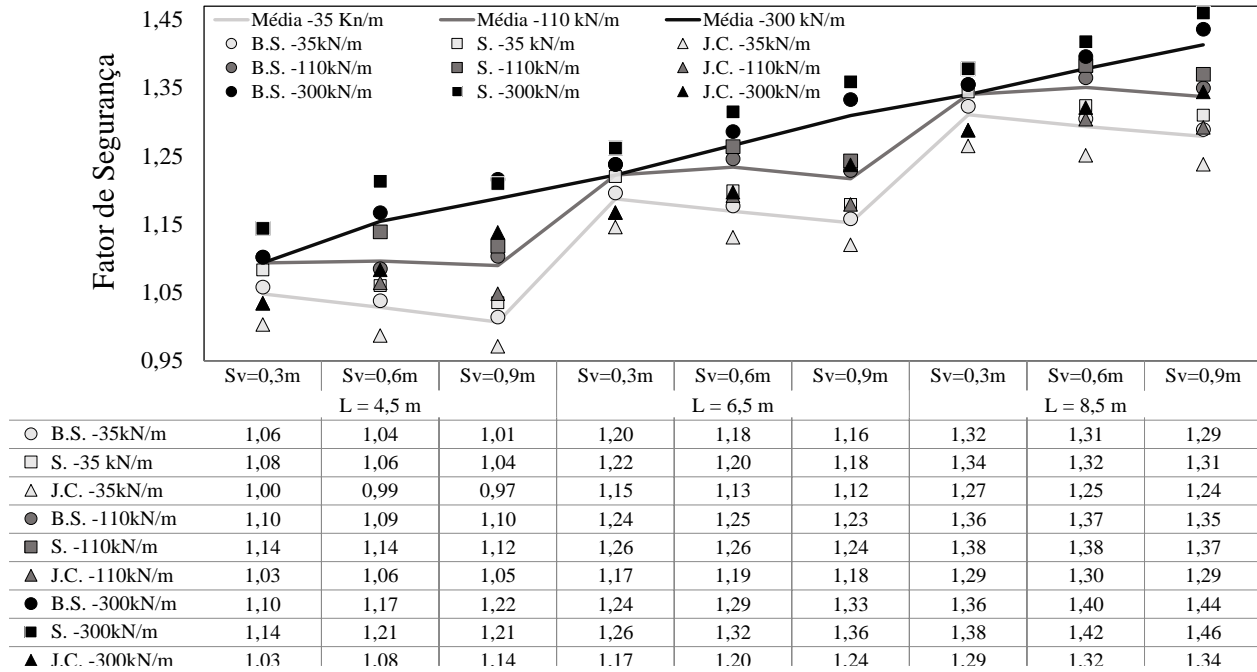


Figura 2. Compilado dos resultados da análise determinística para os três métodos abordados.

Com relação às abordagens probabilísticas utilizando a Simulação de Monte Carlo, foram conduzidas análises sobre as 27 combinações do talude, resultando em valores de FS probabilísticos, probabilidades de falha (PF) e índices de confiabilidade (β), os quais foram classificados conforme os critérios estabelecidos pelo USASCE (1997). A Figura 3 apresenta um compilado dos valores de β obtidos nas análises realizadas, juntamente com os intervalos de desempenho utilizados.

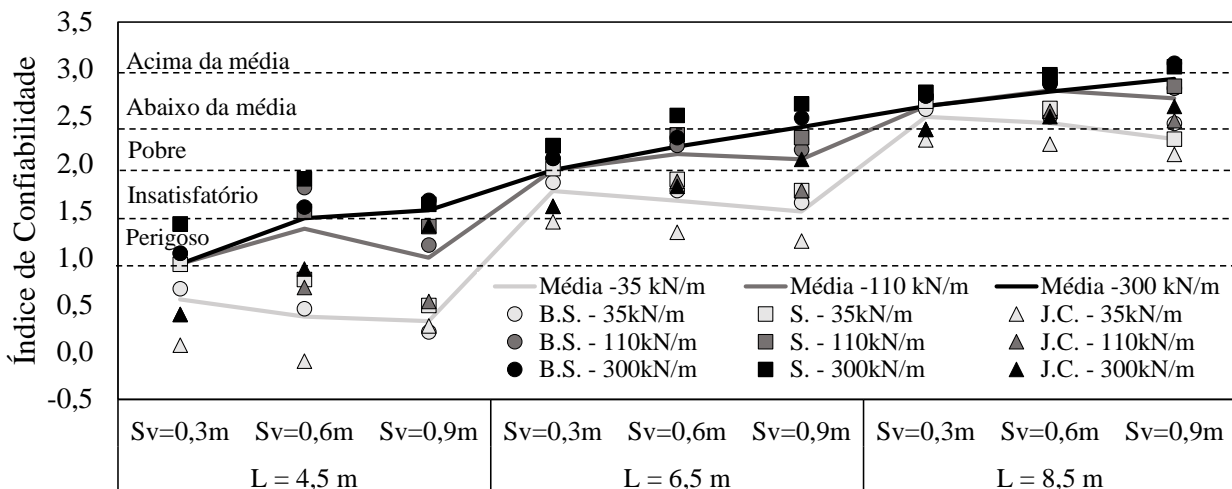


Figura 3. Resultados dos Índices de Confiabilidade das combinações das variáveis sobre a geogrelha.

Assim como na Figura 2, observa-se um aumento do β à medida que o comprimento da geogrelha é aumentado e conforme são realizadas análises com maiores valores de resistências. O aumento do

comprimento do reforço implica em maiores valores de β , justifica-se tal fato com base que maiores comprimentos resultarão uma “costura” da cunha instável com o maciço terroso mais eficiente. Em relação às análises com comprimento $L=4,5$ m, foram obtidos 21 índices de confiabilidade considerados Perigoso ($\beta < 1,5$) e 6 considerados Insatisfatório ($1,5 < \beta < 2,0$), segundo a classificação da USASCE (1997). Todos os resultados envolvendo a geogrelha de 35 kN/m estão no intervalo de pior desempenho segundo os níveis abordados pela USASCE (1997). Nas análises com $L=6,5$ m, apenas 3 resultados foram classificados como Perigosos, destacando-se que os três são provenientes do Método de Janbu Corrigido. Além disso, 10 resultados foram considerados Insatisfatórios, 11 no intervalo classificado como Pobre ($2,0 < \beta < 2,5$) e 3 no intervalo Abaixo da Média ($2,5 < \beta < 3,0$), sendo estes últimos associados à geogrelha de 300 kN/m nos dois maiores espaçamentos verticais. Por fim, nas abordagens utilizando o comprimento $L=8,5$ m, os valores situaram-se nos intervalos Pobre (10 resultados), Abaixo da Média (15 resultados) e Acima da Média (2 resultados), este último intervalo compreendendo β entre 3,0 e 4,0. Os dois melhores resultados foram obtidos com o uso da geogrelha de 300 kN/m, com $L=8,5$ m e espaçamento vertical de 0,9 m, para os métodos de Spencer e Bishop Simplificado.

Dentro das diferentes variações da geogrelha nas análises de estabilidade, o fator que mais se destacou na influência sobre os resultados é o comprimento do reforço. Maiores comprimentos resultaram em índices de confiabilidade de maior magnitude. Outro aspecto relevante é a resistência à tração da geogrelha. Para o menor espaçamento ($S_v=0,3$ m), a variação deste tem pouco impacto nos resultados. No entanto, nas combinações com o maior espaçamento ($S_v=0,9$ m), é perceptível a variação do índice de confiabilidade de forma proporcional à resistência do material. Essa observação é justificável, pois à medida que o espaçamento entre os reforços aumenta, cada uma das geogrelhas é solicitada de forma mais intensa dentro do maciço, mobilizando a sua capacidade de resistência e a distribuição de esforços internos no talude. O espaçamento entre os reforços e a tensão atuante são grandezas dependentes, uma vez que a tensão de tração nos reforços é produto da tensão horizontal e do espaçamento entre eles. Para as geogrelhas de maior resistência, quando são mais solicitadas, estas garantem maiores valores de FS e de β ao melhor distribuir os esforços, em contraste com o comportamento das geogrelhas de menor resistência. Nas análises envolvendo o menor espaçamento, a resistência da geogrelha não interfere de maneira substancial, pois estas estarão pouco solicitadas em comparação com sua real capacidade, devido à presença da grande quantidade de reforço não mobilizado dentro do maciço.

Para uma melhor compreensão da influência das variáveis da geogrelha sobre a estabilidade do maciço, a Figura 4 foi elaborada. Nela, foram realizadas comparações entre as variações dos FS. Foram analisadas as variações do comprimento, do espaçamento e da resistência das geogrelhas. Para realizar a comparação, optou-se por utilizar como referência o valor intermediário de cada parâmetro ($L=6,5$ m, $S_v=0,6$ m e resistência de 110 kN/m). As porcentagens encontradas referem-se tanto aos valores mínimos quanto aos valores máximos em cada uma dessas variáveis. Ressalta-se que essas comparações foram realizadas entre combinações que possuíam todos os aspectos iguais, com exceção da única variável específica em análise.

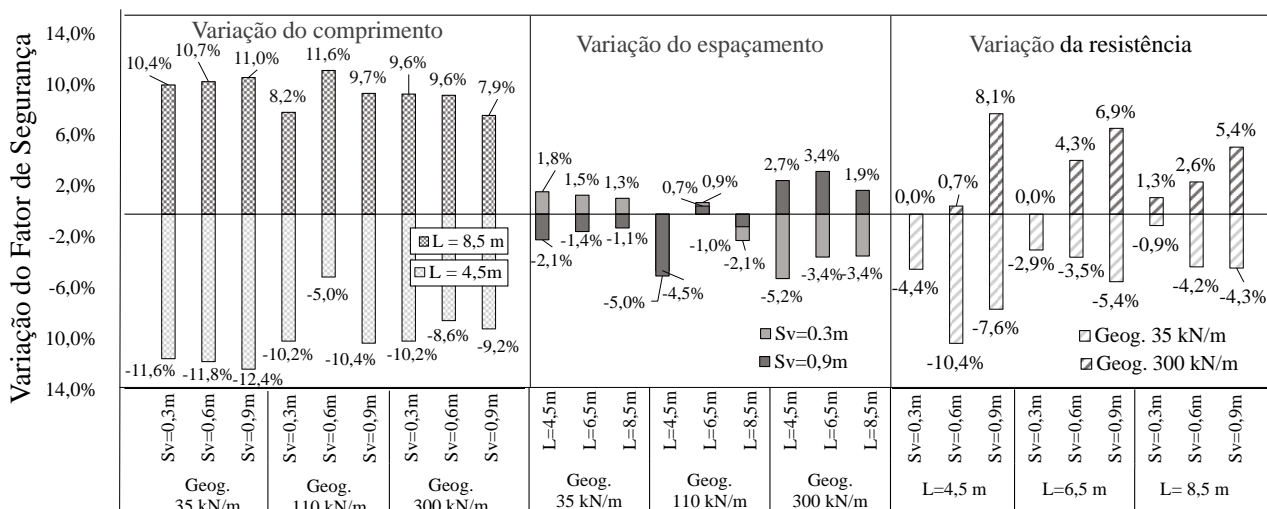


Figura 4. Variações do FS em função das variáveis da geogrelha.

A variação dos valores de FS atingiu valores próximos a 12%, tanto em acréscimos como em decréscimos, quando foi analisada a variação do comprimento das geogrelhas. Também foram observadas diferenças significativas nos resultados ao alterar a resistência do reforço, especialmente em maiores espaçamentos verticais do mesmo.

No entanto, nota-se uma influência menos marcante do espaçamento vertical das geogrelhas. Na geogrelha de 35 kN/m, o aumento do espaçamento foi inversamente proporcional à estabilidade do maciço, especialmente para as geogrelhas com menores comprimentos, pois o acréscimo do espaçamento concomita com maiores solicitações ao reforço. Por outro lado, para a geogrelha de maior resistência, essa relação foi proporcional, embora sem um padrão claro em relação aos diferentes comprimentos da geogrelha. Esse fato também foi observado na geogrelha com resistência à tração de 110 kN/m, onde não se nota uma regularidade nos resultados.

Em resumo, o arranjo dos geossintéticos emerge como um fator de vulnerabilidade geotécnica, pois a variação do espaçamento e do comprimento pode resultar em uma diminuição do β e, conseqüentemente, em um aumento na probabilidade de falha. Além disso, todos os valores de FS foram inferiores a 1,50, considerado um limite adequado pela NBR 11682 (ABNT, 2009), indicando um alto risco para a segurança ambiental e humana. No entanto, é importante ressaltar que os valores de FS devem ser interpretados com cautela, uma vez que, apesar de estarem abaixo do recomendado pela norma, os valores de β são considerados acima da média, como no caso da utilização dos maiores valores de Sv, L e resistência.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores determinísticos do FS revelaram um amplo espectro de resultados, variando de 0,97 a 1,46. Essas variações foram influenciadas tanto pela avaliação das diferentes variáveis da geogrelha quanto pelos diferentes métodos de cálculo (Spencer, Bishop Simplificado e Janbu Corrigido). Incrementos na resistência da geogrelha e no comprimento do reforço resultaram em maiores valores de FS, destacando o papel crucial da geogrelha como material de reforço no maciço, proporcionando uma melhor distribuição das tensões. Portanto, quanto maior a capacidade de resistência à tração da geogrelha e quanto mais extensas as porções do maciço que recebem as camadas de reforço, maior será sua estabilidade.

Nas análises probabilísticas, foram observados padrões muito semelhantes com as análises determinísticas. Os índices de confiabilidade diminuíram quando foram utilizados menores comprimentos e menores resistências de geogrelhas nas combinações construídas. Os resultados variaram dentro de faixas de comportamento classificadas como Perigoso (intervalo que compreende os valores mínimos de índices de confiabilidade) até Acima da Média.

Ao analisar proporcionalmente as variações dos resultados, foram encontrados comportamentos que confirmam a influência predominante do comprimento da geogrelha, seguido pela variação de sua resistência. O aumento do comprimento da geogrelha é diretamente proporcional à capacidade da mesma, uma vez que esta tem seu parâmetro mensurado por metro linear. Um dos resultados que merecem uma análise mais aprofundada é a influência do espaçamento das geogrelhas. Não se observou um padrão único, devido a dependência da tipologia da geogrelha. Ao aumentar o espaçamento vertical de reforços, conseqüentemente, ocorrem maiores tensões nas geogrelhas, pois o volume de solo que solicitará cada uma dessas é maior. Assim, com solicitação mais intensas sobre a geogrelha, desde que essa solicitação seja inferior à sua resistência, o maciço estará em um estado de melhor distribuição de tensões, pois o reforço está sendo mobilizado, otimizando o seu desempenho, tendo como resultados maiores FS. Essa mesma lógica se aplica quando há uma redução no espaçamento vertical do reforço, pois esses estarão menos solicitados, não promovendo uma adequada distribuição de esforços dentro do maciço, contribuindo para um projeto mal otimizado e dimensionado.

Por fim, destaca-se ainda a influência dos diferentes modelos de cálculo. Os três modelos escolhidos para este trabalho possuem abordagens diferentes, especialmente em relação às simplificações adotadas durante os processos de cálculo. Abordagens menos rigorosas tendem a se afastar dos valores reais de FS do maciço, resultando em FS menores que as demais abordagens. Esse fato foi observado ao analisar os resultados provenientes dos métodos de Janbu Corrigido e Bishop Simplificado, que desconsideram as forças interlamelares, em contraste com o método de Spencer, que as considera, apresentando valores de FS superiores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e a UFSM pelo incentivo e fomento as pesquisas realizadas. Também agradecem a *Owntec Soluções em Engenharia* pelo apoio tecnológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Assis, A. P. (2020). Risk management for geotechnical structures: consolidating theory onto practice. *Soils and Rocks* 43 (3), p. 311-336.
- Becher, D. et al (2023). Análise de Estabilidade Determinística e Probabilística de uma Estrutura de Contenção em Solo Reforçado por Geotêxtil. In: Congresso Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos 9, *Anais... ABMS*. v. 2, p. 244 – 251.
- Carvalho, P. A. S. de (1991). Manual de Geotecnia: taludes de rodovias – orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. *Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)*, publicação IP, n. 1843.
- Ehrlich, M. (2010). *Reinforced soil wall and slopes: design and construction*. São Paulo. Oficina de Textos.
- El-Ramly, H. (2001). *Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice*. Tese de Doutorado. Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering. Canada, 391 p.
- Falcão, P. R., Fagundes, D. de F., Alves, A. M. de Lima (2020). Análise Probabilística de aterros sobre solos moles. *Vetor*, Rio Grande, v. 30, n° 1, p.38-48.
- Gescovich, D.M.S. (2016) *Estabilidade de Taludes*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Joppert Junior, I. (2007) *Fundamentos e Contensões em edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução*, 1 ed., Pini, São Paulo, 221 p.
- Massad, F. (2003) *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos
- Palmeira, E. M. (2018). *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. São Paulo. Oficina de Textos.
- Touze, N. (2021). Healing the world: a geosynthetics solution. *Geosynthetics International*, v. 28, n° 1, 1-31.
- U. S Army Corps Engineers (1997). *Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*. Department of the Army, Washington, United States.