

Avaliação da Influência da Rigidez Solo-Reforço no Fator de Segurança e Deformações de Estruturas de Solo Grampeado

Marcos Paulo Santos da Silva

Graduando, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, marcospaulo.mpsds@gmail.com

Natália Karine Portes

Engenheira Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, nataliaporres5@gmail.com

Mario Vicente Riccio Filho

Professor, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, mario.riccio@ufjf.br

RESUMO: O solo grampeado é uma técnica de reforço utilizada para estabilizar taludes e escavações, viabilizando cortes verticais e otimizando o uso do espaço. Considerada uma solução rápida e econômica, é amplamente aplicada em áreas urbanas, rodovias, ferrovias, mineração e na construção de túneis. A técnica consiste na inserção de grampos metálicos fixados com concreto no solo, o que aumenta a resistência do maciço contra rupturas. Esses reforços distribuem as cargas geradas por deformações, interagindo com o terreno ao redor para garantir a estabilidade. Este trabalho analisa como o fator de segurança e as deformações horizontais de uma estrutura de solo grampeado respondem ao aumento da rigidez relativa entre o solo e o reforço. Para isso, foram realizadas simulações numéricas em um talude padrão, sem a influência de poropressão, variando o espaçamento entre os grampos. As análises do fator de segurança foram feitas com os softwares *Plaxis 2D* e *Slide* (Método do Equilíbrio Limite), enquanto as deformações foram estudadas apenas com o *Plaxis 2D*. O objetivo é compreender o comportamento da estrutura e determinar a viabilidade de se aumentar a rigidez para obter ganhos no fator de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Fator de Segurança, Rigidez Relativa, Método Numérico, Método do Equilíbrio Limite.

ABSTRACT: Stamped soil is a reinforcement technique used to stabilize slopes and excavations, enabling vertical cuts and optimizing space utilization. Considered a quick and economical solution, it is widely used in urban areas, highways, railways, mining, and tunnel construction. The technique consists of inserting metal staples fixed with concrete into the soil, which increases the massif's resistance to rupture. These reinforcements distribute the loads generated by deformations, interacting with the surrounding terrain to ensure stability. This work analyzes how the safety factor and horizontal deformations of a soil nailing structure respond to the increase in relative stiffness between the soil and the reinforcement. For this purpose, numerical simulations were performed on a standard slope, without the influence of pore pressure, varying the spacing between the nails. The safety factor analyses were performed using *Plaxis 2D* and *Slide* (Limit Equilibrium Method) software, while the deformations were studied using only *Plaxis 2D*. The objective is to understand the behavior of the structure and determine the feasibility of increasing stiffness to obtain gains in the safety factor.

KEYWORDS: Stamped Soil, Safety Factor, Relative Stiffness, Numerical Method, Limit Equilibrium Method.

1 INTRODUÇÃO

O solo grampeado é um método de reforço in situ que consiste na melhoria das propriedades mecânicas de um maciço de solo através da inserção de elementos de reforço esbeltos, sem pré-tensionamento inseridos em um maciço de corte (FRANÇA, 2007). Além disso, são compostos, tipicamente por uma perfuração preenchida com calda de cimento, argamassa ou outro aglutinante e um elemento resistente à tração e ao cisalhamento (ABNT NBR 11682, 2009).



A principal finalidade é a distribuição das cargas ao longo de todo o seu comprimento, interagindo com o terreno circundante. Diferentemente dos tirantes, os grampos são elementos passivos que não possuem trecho livre, sendo a carga mobilizada à medida que as deformações ocorrem (SOUZA, 2019).

A técnica viabiliza cortes verticais ou subverticais, otimizando significativamente o aproveitamento do espaço disponível em intervenções geotécnicas. Dessa forma, as escavações são geralmente realizadas em fases com profundidades geralmente entre 1 e 2 metros. O processo de grampeamento é realizado concomitantemente à escavação, onde a zona de solo reforçado serve como suporte para o maciço de solo não reforçado localizado atrás (ORTIGÃO et al., 1993). Para finalizar o procedimento, é usual a aplicação de um revestimento superficial feito com concreto projetado, que pode ser armado com tela de aço eletrossoldada ou com adição de fibras de aço (FRANÇA, 2007).

O sistema de grampeamento do solo consiste na introdução de elementos de reforço capazes de resistir à flexão composta, denominados grampos, os quais são instalados em direção sub-horizontal, de modo a mobilizar esforços resistentes à tração e cisalhamento (ORTIGÃO et al., 1993). Busca-se, com essa solução de estabilização, restringir os deslocamentos e transferir os esforços de uma zona potencialmente instável para uma zona resistente (SILVA et al., 2010).

Assim, o objetivo principal do presente trabalho é analisar o comportamento do fator de segurança e das deformações horizontais nestas estruturas em função do aumento da rigidez relativa, que é definida como a razão entre a rigidez do elemento de reforço e a rigidez do solo. Além disso, tem-se como objetivo secundário a avaliação desse comportamento ao considerar a rigidez do reforço como o somatório da rigidez do aço e calda do cimento, ou apenas ao considerar a rigidez do aço.

2 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

2.1 Método do Equilíbrio Limite

No Brasil, não existe metodologia padronizada para o dimensionamento de sistemas de solo grampeado. O processo de dimensionamento é baseado em métodos de equilíbrio limite, em que os coeficientes de segurança são obtidos a partir de superfícies de ruptura pré-determinadas. Isso implica que a capacidade da estrutura reforçada está condicionada tanto à magnitude dos parâmetros de resistência do solo quanto à resistência ao cisalhamento mobilizada na interface solo-reforço (SILVA et al., 2010).

O método do equilíbrio limite baseia-se decomposição da massa de solo em fatias, com certos pressupostos sobre a distribuição das forças para o cálculo do fator de segurança. Tais pressupostos geralmente estão associados à inclinação ou a posição relativa das forças entre as fatias e uma superfície de deslizamento previamente definida de uma geometria assumida, como log-espiral, cunha e circular. Esse é método de natureza determinística que estabelece o equilíbrio estático das forças ou momentos para a identificação da superfície crítica, ou seja, aquela que resulta no menor fator de segurança possível. Ou seja, o método assume que, no caso de falha, as forças atuantes se igualam ou são maiores que as forças resistentes (RAWAT E GUPTA, 2016).

2.2 Método *Phi/c Reduction*

O Plaxis 2D disponibiliza, entre suas funcionalidades, o tipo de cálculo denominado *Safety*, destinado à estimativa do fator de segurança global do modelo em análise, sendo amplamente utilizada para a avaliação da estabilidade de estruturas geotécnicas.

Nesta metodologia, os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c), assim como a resistência à tração dos materiais, são sucessivamente reduzidos até que se atinja a condição de ruptura da estrutura analisada. O ângulo de dilatação ψ (psi), em princípio, não é afetado pelo procedimento de redução ϕ/c . No entanto, o ângulo de dilatação nunca pode ser maior que o ângulo de atrito. Quando o ângulo de atrito é reduzido a ponto de se igualar ao ângulo de dilatação, qualquer redução adicional do ângulo de atrito levará à mesma redução do ângulo de dilatação. A resistência das interfaces, se utilizadas, é reduzida da mesma forma. Opcionalmente, a resistência de objetos estruturais como placas e ancoragens também podem ser reduzidas (BENTLEY, 2025).

3 METODOLOGIA

As análises pelo método do Equilíbrio Limite foram realizadas utilizando o *software Slide*, amplamente utilizado nas análises de estabilidade de taludes. Já para a análise numérica utilizou-se o *Plaxis 2D* versão 8.

A geometria do maciço, o ângulo de inclinação dos grampos com a horizontal, o espaçamento vertical e o comprimento dos grampos estabelecidos nos *softwares* foram mantidos constantes. Os parâmetros que variaram foram o espaçamento horizontal com incrementos de 0,25 metros a cada análise e, assim, obteve-se diversos valores de fatores de segurança.

Definiu-se que seria utilizada a mesma geometria do maciço analisada por Souza (2019), em que a altura de corte do talude (H) é de 7,5 metros, o maciço tem de 35 metros de comprimento e 12,5 metros de altura.

Adotou-se grampos de 100 mm, com barras de aço com diâmetro nominal de 36 mm. Os demais parâmetros padrões utilizados em todas as análises foram os mesmos empregues nas análises de Souza (2019): cinco grampos com ângulo de inclinação de 15° com a horizontal (α), comprimento de 6 metros (L), distância de 0,75 metros do topo do talude e espaçamento vertical (S_v) de 1,5 metros.

O espaçamento horizontal (S_h) foi o parâmetro variante entre todas as análises. Para cada metodologia, foram realizadas 11 análises, com o espaçamento horizontal iniciando em 0,5 metros e terminando em 3 metros. Dessa forma, foi utilizado um incremento de 0,25 metros no espaçamento horizontal a cada análise realizada.

Em se tratando do parâmetro para a resistência da interface solo-grampo q_s , o programa trabalha com o parâmetro de adesão solo-grampo por metro linear ("*bond strength*"), medido em kN/m, que pode ser obtido por meio da Equação (1).

$$a = q_s \cdot \pi \cdot D \quad (1)$$

Adotou-se o valor de 500 kN/m² como valor de resistência ao arrancamento (q_s), um valor considerado alto para não haver risco de arrancamento durante as análises, uma vez que não é esse o objetivo do trabalho. Como o diâmetro do grampo é 0,1 m, tem-se que $a = 157 \text{ kN/m}$.

Tem se ainda que os limites utilizados para a busca das superfícies de ruptura abrangeram todo o maciço, o tipo de ruptura utilizado foi circular, uma vez que foram analisados solos homogêneos e utilizou-se o método de grade de pesquisa com espaçamento de 40 intervalos na direção X e 40 intervalos na direção Y. A Figura 1 mostra as dimensões do talude estudado (1) e os detalhes dos grampos (2), respectivamente.

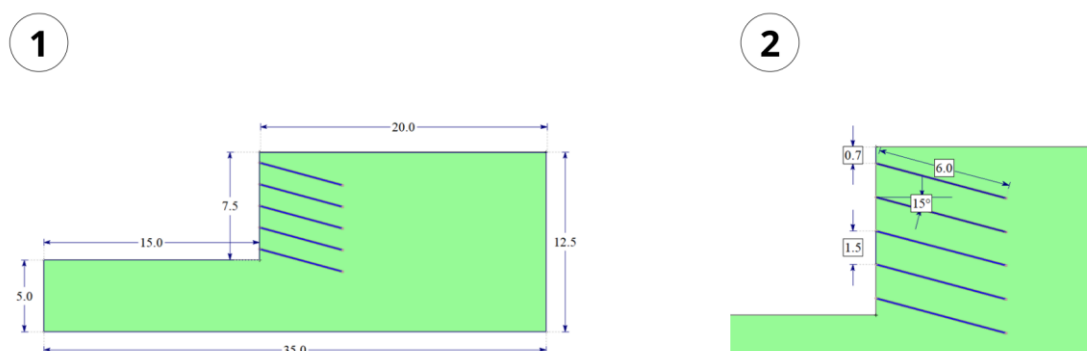


Figura 1: Dimensões do talude e detalhes dos grampos, respectivamente.

3.1 Parâmetros da Modelagem Numérica Utilizando o *Plaxis 2D*

Para a análise do comportamento do solo, adotou-se o critério de Mohr-Coulomb, o qual, segundo Brinkgreve et al. (2002), é amplamente utilizado como uma primeira aproximação simplificada do comportamento tensão-deformação de materiais geotécnicos em análises numéricas. A caracterização do solo no modelo exige o conhecimento prévio de diversos parâmetros, como peso específico saturado (γ_{sat}) e não saturado (γ_{unsat}), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão efetiva (c'), ângulo de



atrito efetivo (ϕ') e ângulo de dilatação (ψ). Além disso, não foi considerado nível freático para o modelo. A Tabela 1 mostra os parâmetros adotados para o solo.

Tabela 1. Parâmetros do solo adotado.

Propriedades do Solo	
Modelo	Mohr-Coulomb
Tipo de comportamento	Drenado
γ_{unsat} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20
Parâmetros do Solo	
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^4$
ν	0,30
c' (kN/m ²)	10
ϕ' (°)	35
Ψ (°)	2

A parede de concreto projetado foi modelada como elemento de placa (Plate), adotando-se um comportamento do tipo elástico-linear, conforme modelagem disponível no *Plaxis*, com a finalidade de se considerar o comportamento da mesma a flexão. Desse modo, os parâmetros de entrada exigidos pelo programa para a definição do elemento de placa incluem: a rigidez axial da parede (EA_{parede}), a rigidez à flexão (EI_{parede}), o peso próprio da estrutura (w) e o coeficiente de *Poisson* (ν). A Tabela 2 mostra as propriedades da parede.

Tabela 2. Propriedades da parede de concreto projetado.

Propriedades da Parede	
Modelo	Elástico-linear
EA (kN/m)	$1,05 \cdot 10^6$
EI (kNm ² /m)	218,4
d (m)	$5 \cdot 10^{-2}$
w(kN/m/m)	1,25
ν	0,20

Os grampos também foram modelados como elementos do tipo plate, com rigidez equivalente, seguindo a abordagem adotada por Rawat e Gupta (2016). A divisão das rigidezes EA e EI por Sh (espaçamento horizontal entre grampos) é feita ao se utilizar o elemento plate para simular os grampos.

Utilizando o E_{eq} do grampo como $4,56 \times 10^7$ kN/m², a rigidez axial equivalente pode ser calculada, seguindo a Equação (2) e a rigidez a flexão equivalente é dada pela Equação (3), adaptado de Rawat e Gupta (2016), p.10.

$$EA_{eq} = \frac{E_{eq} \pi d^2}{S_h \cdot 4} \quad (2)$$

$$EI_{eq} = \frac{E_{eq} \pi d^4}{S_h \cdot 64} \quad (3)$$

Onde: d é o diâmetro do grampo (sistema barra-cimento); E_{eq} é o módulo de elasticidade do grampo; e Sh é o espaçamento horizontal. Os parâmetros utilizados para os grampos são demonstrados na Tabela 3.



Tabela 3. Parâmetros da utilizados na modelagem dos grampos.

Espaçamento horizontal (m)	Aço + Calda			Somente Aço			w (kN/m/m)	v
	E _{Aeq} (kN/m)	E _{Ieq} (kNm ² /m)	d (m)	E _{Aeq} (kN/m)	E _{Ieq} (kNm ² /m)	d (m)		
0.50	716283.13	447.68	0.087	409259.45	33.15	0.031	2.17	0.35
0.75	477522.08	298.45		272839.63	22.10			
1.00	358141.56	223.84		204629.72	16.58			
1.25	286513.25	179.07		163703.78	13.26			
1.50	238761.04	149.23		136419.82	11.05			
1.75	204652.32	127.91		116931.27	9.47			
2.00	179070.78	111.92		102314.86	8.29			
2.25	159174.03	99.48		90946.54	7.37			
2.50	143256.63	89.54		81851.89	6.63			
2.75	130233.30	81.40		74410.81	6.03			
3.00	119380.52	74.61		68209.91	5.53			

Tem-se, ainda, que a malha utilizada no modelo foi gerada no modo fine e utilizou-se também o recurso de refinamento de malha global e *line* para um refinamento da malha nas regiões dos elementos *plate* (Grampos e parde).

3.2 Cálculo da Rigidez Relativa

A rigidez relativa expressa a razão entre a rigidez do elemento de reforço e a rigidez do solo e pode ser calculada conforme a Equação (4), definida por Ehrlich et al. (2017).

$$S_i = \frac{A_r \cdot E_r \cdot (1 - \nu^2)}{A_s \cdot E_s} \quad (4)$$

Sendo:

Ar e Er são a área e módulo de deformabilidade dos grampos, respectivamente;

As e Es são a área e módulo de deformabilidade do solo, respectivamente;

ν é o coeficiente de Poisson.

Em relação à rigidez do reforço, adotam-se duas abordagens distintas. A primeira consiste em considerar apenas a contribuição do aço, considerando-se que a calda de cimento, ao ser tracionada, encontra-se fissurada e, portanto, não contribui significativamente para a rigidez à tração.

A segunda abordagem, por sua vez, admite que a calda de cimento permanece íntegra, permitindo assim que sua rigidez seja somada à do aço na determinação da rigidez total do grampo.

Para a simplificação dos cálculos, adotou-se o módulo de elasticidade da calda de cimento como igual ao módulo de elasticidade do concreto. Além disso, adotou-se o coeficiente de Poisson do aço como representativo do material composto. Desse modo, na Equação (5) tem-se a formulação considerando a rigidez da calda de cimento:

$$S_{i \text{ aço e calda}} = \frac{(A_{\text{concreto}} \cdot E_{\text{concreto}} + A_{\text{aço}} \cdot E_{\text{aço}}) \cdot (1 - \nu_{\text{aço}}^2)}{A_{\text{solo}} \cdot E_{\text{solo}}} \quad (5)$$

Do mesmo modo, tem-se a equação da rigidez relativa considerando apenas o aço dada pela Equação (6):

$$S_{i \text{ aço}} = \frac{(A_{\text{aço}} \cdot E_{\text{aço}}) \cdot (1 - \nu_{\text{aço}}^2)}{A_{\text{solo}} \cdot E_{\text{solo}}} \quad (6)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Feitas as análises, foram obtidos os resultados de fatores de segurança por Bishop Simplificado, Fellenius e Morgenstern-Price para o Método do Equilíbrio Limite, que foram analisados conjuntamente com os dados obtidos da modelagem numérica no Plaxis, os quais podem ser observados na Tabela 5.



Tabela 5. Fatores de segurança obtidos.

Análise	Espaçamento Horizontal - Sh (m)	Fator de Segurança Obtido			
		Bishop Simplificado	Fellenius	Morgenstern - Price	Phi/c Reduction
1	0.50	2.58	2.24	2.58	2.10
2	0.75	2.58	2.24	2.58	2.11
3	1.00	2.58	2.23	2.58	2.10
4	1.25	2.58	2.24	2.57	2.10
5	1.50	2.56	2.23	2.55	2.09
6	1.75	2.52	2.23	2.10	2.09
7	2.00	2.47	2.23	2.47	2.09
8	2.25	2.34	2.22	2.36	2.09
9	2.50	2.20	2.19	2.25	2.09
10	2.75	2.03	2.18	2.14	2.09
11	3.00	1.90	2.15	2.06	2.09
Talude Sem Reforço		0.75	0.82	0.88	0.65

A partir dos resultados apresentados, observa-se que os fatores de segurança encontrados foram relativamente altos e ainda que a contenção de fato dá estabilidade ao maciço, dada a diferença dos fatores com e sem o reforço no solo. Verifica-se também que a modelagem numérica apresentou uma tendência mais conservadora, em relação às análises baseadas no Equilíbrio Limite.

Considerando que o *Plaxis* realiza suas análises com base no comportamento tensão-deformação dos materiais, a rigidez relativa já está incorporada na modelagem, como observado anteriormente. Assim, ao se comparar os fatores de segurança obtidos em diferentes valores de rigidez relativa, verifica-se que, a partir de um determinado valor, os ganhos proporcionados por incrementos de rigidez é pouco significativo. Esse comportamento indica a existência de um limite de rigidez relativa, a partir do qual o reforço já mobiliza toda sua capacidade resistente e aumentos adicionais não resultam em aumentos expressivos na estabilidade global do modelo.

O mesmo pode ser observado para o Método do Equilíbrio Limite quando comparadas a variação do fator de segurança com a variação da rigidez relativa, onde verifica-se que após um dado valor de rigidez os ganhos são irrelevantes, quase nulos. Os gráficos das Figuras 2 e 3 mostram a variação do fator de segurança em função do aumento da Rigidez Relativa considerando aço e calda de cimento e somente o aço, respectivamente.

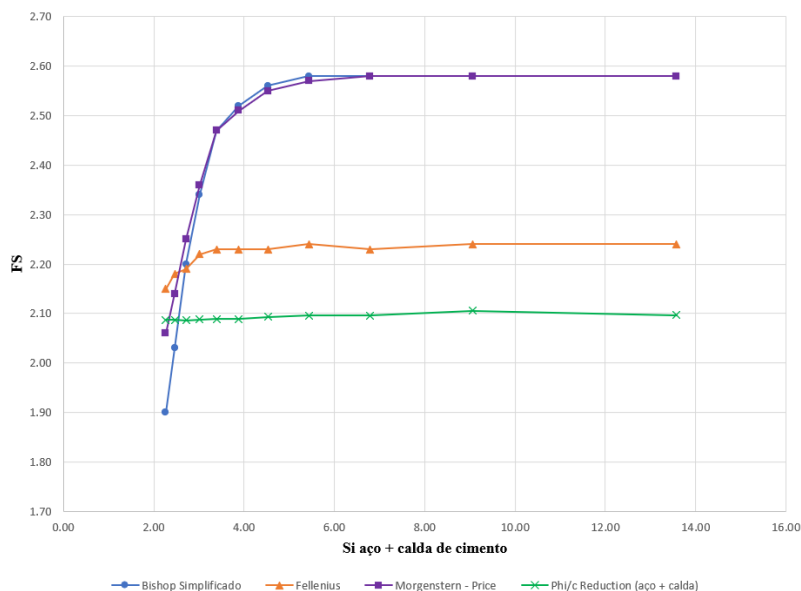


Figura 2. Fator de Segurança em função da Rigidez Relativa solo-reforço considerando o grampo composto por aço e calda de cimento.

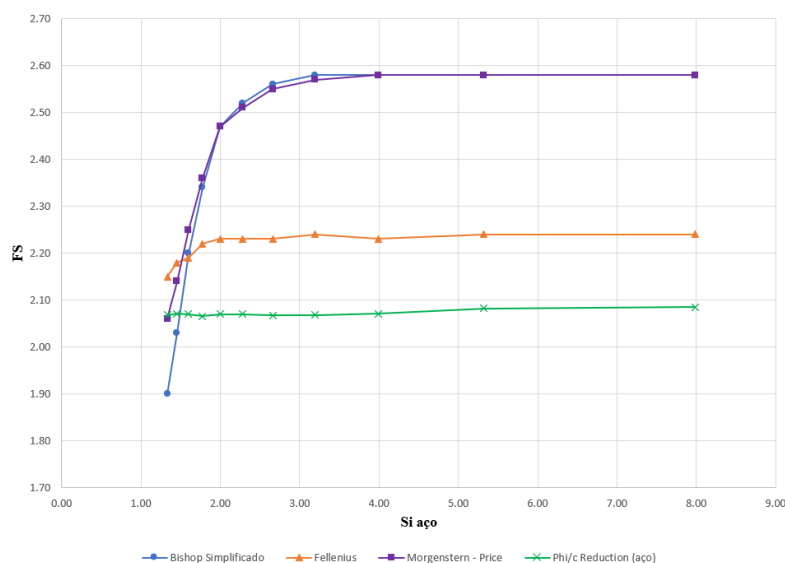


Figura 3. Fator de Segurança em função da Rigidez Relativa solo-reforço considerando o grampo composto apenas por aço.

Em relação aos deslocamentos horizontais, é possível analisar na modelagem realizada no Plaxis que a variação dos deslocamentos em relação ao aumento da rigidez é praticamente irrelevante. Os valores máximos de deslocamentos variam de 26×10^{-3} m no menor valor de rigidez, que se dá com sh de 3,00 m entre os grampos, a 22×10^{-3} no espaçamento que representa o maior valor de rigidez, que é quando o sh é de 0,50 m entre os grampos. Ainda foi possível observar um valor constante nos deslocamentos verticais máximos, no valor de 24×10^{-3} do sh igual a 2,75 m até sh igual a 0,75 m, demonstrado que o aumento da rigidez não influenciou efetivamente na redução dos deslocamentos. A Figura 4 mostra os deslocamentos obtidos para sh igual a 3 (1) e sh igual a 0,5 m (2), respectivamente.

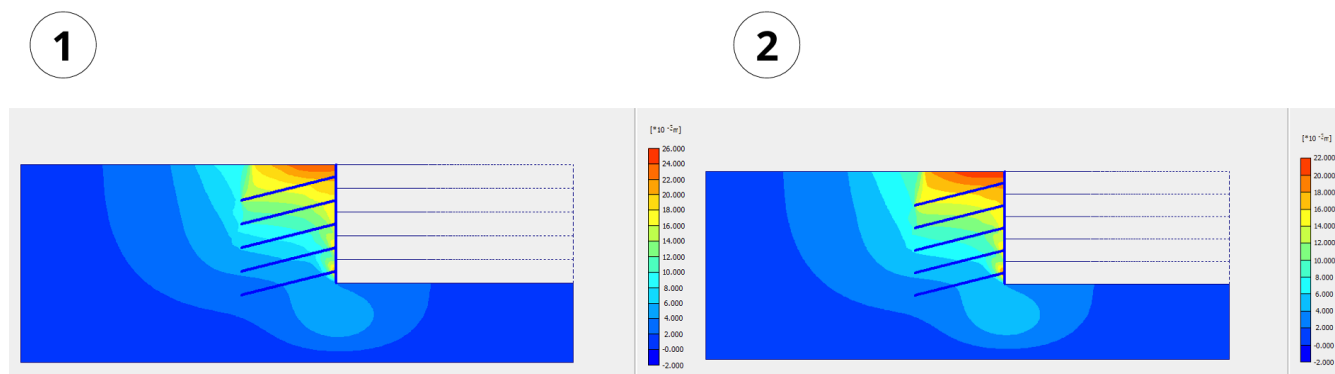


Figura 4. Deslocamentos horizontais obtidos para os espaçamentos Sh de 3 e 0,50 metros, respectivamente.

5 CONCLUSÃO

É possível concluir que o aumento do fator de segurança só é interessante até determinados valores de rigidez relativa. A partir destes valores, o aumento do fator de segurança é inexpressivo, como é possível observar, principalmente nas modelagens por métodos numéricos, que incorporam de forma mais realista o comportamento dos materiais.

Observa-se que para o tipo de análise efetuada o método de Fellenius, baseado em equilíbrio limite, foi o que apresentou resultados mais próximos da análise numérica em termos do comportamento do fator de segurança.



Para uma faixa de valores de S_i (rigidez relativa solo-reforço) com valores menores que o apresentado neste trabalho pode haver uma variação mais pronunciada dos fatores de segurança obtidos por meio do método de Fellenius e método numérico (programa Plaxis).

Isso evidencia a importância da avaliação do projetista em relação a densidade dos grampos a ser considerada, já que o aumento da quantidade de grampos se mostra ineficiente no aumento do fator de segurança a partir de um certo ponto, podendo tornar o projeto mais caro e inviável economicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encosta*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2021). NBR 16920-2. *Muros e Taludes em solo reforçados Parte 2: Solos grampeados*. Rio de Janeiro.
- Bentley (2025). *Plaxis 2D 2024.3 Reference Manual*, 656 p.
- Brinkgreve, R. B. J.; Al-Khoury, R.; Bakker, K. J.; Bonnier, P.G.; Brand, P. J. W.; Broere, W.; Burd, H. J.; Soltys, G.; Vermeer, P. A. (2002) *Plaxis v.8: finite element code for soil and rock analysis. Manuals*. Delft, Holanda, Universidade Técnica de Delft e PLAXIS b. v.2.8.
- Ehrlich, M.; Mirmoradi, S. H.; Xu, D. S. (2017) A simplified working stress design method for reinforced soil walls. *Geotechnique*, p. 1029-1032.
- Feijó, R. L. (2007) *Monitoração de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnáissico não saturado*. 176 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 157 p.
- França, F. A. N. (2007) *Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 123 p.
- Ortigão, J. A. R.; et al. (1993) Experiência com solo grampeado no Brasil: 1970 – 1993. *Solos e Rochas*, São Paulo, p. 291 – 304.
- Rawat, S., Gupta, A. K. (2016) Analysis of a nailed soil slope using limit equilibrium and finite element methods, *International Journal of Geosynthetic sand Ground Engineering*, Springer, Suíça, 23 p.
- Silva, D. P. et al. (2010) Solo grampeado: A arte de estabilizar, uma técnica moderna e eficaz. *Fundações e Obras Geotécnicas*, São Paulo, p.38-43.
- Souza, T. F. (2019) *Análise da eficiência do uso de grampos verticais em estruturas de solo grampeado*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, 178 p.