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/COBRAMSEG2026.4/9

Análise da Influência da Geometria, Tipo de Solo, Sobrecarga e Inclinação dos Grampos na Estabilidade de Taludes

Letícia Fantin Pinheiro
Engenheira Civil, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, leticiafantinn@gmail.com

Morgana Moreschi
Professora, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, morgana.moreschi@ifes.edu.br

Fábio Uliana de Oliveira
Professor, Instituto Federal do Espírito Santo - Vitória, Brasil, ulianaf@ifes.edu.br

Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi
Professora, Instituto Federal do Espírito Santo - Vitória, Brasil, borjaille@ifes.edu.br

RESUMO: A estabilidade de taludes é um tema de grande relevância na Geotecnia, especialmente em cenários caracterizados por geometrias inclinadas, diferentes condições de solo e aplicação de sobrecargas. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a influência da geometria, do tipo de solo, da sobrecarga e da inclinação dos grampos na estabilidade de taludes. A metodologia baseou-se em modelagens computacionais no *software* GeoStudio Slope/W 2025, utilizando o método de Morgenstern & Price para determinação do fator de segurança (FS). Foram avaliadas três geometrias distintas, considerando parâmetros para argila e areia, com aplicação de sobrecarga de 20 kPa conforme a NBR 11682:2009 e também sem sua consideração. Na condição sem grampo, conforme incremento da inclinação do talude, o FS variou, para a argila, de 1,123 a 0,825 e, para a areia, de 0,949 a 0,618, evidenciando a influência direta da geometria. A retirada da sobrecarga elevou o FS da argila em até 15,6%, enquanto na areia a variação foi inferior a 1%. Com a aplicação do solo grampeado, observaram-se incrementos expressivos para o FS, com aumentos de até 53,82% para a argila e 119,57% para a areia. A variação da inclinação dos grampos entre 10° e 30° resultou em acréscimos máximos do FS de 2,36% na argila e 2,69% na areia, indicando influência secundária quando comparada à geometria. Conclui-se que a estabilidade é fortemente condicionada à geometria e a tipologia do solo, sendo o solo grampeado uma técnica eficiente para elevação do fator de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade, Solo Reforçado, Grampo, SLOPE/W.

ABSTRACT: Slope stability is a topic of great relevance in Geotechnical Engineering, especially in scenarios characterized by inclined geometries, varying soil conditions, and the application of surcharges. In this context, this study aimed to analyze the influence of geometry, soil type, surcharge, and nail inclination on slope stability. The methodology was based on computational modeling using the GeoStudio Slope/W 2025 software, applying the Morgenstern & Price method to determine the factor of safety (FS). Three distinct geometries were evaluated, considering parameters for clay and sand, with the application of a 20 kPa surcharge in accordance with NBR 11682:2009, as well as cases without surcharge. Under the unreinforced condition, as the slope inclination increased, the FS varied for clay from 1.123 to 0.825 and for sand from 0.949 to 0.618, highlighting the direct influence of geometry. The removal of the surcharge increased the FS of the clay by up to 15.6%, while for sand the variation was less than 1%. With the application of soil nailing, significant increases in FS were observed, reaching up to 53.82% for clay and 119.57% for sand. Variations in nail inclination between 10° and 30° resulted in maximum FS increases of 2.36% for clay and 2.69% for sand, indicating a secondary influence when compared to geometry. It is

concluded that slope stability is strongly conditioned by geometry and soil type, and that soil nailing is an efficient technique for increasing the factor of safety.

KEYWORDS: SLOPE/W, Stability, Reinforced Soil, Nail, SLOPE/W.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano em áreas com topografia acentuada tem intensificado a necessidade de soluções técnicas que garantam estabilidade e segurança em taludes naturais e escavados. No contexto brasileiro, marcado por ocupação desordenada e elevados índices pluviométricos sazonais, a análise de estabilidade torna-se etapa indispensável em projetos geotécnicos.

A estabilidade de taludes depende da interação entre geometria, parâmetros de resistência do solo, condições de carregamento e presença de água. Conforme estabelece a NBR 11682 (ABNT, 2009), a verificação da segurança deve considerar fatores mínimos compatíveis com o nível de risco envolvido, bem como a inclusão de sobrecargas representativas das condições reais de uso. A negligência desses aspectos pode conduzir a avaliações superestimadas do fator de segurança.

Entre as técnicas de contenção empregadas para aumento da estabilidade, destaca-se o solo grampeado, solução amplamente difundida desde a década de 1970 e caracterizada pela inserção de elementos resistentes no interior do maciço, promovendo incremento da resistência ao cisalhamento. O desempenho do sistema está diretamente relacionado às propriedades do solo, à geometria do talude e a parâmetros executivos, como comprimento, espaçamento e inclinação dos grampos.

Embora a eficiência do solo grampeado seja reconhecida, a influência relativa de variáveis como geometria, tipo de solo, sobrecarga e inclinação dos grampos no fator de segurança ainda demanda análises comparativas que permitam compreender a influência de cada parâmetro no comportamento global do sistema.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da geometria, do tipo de solo, da sobrecarga e da inclinação dos grampos na estabilidade de taludes, por meio de modelagens computacionais, avaliando o comportamento do fator de segurança em cenários com e sem grampos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Geometria dos Taludes

Foram analisadas três geometrias distintas de taludes, denominadas T1, T2 e T3, representando diferentes inclinações e, consequentemente, diferentes condições de estabilidade. As geometrias foram definidas mantendo-se a mesma altura e variando-se a inclinação do talude, conforme exemplificado na Tabela 1, permitindo avaliar a influência direta da geometria no fator de segurança.

Tabela 1. Tipologias de taludes para o estudo.

Tipologia	Altura (m)	Ângulo (°)	Proporção
Tipo 01		45	1H:1V
Tipo 02	5	56	1H:1,5V
Tipo 03		63	1H:2V

2.2 Parâmetros Geotécnicos e Condições de Carregamento

Foram adotadas duas tipologias de solo, argila e areia, com o objetivo de avaliar a influência da coesão e do ângulo de atrito interno no fator de segurança, parâmetros apontados na literatura como determinantes na estabilidade de taludes.

Para a argila, adotou-se um intercepto coesivo (c') de 7 kPa, valor compatível com a faixa de 0 a 25 kPa apresentada por Coduto (2001). Para a areia, considerou-se c' nulo, devido ao seu comportamento essencialmente friccional. Os ângulos de atrito interno (φ') seguiram as faixas indicadas por Terzaghi *et al.* (1996), adotando-se φ' = 25° para a argila e φ' = 40° para a areia, conforme apresentado na Tabela 2. O modelo resistente utilizado foi o critério de Mohr-Coulomb.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos adotados nas modelagens.

Solo	c' (kPa)	φ' (°)	γ (kN/m³)
Argila	25	20	18
Areia	0	30	17

A sobrecarga superficial uniforme de 20 kPa foi aplicada na primeira etapa das análises, conforme recomendação da NBR 11682 (ABNT, 2009) para verificação da estabilidade global. Posteriormente, os mesmos modelos foram reavaliados sem a aplicação da sobrecarga, permitindo quantificar sua influência no fator de segurança.

2.3 Modelagem Numérica

As análises foram realizadas no software GeoStudio Slope/W 2025, utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern & Price, que satisfaz simultaneamente as condições de equilíbrio de forças e momentos. O fator de segurança foi estimado pela razão entre esforços resistentes e solicitantes ao longo da superfície crítica de ruptura, definida automaticamente pelo programa por meio da busca da condição mais desfavorável.

2.4 Modelagem do Solo Grampeado

Após a análise da estabilidade dos taludes sem reforço, procedeu-se à inserção de grampos com o objetivo de avaliar a influência da técnica de solo grampeado e da inclinação de instalação no fator de segurança.

O comprimento dos grampos foi definido com base na relação comprimento/altura (L/H). Conforme Elahi *et al.* (2022), o comprimento ótimo corresponde a aproximadamente 90% da altura do talude, acima disso o FS pode reduzir. Considerando altura de 5,0 m para todas as tipologias analisadas, adotou-se comprimento de 4,5 m.

Os espaçamentos horizontal (Sh) e vertical (Sv) foram definidos com base nos intervalos recomendados por Alsubal *et al.* (2017) e Elahi *et al.* (2022), que indicam valores entre 1,0 m e 2,0 m adequados. Assim, adotou-se Sh = 2,0 m e Sv = 2,0 m.

A inclinação dos grampos foi variada entre 10°, 15°, 20°, 25° e 30°, considerando que o ângulo ótimo depende da superfície potencial de ruptura. Ramteke *et al.* (2024) indicam 15° como valor inicial adequado para estudos paramétricos, sendo esse intervalo utilizado para avaliar a sensibilidade do fator de segurança à variação da angulação. A resistência ao arrancamento (qs) adotada foi de 80 kPa, correspondente a valor médio apresentado na literatura de Pereira (2014).

2.4 Critério Normativo de Avaliação

A estabilidade foi avaliada com base no fator de segurança global obtido em cada cenário. Os resultados foram comparados ao valor mínimo de FS = 1,4 estabelecido pela NBR 11682 (ABNT, 2009) para taludes permanentes em condições usuais de projeto, verificando-se o atendimento ou não ao critério normativo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados contempla o estudo da influência de diferentes parâmetros geométricos, geotécnicos, sobrecarga e executivos sobre o fator de segurança quanto à estabilidade.

3.1 Taludes sem reforço

A análise dos taludes sem reforço evidenciou redução sistemática do fator de segurança com o aumento da inclinação, independentemente do tipo de solo. Para a argila, ao comparar as tipologias T1-C, T2-C e T3-C, o FS reduziu de 1,123 para 0,825, correspondendo a uma diminuição de 26,5%. Para a areia, a variação foi ainda mais expressiva, passando de 0,949 para 0,618, o que representa redução de 34,8%. Esse comportamento está em conformidade com Shiferaw (2021), que demonstra que o aumento do ângulo do talude implica redução do fator de segurança devido ao acréscimo das tensões cisalhantes mobilizadas ao longo da superfície potencial de ruptura.

Quanto ao estado de equilíbrio, adotando-se FS ≥ 1 como condição limite, apenas o modelo T1-C em argila apresentou valor superior à unidade (FS = 1,12). Nenhuma das tipologias em areia atingiu esse patamar. Ainda assim, o valor obtido para T1-C permanece inferior ao fator de segurança mínimo de 1,4 adotado nesta pesquisa para fins de projeto, indicando que mesmo esse cenário se encontra em condição de segurança insuficiente. Nos demais casos, os valores inferiores a 1,0 caracterizam situação de instabilidade iminente, demandando intervenção para garantir a estabilidade global, conforme discutido por Gerscovich (2015).

O comportamento observado está diretamente relacionado aos parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados. Para a argila, utilizou-se φ' = 25°, enquanto para a areia φ' = 40°. Apesar de a areia apresentar maior ângulo de atrito interno, todas as tipologias analisadas possuem inclinações elevadas em relação aos parâmetros resistentes do solo, o que favorece a mobilização de tensões cisalhantes próximas ou superiores à resistência disponível. Conforme apontado por Kokutse *et al.* (2016), quando a inclinação do talude se aproxima ou supera a capacidade resistente do solo, ocorre redução significativa do fator de segurança.

A Figura 1 sintetiza esse comportamento, evidenciando tendência clara de redução do FS com o aumento da inclinação. Os resultados confirmam que a geometria do talude e os tipos de solos atuam de forma combinada na definição da estabilidade global, sendo determinantes para a condição de segurança do maciço.

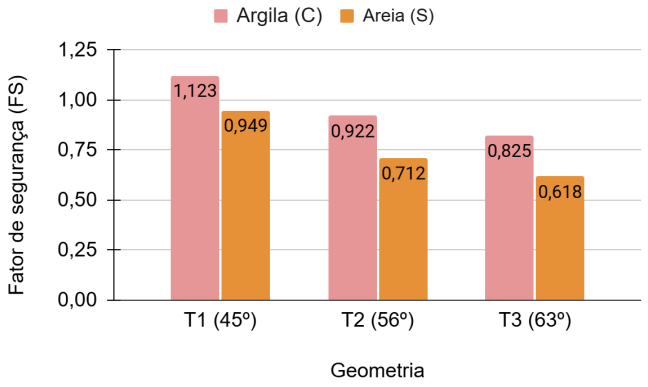


Figura 1. Fatores de segurança obtidos Geometria x Tipos de solo.

A consideração da sobrecarga superficial de 20 kPa na crista do talude resultou em redução do fator de segurança em todos os cenários analisados, conforme Figura 2 e Figura 3. Para o solo argiloso, a diminuição atingiu até 0,153 unidades, correspondendo a redução máxima de 15,6%. Já para o solo arenoso, a variação foi menos expressiva, com redução de até 5%.

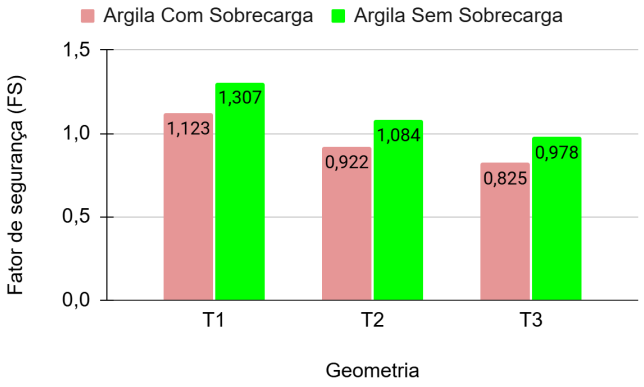


Figura 2. Fatores de segurança obtidos com e sem sobrecarga para tipologias de talude com solo argiloso.

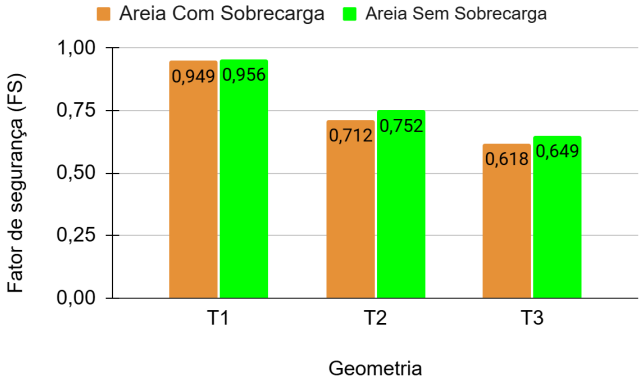


Figura 3. Fatores de segurança obtidos com e sem sobrecarga para tipologias de talude com solo arenoso.

A queda do FS ocorre em função do aumento das tensões cisalhantes mobilizadas no maciço, uma vez que a sobrecarga adiciona peso na zona ativa do talude, alterando o estado de equilíbrio global, conforme discutido por Guidicini *et al.* (2008), Gerscovich (2015) e Zhuang *et al.* (2024). Esse comportamento é amplamente reconhecido na literatura como consequência direta da aplicação de carregamentos externos na crista do talude (Jelani *et al.*, 2021).

Observou-se maior sensibilidade do solo argiloso à variação de carga. Essa diferença está associada ao critério de resistência ao cisalhamento adotado. Como a resistência é função do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno, solos com maior φ' apresentam incremento mais significativo de resistência com o aumento da tensão normal, conforme exemplificado no Figura 4.

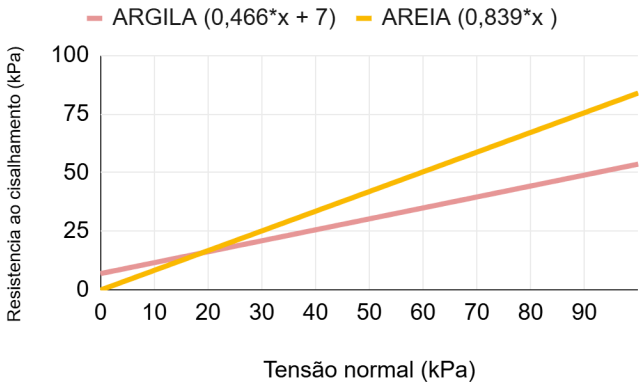


Figura 4. Envoltória de ruptura da areia x argila.

Assim, na areia, cujo ângulo de atrito é superior ao da argila, o acréscimo de tensão normal provocado pela sobrecarga gera também aumento relevante da resistência ao cisalhamento, compensando parcialmente o acréscimo das tensões solicitantes. Como consequência, o FS sofre menor variação.

No solo argiloso, por apresentar ângulo de atrito mais reduzido, o ganho de resistência decorrente do aumento da tensão normal é menos significativo, tornando o fator de segurança mais sensível à aplicação da sobrecarga. Esse comportamento é coerente com o modelo de resistência de Mohr-Coulomb e com as discussões clássicas apresentadas por Terzaghi *et al.* (1996), Guidicini *et al.* (2008) e Gerscovich (2015).

Os resultados confirmam que a presença de sobrecarga na crista do talude constitui variável determinante na estabilidade global, devendo ser considerada nas análises de projeto.

3.2 Taludes com solo grampeado

O estudo quanto a influência da angulação dos grampos no FS de um talude, deu-se pela inserção de grampos em 5 ângulos diferentes tanto em solo argiloso quanto arenoso, considerando todas as tipologias de talude.

A inserção dos grampos promoveu aumento do fator de segurança em todas as tipologias analisadas, tanto para argila quanto para areia. Para os taludes argilosos, conforme Figura 5, os incrementos absolutos foram de 0,487 (43,36%) para T1-C, 0,470 (50,97%) para T2-C e 0,444 (53,82%) para T3-C. Observa-se, portanto, ganho mínimo de 43,36% com grampo, resultado coerente com Pereira (2015), que destaca a eficiência da técnica de solo grampeado na elevação significativa do FS.

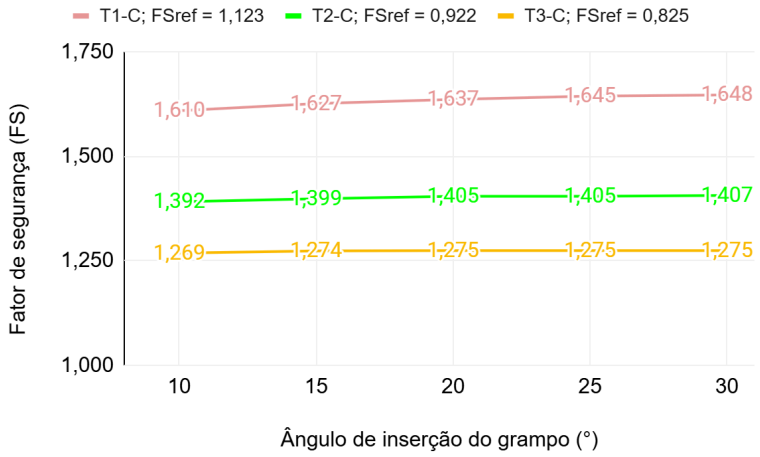


Figura 5. Fatores de segurança variando ângulo de instalação do grampo - solo argiloso.

Entretanto, mesmo com o reforço, verificou-se redução do FS à medida que a geometria se torna mais inclinada. Mantendo o mesmo ângulo de instalação dos grampos, o FS diminuiu de 1,610 para 1,269, correspondendo a redução de 21,18%. Esse comportamento confirma que taludes mais verticalizados apresentam menor ganho de estabilidade, pois a eficiência do grampo depende da sua adequada interceptação da superfície de ruptura, conforme discutido por Elahi *et al.* (2022). Em geometrias mais íngremes, a superfície potencial tende a se tornar mais superficial e inclinada, reduzindo a zona efetivamente reforçada e limitando a transferência de tensões entre as regiões ativa e passiva.

Quanto à influência da angulação dos grampos em argila, observou-se aumento discreto do FS com o acréscimo do ângulo de instalação. Para T1-C, o incremento foi de 0,038 (2,36%), para T2-C de 0,015 (1,1%) e para T3-C de 0,006 (0,5%). Os resultados indicam que geometrias mais suaves respondem melhor à variação da inclinação, enquanto taludes mais íngremes apresentam sensibilidade reduzida. Para esta pesquisa, os ângulos ótimos identificados foram 30° para T1-C e T2-C, e 20° para T3-C, corroborando a literatura que aponta a existência de um ângulo ótimo dependente da geometria do talude (Pereira, 2015; Elahi *et al.,* 2022).

Para os taludes em areia, os ganhos de estabilidade foram ainda mais expressivos, conforme Figura 6 abaixo.

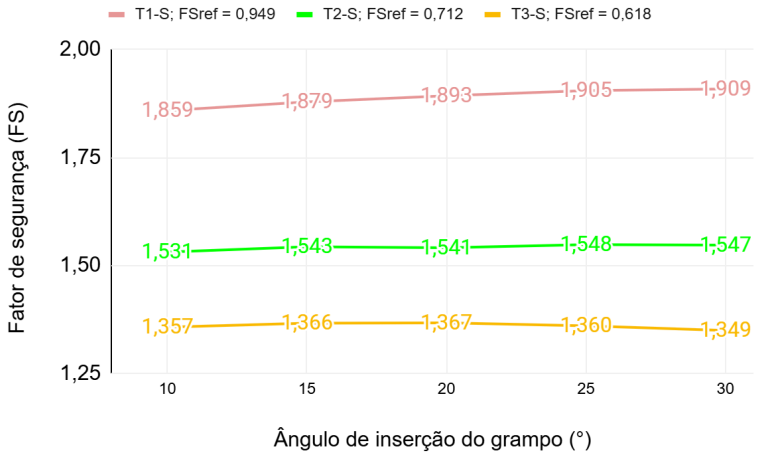


Figura 6. Fatores de segurança variando ângulo de instalação do grampo - solo arenoso.

Os aumentos absolutos foram de 0,910 (95,89%) para T1-S, 0,819 (115,02%) para T2-S e 0,739 (119,57%) para T3-S. A redução do FS com o aumento da inclinação também foi observada, passando de 1,859 em T1-S para 1,357 em T3-S, correspondendo à diminuição de 27%. Esses resultados reforçam que, embora o grampo seja altamente eficaz, a geometria permanece como fator determinante no comportamento global.

Em relação à variação da angulação dos grampos em areia, verificou-se comportamento não linear. Para T1-S, o aumento do ângulo resultou em acréscimo de 0,050 (2,69%). Já para T2-S e T3-S, observou-se incremento até determinado ângulo e posterior redução do FS, evidenciando a existência de um ponto ótimo. Os ângulos que proporcionaram melhor desempenho foram 30° para T1-S, 25° para T2-S e 20° para T3-S. Esse comportamento confirma que, após determinado valor, aumentos adicionais na inclinação não resultam em ganhos significativos e podem reduzir a eficiência dos grampos, conforme discutido por Pereira (2015) e Elahi *et al.* (2022).

De modo geral, os resultados demonstram que o solo grampeado é eficaz no aumento da estabilidade, porém sua eficiência depende diretamente da interação entre geometria do talude, superfície potencial de ruptura e ângulo de instalação dos grampos, reforçando a necessidade de análise específica para cada condição de projeto.

3 CONCLUSÃO

A análise demonstrou que a estabilidade dos taludes é fortemente condicionada pela geometria, pelos tipos de solo e pela presença de sobrecarga, sendo a inclinação do talude o fator mais determinante na variação do fator de segurança (FS). Nos cenários sem reforço, o aumento da inclinação do talude reduziu expressivamente o FS: de 1,123 para 0,825 na argila (–26,5%) e de 0,949 para 0,618 na areia (–34,8%), confirmando a menor estabilidade em geometrias mais íngremes. A aplicação da sobrecarga de 20 kPa também se mostrou relevante, especialmente no solo argiloso, onde a redução chegou a 15,6%, enquanto no solo arenoso foi pouco significativo. Ainda assim, nenhum caso sem reforço atingiu o FS mínimo recomendado pela NBR 11682 (2009).

O uso de solo grampeado proporcionou aumentos substanciais no FS, variando entre 43,36% e 53,82% para o solo argiloso e entre 95,89% e 119,57% para o solo arenoso, evidenciando sua eficiência, sobretudo em solos friccionais. Mesmo com o grampo, a geometria do talude manteve influência marcante, com redução de até 21,18% entre as tipologias consideradas. A variação do ângulo dos grampos apresentou impacto secundário, com ganhos modestos em comparação ao efeito da geometria.

De forma geral, conclui-se que o solo grampeado é uma técnica eficaz para elevar a estabilidade, mas

sua performance depende da interação entre geometria, características do solo e configuração do reforço. Assim, recomenda-se a realização de análises específicas para cada projeto, evitando generalizações e garantindo maior segurança nas intervenções.

AGRADECIMENTOS

Os pesquisadores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo e à empresa Base Engenharia Geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSUBAL, Shamsan; HARAHAP, Indra S. H.; BABANGIDA, Nuraddeen Muhammad. A Typical Design of Soil Nailing System for Stabilizing a Soil Slope: case study. *Indian Journal Of Science And Technology*, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 0-0, 24 jan. 2017. Indian Society for Education and Environment.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR 11682: estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro, 2009a. 33 p.

CODUTO, Donald P. *Foundation Design: Principles and Practices*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

ELAHI, Tausif e; ISLAM, Md Azijul; ISLAM, Mohammad Shariful. *Parametric Assessment of Soil Nailing on the Stability of Slopes Using Numerical Approach*. Geotechnics, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 615-634, 20 jul. 2022. MDPI AG.

GERSCOVICH, D. M. S. *Estabilidade de taludes*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. 2. ed., 5. reimpr. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

JELANI, Jestin et al. *Preliminary Investigation of the Effect of Surcharge Load and Distance on NonHomogenous Man-Made Slope.* Jurnal Kejuruteraan, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 101-107, 30 set. 2021. Penerbit Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM Press). http://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2021-si4(1)-13.

KOKUTSE, Nomessi Kuma; TEMGOUA, André Guy Tranquille; KAVAZOVIć, Zanin. *Slope stability and vegetation: conceptual and numerical investigation of mechanical effects*. Ecological Engineering, [S.L.], v. 86, p. 146-153, jan. 2016. Elsevier BV.

PEREIRA, Armando. *Análise da influência da inclinação dos grampos no aumento da estabilidade global de talude idealizado contido em solo grampeado. Techne*: a revista do engenheiro civil, São Paulo : Pini, ano 22, n. 206, (maio 2014), p.48-54 ISSN : 0104-1053.

RAMTEKE, Prashant C; SAHU, Anil Kumar. *Soil-slope stability investigation using different nail inclinations: a comprehensive lsd, fem and experimental approach.* Sādhanā, [S.L.], v. 49, n. 1, p. 0-0, 10 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC.

SHIFERAW, H.M. *Study on the influence of slope height and angle on the factor of safety and shape of failure of slopes based on strength reduction method of analysis*. Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci 10, 31 (2021).

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

ZHUANG, J., PENG, J., ZHU, Y. et al. *The internal erosion process and effects of undisturbed loess due to water infiltration*. Landslides 18, 629–638 (2021).