



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



João Pedro Damis Vital

**ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS E EQUILÍBRIO LIMITE DE TALUDES
COM SOLO GRAMPEADO EM MALHA QUADRADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito
parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo
Garcia.

Uberlândia

2025

ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS E EQUILÍBRIO LIMITE DE TALUDES COM SOLO GRAMPEADO EM MALHA QUADRADA

João Pedro Damis Vital¹

Jean Rodrigo Garcia²

RESUMO

A estabilização de taludes em áreas de risco é crucial para garantir a segurança de pessoas, infraestrutura e comunidades. A ausência de um dimensionamento técnico adequado pode ocasionar o deslizamento de terra, resultando em perdas humanas e materiais. Como solução para mitigar esses riscos, destaca-se o uso da técnica de solo grampeado, amplamente empregada na estabilização de taludes e encostas. Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de taludes com diferentes espaçamentos de malhas quadradas, buscando otimizar a estabilidade dessas estruturas. Para tanto, foi realizada uma investigação da estabilidade 2D de um talude de 12m de altura e com inclinação de 1(H):3(V), reforçado com solo grampeado em três configurações de espaçamento entre grampos ($S_{v,h} = 0,8\text{m}$, $1,0\text{m}$ e $1,2\text{m}$), por meio de dois métodos: equilíbrio limite e elementos finitos com uma abordagem tensão-deformação. Os resultados apresentaram diferenças nas superfícies de ruptura e nos deslocamentos horizontais, a redução do espaçamento entre os grampos aumentou a estabilidade e cumpriram parâmetros de verificação segundo normas internacionais. Ao se analisar o *Shear Reduction Factor* (SRF) crítico, os modelos com maior espaçamento apresentaram maiores deslocamentos. Assim, este trabalho ressalta a importância da utilização de diferentes métodos de análise para soluções mais seguras e eficazes.

Palavras-chave: Solo grampeado, análise 2D com elementos finitos, equilíbrio limite, estabilidade de taludes.

ABSTRACT

Stabilization of slopes in risk areas is crucial to ensure the safety of people, infrastructure, and communities. The lack of proper technical design can lead to landslides, resulting in human and material losses. As a solution to mitigate these risks, the use of soil nailing stands out, being widely applied in the stabilization of slopes and embankments. This study aims to analyze the behavior of slopes with different square mesh spacings, seeking to optimize the stability of such structures. A 2D stability analysis was carried out for a 12-meter-high slope with an inclination of 1(H):3(V), reinforced with soil nails in three spacing configurations ($S_{v,h}=0.8$, 1.0 m; and 1.2 m), using two

methods: limit equilibrium and finite elements with a stress–strain approach. The results showed differences in the failure surfaces and horizontal displacements. The reduction in nail spacing improved overall stability and met verification parameters in accordance with international codes. When analyzing the critical Strength Reduction Factor (SRF), the models with wider spacing exhibited greater displacements. Thus, this study highlights the importance of using multiple analysis methods to achieve safer and more effective design solutions.

Key words: Soil nail, finite elements 2D analysis, limit equilibrium, slope stability

1 INTRODUÇÃO

A técnica conhecida como Solo Grampeado (*Soil Nailing*), que consiste na inserção de reforços metálicos no solo seguido da injeção de calda de cimento, tem se tornado cada vez mais utilizada mundialmente. Derivada do método convencional de construção de túneis, a técnica também utiliza o lançamento de projetado de calda de cimento e areia na face da escavação (FHWA, 2015).

O uso de grampos no solo, conhecido como solo grampeado, é uma técnica globalmente empregada para conter taludes e túneis, proporcionando estabilidade e rapidez construtiva. Isso envolve inserir grampos, barras de aço revestidas com cimento, reforçando o maciço, seguido pela aplicação de concreto projetado para formar uma superfície (FRANÇA, 2007).

Dentre os métodos disponíveis para análise da estabilidade de taludes reforçados com solo grampeado, destacam-se: o método do equilíbrio limite (MOHSEN, 2017), o método das diferenças finitas (DERGHOUM; MEKSAOUINE, 2021) e o método dos elementos finitos (DERGHOUM; MEKSAOUINE, 2021). Estudos indicam que as análises 2D tendem a subestimar a estabilidade real, principalmente em cenários complexos.

Ainda, análises que consideram superfícies indefinidas (IS) geralmente apresentam fator de segurança (FS) mais baixos em comparação com as superfícies elipsoidais ou esféricas. Isso pode ser atribuído à maior complexidade da análise em superfícies indefinidas, que muitas vezes capturam condições mais críticas de deslizamento (DUNCAN & WRIGHT, 2005).

A comparação entre malhas quadradas e triangulares, considerando diferentes espaçamentos, fornecerá dados cruciais para otimizar projetos de estabilização de taludes, oferecendo benefícios como a minimização de custos e o aumento da segurança.

O desafio da engenharia geotécnica em situações de contenções de escavações é o de encontrar a melhor solução técnica e econômica levando em conta a segurança, a viabilidade de

execução e a competitividade no custo. Neste caso, a contenção ou o reforço do solo deve ser projetado para suportar os esforços do maciço sem afetar o entorno ou causar danos à vizinhança.

O emprego de ferramentas numéricas e de estudos probabilísticos no projeto de estruturas geotécnicas servem, além de complementar o estudo determinístico, fornecer ao projetista um maior entendimento da estabilidade referente às diferentes alternativas de solução técnica (SPRINGER, 2006).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica amplamente empregada em análises de estabilidade de taludes. Esse método permite a determinação direta do fator de segurança, ao reduzir gradualmente os parâmetros de resistência do solo até que ocorra a ruptura (KANG et al., 2006). Deve-se ter uma clareza conceitual e à capacidade de simular cenários complexos, tornando-o ideal para o estudo de diferentes tipos de métodos e cenários e que pode fornecer várias possibilidades de soluções eficientes a taludes (WANG et al., 2020), configurações estas de solo grampeado.

Além disso, o MEF permite a visualização gráfica dos deslocamentos e das zonas críticas de tensões, contribuindo para uma melhor interpretação dos mecanismos envolvidos (FINN, 1966).

Assim, destaca-se a importância de uma análise criteriosa em taludes localizados em áreas de risco, com uso de métodos rigorosos e parâmetros geotécnicos adequados, uma vez que os resultados são específicos para cada condição de projeto.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a estabilidade de taludes reforçados com solo grampeado em malha quadrada utilizando métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos. Para isso, foi analisado um talude instável (Figura 1) de 12 metros de altura e com inclinação de 1(H):3(V). Em sequência, foram modeladas malhas quadradas com diferentes espaçamentos entre grampos ($S_{v,h} = 0,80 \text{ m}$, $1,0 \text{ m}$ e $1,2 \text{ m}$), conforme representado na Figura 1b, com o objetivo de verificar se a estabilidade é aprimorada e o risco de deslizamento é minimizado ou eliminado.

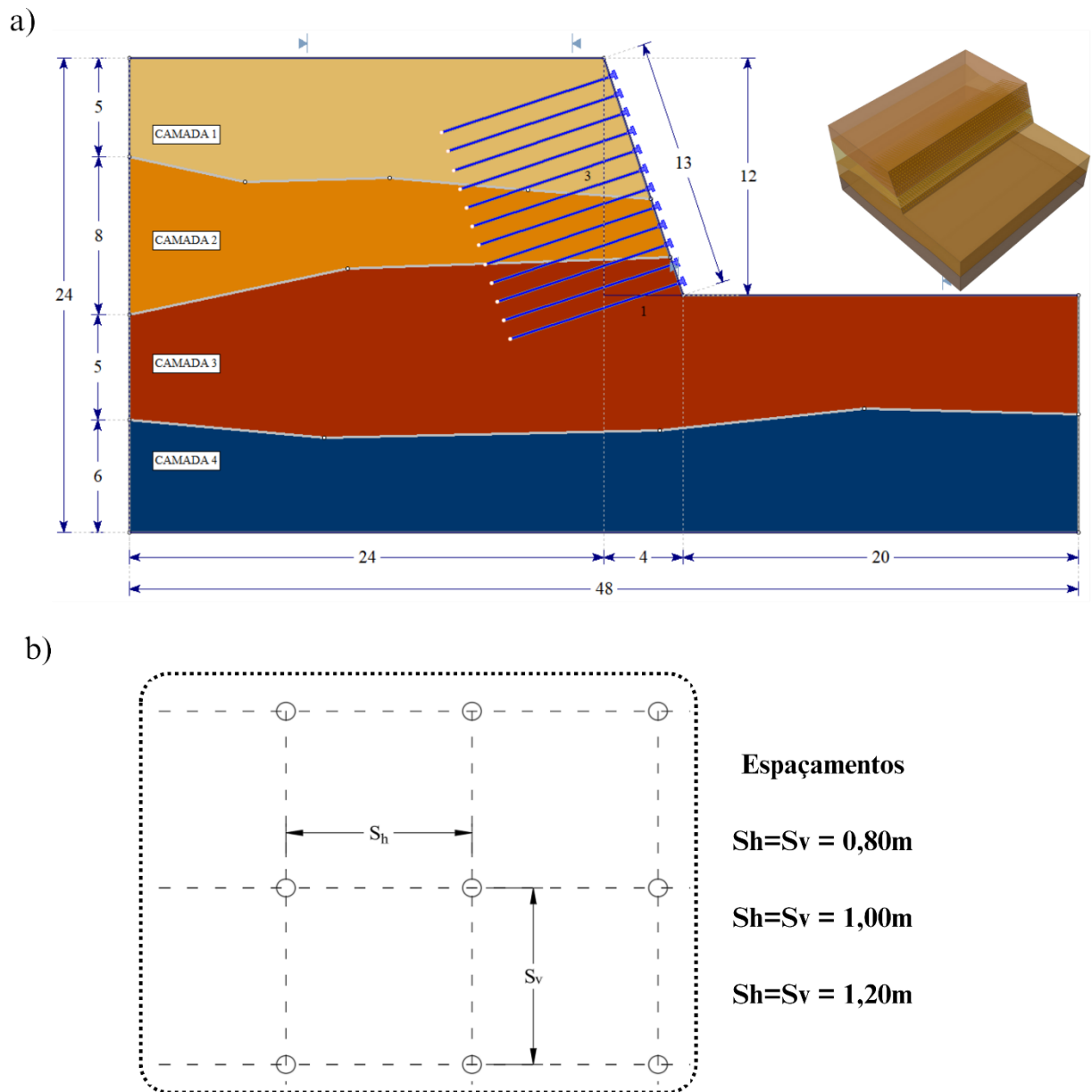
Além disso, o trabalho visa avaliar as variações do fator de segurança, a distribuição de tensões nos grampos, com ênfase nas diferentes configurações de espaçamento. Inicialmente, analisou-se o comportamento de um talude instável, o qual foi posteriormente comparado aos modelos com reforço.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização

O talude analisado está localizado na região central de Uberlândia (MG), caracterizada por quatro camadas distintas de solo, predominantemente composta por argila arenosa. Devido à variabilidade estratigráfica, faz-se necessária uma análise aprofundada de estabilidade, com vistas à mitigação de deslizamento em áreas suscetíveis.

Figura 1. Característica geométrica do talude e do reforço empregado.



Fonte: Autores (2025).

3.2 Parâmetros Geotécnicos

Para análise de estabilidade do talude, foi necessário obter parâmetros geotécnicos do solo. Para isso, utilizou-se como base uma sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT, que permitiu a identificação do perfil estratigráfico do local. A partir do índice de resistência a penetração (N_{SPT}), encontraram-se os parâmetros necessários para aplicação tanto no método de equilíbrio limite quanto no método dos elementos finitos (MEF).

Com base nos resultados do ensaio SPT, os parâmetros de resistência ao cisalhamento – coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) – bem como os parâmetros de deformabilidade – módulo de Young (E) e coeficiente de empuxo ativo (K_a) em repouso (K_0) foram estimados por meio de correlações semiempíricas.

Os valores de coesão e ângulo de atrito foram estimadas pelas propostas de Kulhawy & Mayne (1990) e Teixeira (1996), respectivamente.

$$\frac{c_u}{P_a} = 0,06 \times N_{SPT(60)} \quad (1)$$

Onde:

$$P_a = 101,325 \text{ kPa};$$

$$N_{SPT(60)} = N_{SPT(72)} \cdot 1,2$$

$$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 15 \quad (2)$$

Os valores dos coeficientes de empuxo ativo (K_a) e em repouso (K_0) foram obtidos, respectivamente, pelas propostas de Rankine (1857) e Jaky (1944), sendo calculados pelas equações (3) e (4):

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (3)$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (4)$$

O módulo de Young (E), parâmetro utilizado para caracterizar o comportamento elástico dos solos, foi estimado por meio da equação (5), conforme proposta por Teixeira e Godoy (1996). Já o coeficiente de Poisson (ν) foi adotado com base na Tabela 1, segundo recomendações de Braja Das (2016).

$$E_S = \alpha \cdot q_c = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (5)$$

A definição da estratigrafia do solo foi realizada com base nos resultados dos ensaios de SPT executados no local, os quais indicam a presença de quatro camadas distintas, totalizando 24 metros de profundidade. Para fins de modelagem no *software* RS2, o solo foi considerado como plástico.

Tabela 1. Coeficiente de Poisson

Material	Coeficiente de Poisson (ν)
Argilas saturadas (não drenadas)	0,5
Argilas saturadas (drenadas)	0,2–0,4
Areia compacta	0,3–0,4
Areia pouco compacta	0,1–0,3
Loess	0,1–0,3
Gelo	0,36
Alumínio	0,35
Aço	0,29
Concreto	0,15

Fonte: Braja Das (2016).

A Tabela 2 apresenta a síntese dos parâmetros geotécnicos adotados para cada uma das camadas, os quais foram utilizados tanto nas análises de equilíbrio limite quanto na análise numérica. Esses parâmetros incluem o N_{SPT} médio, ângulo de atrito interno (ϕ), coesão efetiva (c), peso específico natural (γ_{nat}), Módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), coeficiente de empuxo ativo (K_a) e em repouso (K_0). Esses valores possibilitaram a adequada parametrização do modelo para a avaliação da estabilidade do talude nos *softwares* da Rocscience.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos das quatro camadas

Camada	N_{SPT} Médio [golpes/30cm]	ϕ [°]	c [kPa]	γ_{nat} [kN/m ³]	E [kPa]	ν [-]	K_0 [-]	K_a [-]
Camada 01	4	24	15	17	8400	0,3	0,6	0,4
Camada 02	9	29	20	18	18900	0,3	0,5	0,3
Camada 03	10	30	20	18	27500	0,4	0,5	0,3
Camada 04	18	34	30	19	49500	0,4	0,4	0,3

3.3 Solo Grampeado

Para análise do reforço, foram inicialmente consideradas barras de aço CA-50 (chumbadores), com 20 mm de diâmetro e perfuração de 100 mm. A resistência de cálculo à tração do grampo (R_{td}) foi determinada conforme a equação (6).

$$R_{td} = f_{yd} \cdot A_{\text{útil}} \quad (6)$$

Onde $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ é a resistência de cálculo do aço CA-50, $A_{\text{útil}}$ é área útil da seção da barra de aço, descontada a espessura de sacrifício por corrosão (0,6 mm), conforme ABNT NBR 16920-2: 2021.

Sendo assim, a carga na cabeça do grampo (T_0) foi desconsiderada para fins de cálculo e comparação entre os métodos analisados.

Os grampos consistem em elementos resistentes à tração, inseridos no solo por perfuração própria e fixados através de injeções de calda de cimento. A interação solo-grampo é essencial para o dimensionamento da estrutura de contenção.

A partir dos resultados obtidos para cada camada de solo, foi possível determinar a resistência de aderência solo-grampo (q_s), utilizando correlações semiempíricas baseadas nos valores de N_{SPT} . A literatura apresenta diversas equações para estimar a tensão de aderência com base nos resultados de sondagem à percussão. Dentre essas, destacam-se as propostas de Ortigão (1997), Ortigão e Sayo (2004) e Springer (2006), apresentadas nas equações (7), (8) e (9), respectivamente.

A partir das equações apresentadas, foram obtidos os valores da tensão de aderência (q_s), os quais são indispensáveis para as análises realizadas neste trabalho, conforme sintetizado na Tabela 3.

$$q_s = 50 + 7,5 \cdot (N_{SPT}) \quad (7)$$

$$q_s = 67 + 60 \cdot \ln(N_{SPT}) \quad (8)$$

$$q_s = 45,12 \cdot \ln(N_{SPT}) - 14,99 \quad (9)$$

Tabela 3. Valores de resistência à aderência (kPa)

Equação	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Ortigão (1997)	80	115	131	189
Ortigão et al (1997)	151	197	210	243
Springer (2006)	48	83	93	117

Fonte: Autores (2025).

Desse modo, foram considerados os valores mais críticos de q_s para cada camada, a fim de calcular a força de aderência unitária (t). Essa força representa a resistência ao arrancamento por metro linear de grampo, conforme expressa a equação (10).

$$t = q_s \cdot \pi \cdot D \quad (10)$$

Sendo D o diâmetro nominal do grampo em metros.

3.4 Métodos de análise

Tradicionalmente, a análise de estabilidade de taludes é realizada por meio de métodos de equilíbrio limite, que consistem na discretização do maciço em lamelas verticais para avaliação da segurança global. Embora amplamente utilizados, esses métodos mantêm-se praticamente inalterados há décadas e exigem uma série de premissas iniciais sobre o mecanismo de ruptura.

Como alternativa, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se destacado por oferecer maior versatilidade e precisão, permitindo que a falha ocorra de forma "natural", nas zonas onde a resistência ao cisalhamento do solo é superada pelas tensões atuantes (Finn, 1966).

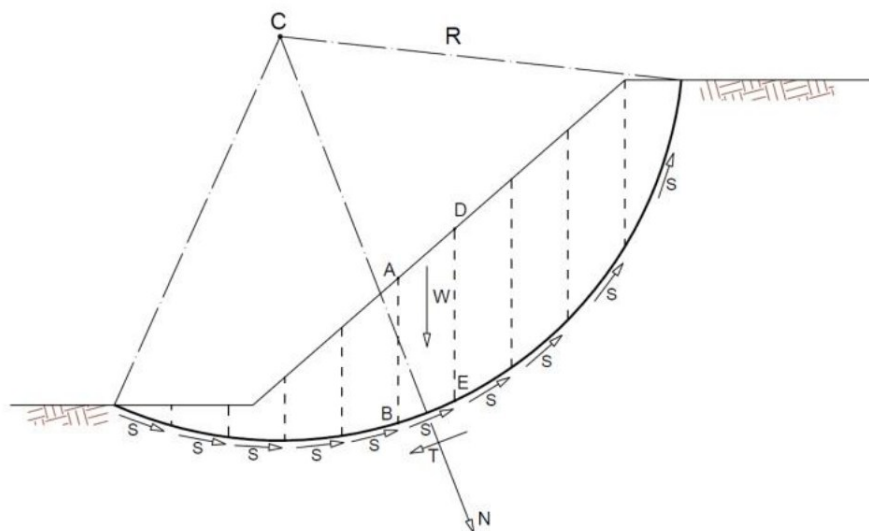
3.4.1 Equilíbrio Limite

Na engenharia geotécnica, a estabilidade de taludes deve ser analisada de uma forma meticulosa através de métodos convencionais e aplicáveis, como o método de equilíbrio limite. Com o avanço dos softwares e da modelagem computacional, técnicas como o solo grampeado passaram a se beneficiar dessas ferramentas para avaliação de desempenho e segurança, especialmente na comparação de diferentes configurações de grampeamento, como malha quadrada e malha escalonada.

A análise de alguns métodos por equilíbrio limite consiste na divisão do maciço de solo em lamelas verticais (Figura 2), nas quais se avaliam o equilíbrio de forças e momentos ao longo de uma superfície de ruptura previamente assumida. Essa análise compara a resistência ao cisalhamento disponível do solo - função da coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ) - com as forças mobilizadoras. O fator de segurança (FS) é calculado como a razão entre resistência disponível e solicitante (mobilizada).

Métodos como Fellenius, Bishop e Morgenstern-Price aprimoram essa abordagem ao considerar diferentes hipóteses de interação entre lamelas. Embora simples e eficiente, o equilíbrio limite não considera deformações antes da ruptura, sendo mais indicado para análises preliminares (TERZAGHI et al., 1996).

Figura 2. Lamelas e forças atuantes.

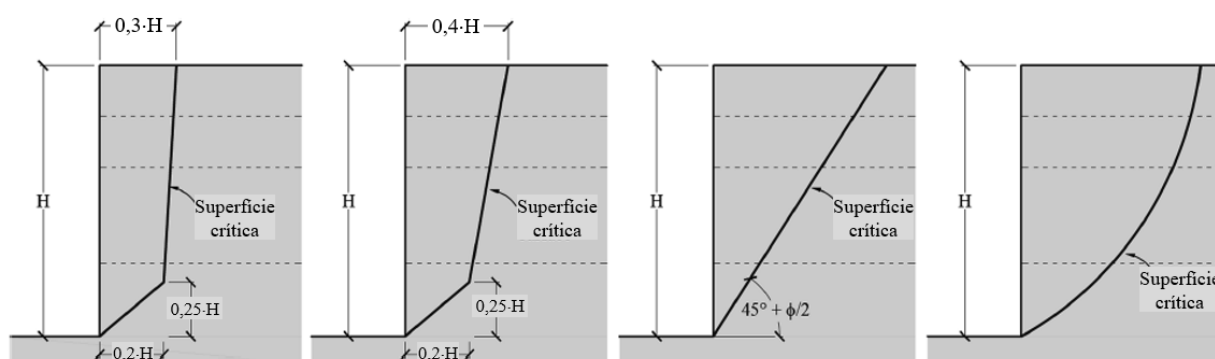


Fonte: (Assis et al., 2017)

Os métodos de equilíbrio limite utilizados nas análises, por meio dos softwares empregados, foram o método de *Bishop Simplified* e o método de *Morgenstern-Price/GLE*. De acordo com Lazarte *et al.* (2015) existem diversos tipos de superfícies de ruptura, agrupados, em geral, em duas categorias principais: superfícies locais e globais. Segundo Garcia *et al.* (2019) a literatura geotécnica recomenda a análise de pelo menos três tipos de superfícies locais de ruptura potenciais, especialmente em obras com contenções do tipo grampeamento ou tirantes.

Assim, no presente trabalho, foram considerados três superfícies de ruptura locais e uma global no modelo bidimensional (2D) desenvolvido no *software* Rocscience Slide2, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3. Superfícies de ruptura.



Fonte: Garcia et al. (2019).

3.4.2 Método dos Elementos Finitos

O solo grampeado é uma técnica de estabilização aplicada em taludes e escavações que consiste na inserção de elementos de reforço passivos, geralmente barras metálicas, associadas a revestimentos superficiais. A estabilidade dessas estruturas depende da interação solo–reforço e da geometria de distribuição dos grampos, podendo ser avaliada por métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF).

A análise de estabilidade de taludes é uma prática essencial na engenharia geotécnica, especialmente em contextos como mineração a céu aberto e obras de contenção, como o solo grampeado. Tradicionalmente, métodos de equilíbrio limite tem sido amplamente utilizados devido à sua simplicidade e vasta experiência acumulada em projetos de engenharia (Kang et al., 2006). No entanto, esses métodos requerem suposições prévias sobre os mecanismos de ruptura, o que pode comprometer a precisão em cenários mais complexos (Finn, 1966). Como alternativa, o MEF tem se destacado por sua capacidade de simular a falha, sem a necessidade de predefinição de superfícies de ruptura, além de oferecer maior versatilidade e precisão (Finn, 1966).

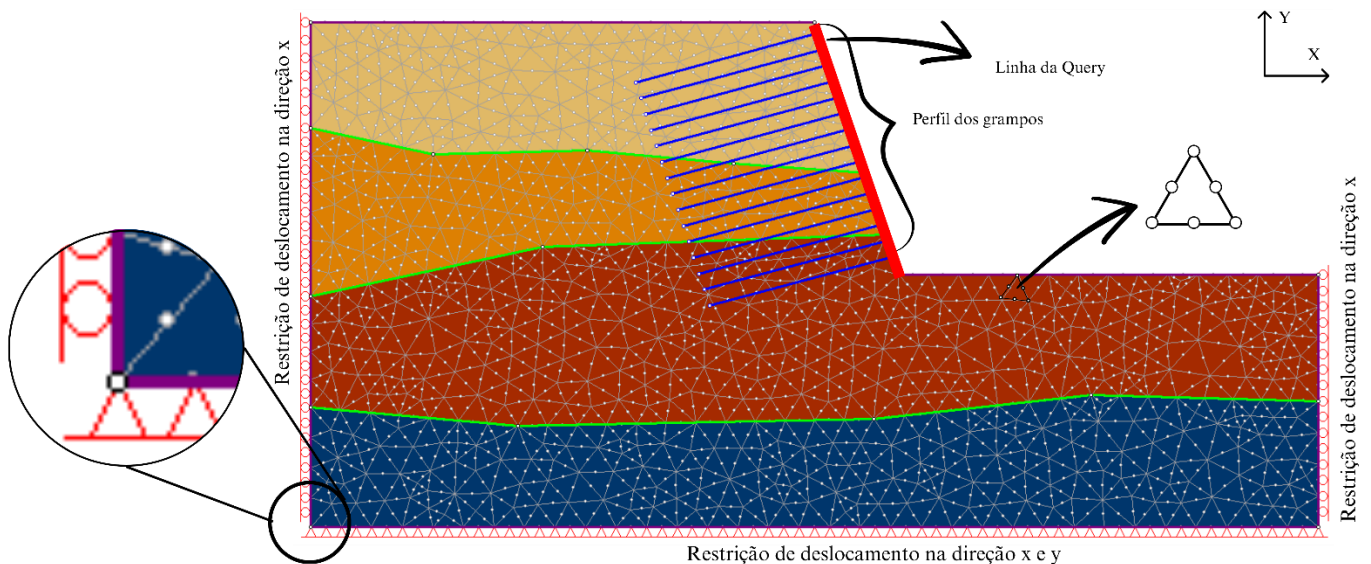
No presente trabalho, utilizou-se o *software* RS2, da Rocscience, para a análise numérica de estabilidade. O software aplica o método conhecido como *Shear Strength Reduction* (SSR), no

qual os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo são reduzidos progressivamente até que o sistema atinja o equilíbrio limite. O valor obtido no processo é o Strength Reduction Factor (SRF), que corresponde ao fator crítico de estabilidade. O procedimento é realizado de forma iterativa, por meio da análise de tensões via elementos finitos, até que o modelo apresente instabilidade e a análise não mais convirja, condição que caracteriza possível ruptura (ROCSCIENCE, 2025).

Foram utilizados elementos finitos triangulares de seis nós (Figura 4), gerando malhas com aproximadamente 3.000 elementos em todos os cenários analisados.

Além disso, foram aplicadas restrições de deslocamento nas direções “x” e “y” na base do talude, e restrição de movimento na direção “y” nas faces laterais, conforme ilustrado Figura 4.

Figura 4 Malha hexaédrica de uma seção do talude.



Fonte: Autores (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise por equilíbrio limite considerou quatro tipos de superfície de ruptura: três locais e uma global. Foram avaliadas três configurações de espaçamento do grampo com variações nas direções vertical e horizontal ($S_{h,v}$ e $S_{h,v}$), utilizando o *software* Slide2 da Rocscience. Verificou-se o comportamento dos fatores de segurança (FS) em função da variação do espaçamento e do tipo de superfície de ruptura aplicado ao talude instável.

Em complemento as análises, aplicou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) no software RS2, obtendo-se campos de tensão-deformação e os deslocamentos nos modelos estudados. Os dados foram obtidos com o uso da ferramenta *query*, consiste em uma seleção simples de uma

superfície de deslizamento afim de visualizar e plotar resultados, posicionada em dez seções ao longo da superfície inclinada do talude, a fim de garantir pontos de medição comparáveis entre os modelos com solo grampeado. O posicionamento das *query* tem como objetivo mesurar pontos comuns para uma análise solo grampeado. O objetivo principal foi avaliar o comportamento do maciço, com foco na distribuição de tensões e deslocamentos ao longo do talude.

4.1 Análises de estabilidade

Analizou-se a variação dos fatores de segurança (FS) considerando quatro tipos de superfícies de ruptura aplicadas no talude instável e três cenários distintos de espaçamento entre grampos ($S_{v,h}$). Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4 e ilustrados na Figura 5.

Tabela 4. Resultados dos Fatores de Segurança em diferentes cenários de análise.

Reforço no talude [m]	Modelo / Método	Local 0,3H	Local 0,4H	Local 45°+ $\phi/2$	FS _{global}
Talude Instável	Fellenius	1,14	1,09	1,19	1,01
	Bishop	1,2	1,14	1,29	1,02
	GLE-MP	-	1,09	-	1,02
$S_{v,h} = 0,8m$	Fellenius	1,91	1,98	1,98	1,85
	Bishop	1,92	1,98	2,01	1,86
	GLE-MP	-	1,99	1,98	1,86
$S_{v,h} = 1,0m$	Fellenius	1,69	1,72	1,74	1,69
	Bishop	1,71	1,72	1,79	1,68
	GLE-MP	-	1,72	1,74	1,69
$S_{v,h} = 1,2m$	Fellenius	1,55	1,55	1,59	1,48
	Bishop	1,57	1,56	1,69	1,48
	GLE-MP	1,54	-	-	1,48

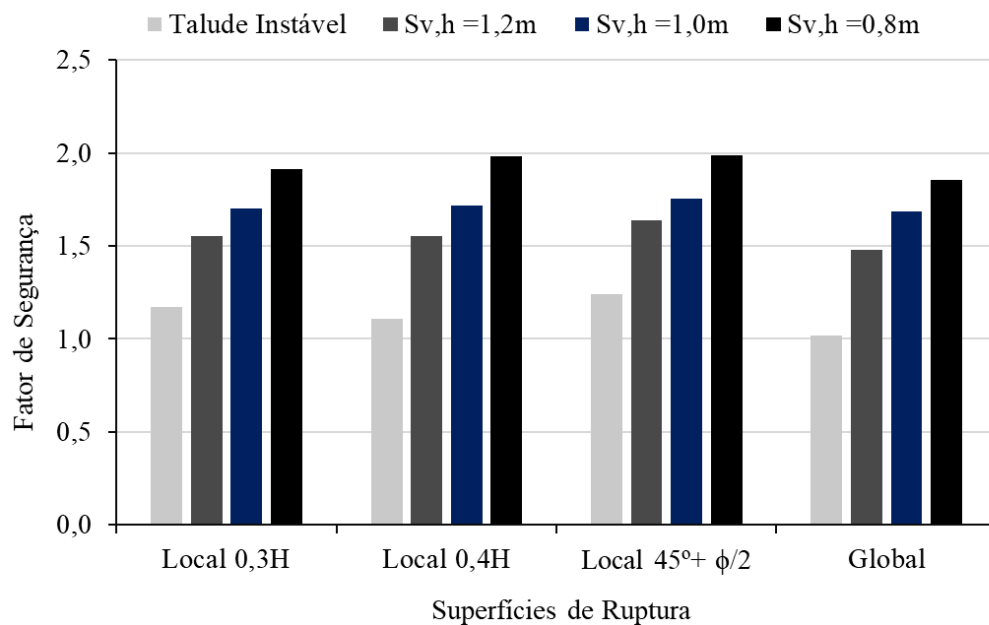
Observa-se, a partir da Tabela 4 e da Figura 5, que a superfície de ruptura global apresenta fatores de segurança (FS) mais conservadores.

A Figura 5 evidencia que o talude instável apresenta FS abaixo de 1,0 para todos os espaçamentos analisados, confirmando a necessidade de intervenções para garantir a estabilidade. Dessa forma, observa-se que, para o espaçamento $S_{v,h}=1,2m$, o FS global foi de 1,45, enquanto para $S_{v,h}=1,0m$ e $S_{v,h}=0,8m$, os valores em média foi de 1,68 e 1,86, respectivamente, e esses resultados indicam que a redução do espaçamento dos grampos contribui para um aumento do FS, resultando em valores mais conservadores e condizentes com a segurança do talude.

Além disso, a análise localizada em 0,3H e 0,4H apresentou Fatores de Segurança inferiores aos da superfície global, variando entre 1,10 e 1,30. Essa diferença pode ser atribuída à concentração de tensões em regiões específicas do talude.

Foi analisada a variação dos fatores de segurança (FS) considerando os quatro tipos de superfície de ruptura em função da variação do espaçamento entre grampos ($S_{v,h}$). Os valores obtidos estão representados na Figura 5. O gráfico evidencia que a superfície global apresenta os FS mais conservadores, enquanto os menores valores de FS variaram de acordo com cada configuração (grampos, método e superfície de ruptura) analisada.

Figura 5. FS da variação do espaçamento ($S_{v,h}$) *versus* superfícies de ruptura.



Fonte: Autores (2025).

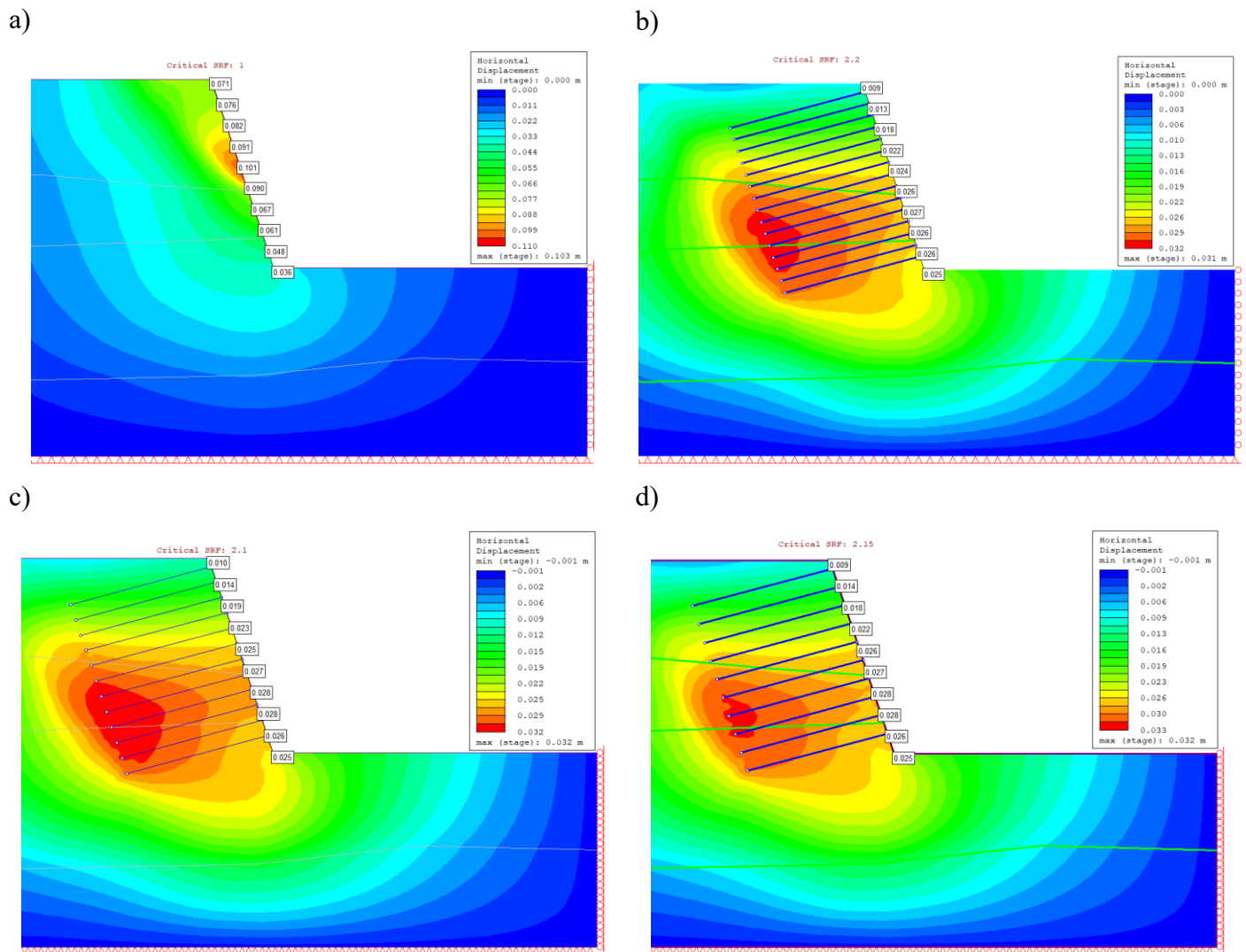
4.2 Análise dos deslocamentos pela *Strength Reduction Factor* (SRF)

A análise pelo método *Shear Strength Reduction* (SSR) foi realizada com os parâmetros de solo obtidos no item 3.2 (Tabela 2), resultando nos valores de *Strength Reduction Factor* (SRF). Em seguida, analisaram-se os deslocamentos horizontais entre os modelos, considerando o mesmo valor de SRF. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Query*, posicionada em 10 seções igualmente espaçadas a cada 1,3m.

A Figura 6 apresenta os modelos simulados: o talude instável (figura 7a) com SRF crítico igual a 1,0; o talude com reforço em malha quadrada com espaçamento $S_{v,h}=0,8m$ (Figura 7b) com SRF crítico de 2,2; para $S_{v,h}=1,0m$ (Figura 7c) com SRF crítico 2,1 e $S_{v,h}=1,2m$ (Figura 7d) SRF crítico igual a 2,15.

A análise dos deslocamentos horizontais ao longo da altura do talude (Figura 7) evidencia uma relação direta entre o espaçamento dos grampos e os deslocamentos observados. Para fins de comparação, foi adotado o mesmo valor de SRF (1,5) nos modelos reforçados, enquanto, para o talude instável, utilizou-se o SRF crítico (1,0), em função de sua instabilidade.

Figura 6. Resultado dos deslocamentos horizontais: a) talude instável, b) grampeamento com $S_v=S_h=0,8\text{m}$, c) grampeamento com $S_v=S_h=1,0\text{m}$, d) grampeamento com $S_v=S_h=1,2\text{m}$.



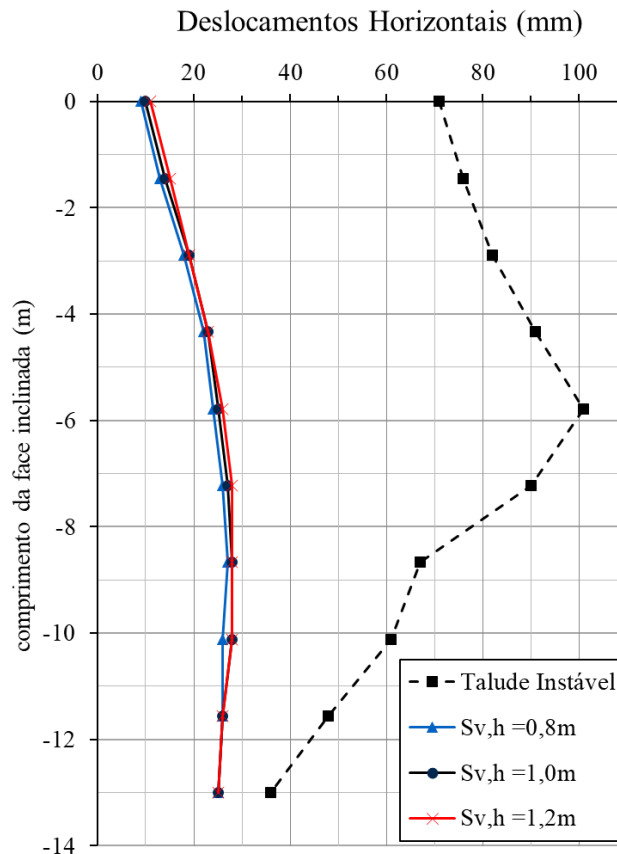
Fonte: Autores (2025).

Observa-se que o modelo com menor espaçamento ($S_{v,h}=0,8\text{ m}$) apresentou o menor deslocamento horizontal, com valor máximo de 31 mm. O modelo com espaçamento de 1,0 m registrou deslocamento horizontal máximo de 32 mm e para o modelo com espaçamento de 1,2 m apresentou também o mesmo valor, com deslocamento máximo de 32 mm.

Portanto, verifica-se no gráfico que os deslocamentos horizontais aumentam proporcionalmente ao aumento do espaçamento entre os grampos ($S_{v,h}$).

Nota-se um comportamento característico de pequeno aumento progressivo dos deslocamentos na região do pé do talude. Nos modelos com reforço por grampos, observaram-se deslocamentos maiores do que no talude sem reforço, em razão da ausência de grampos nessa área específica.

Figura 7. Deslocamentos horizontais para o mesmo valor de SRF.



Fonte: Autores (2025).

De acordo com a FHWA (2015), os deslocamentos horizontais admissíveis em contenções com solo grampeado devem ser limitados a 0,3% da altura (H) em solos finos e 0,2% de H para solos granulares, sendo H a altura da contenção. Com base nesses critérios, o deslocamento máximo admissível para a situação analisada é de 36 mm. Dessa forma, todos os modelos de taludes com variações de espaçamento entre os grampos apresentaram deslocamentos inferiores aos requisitos estabelecidos.

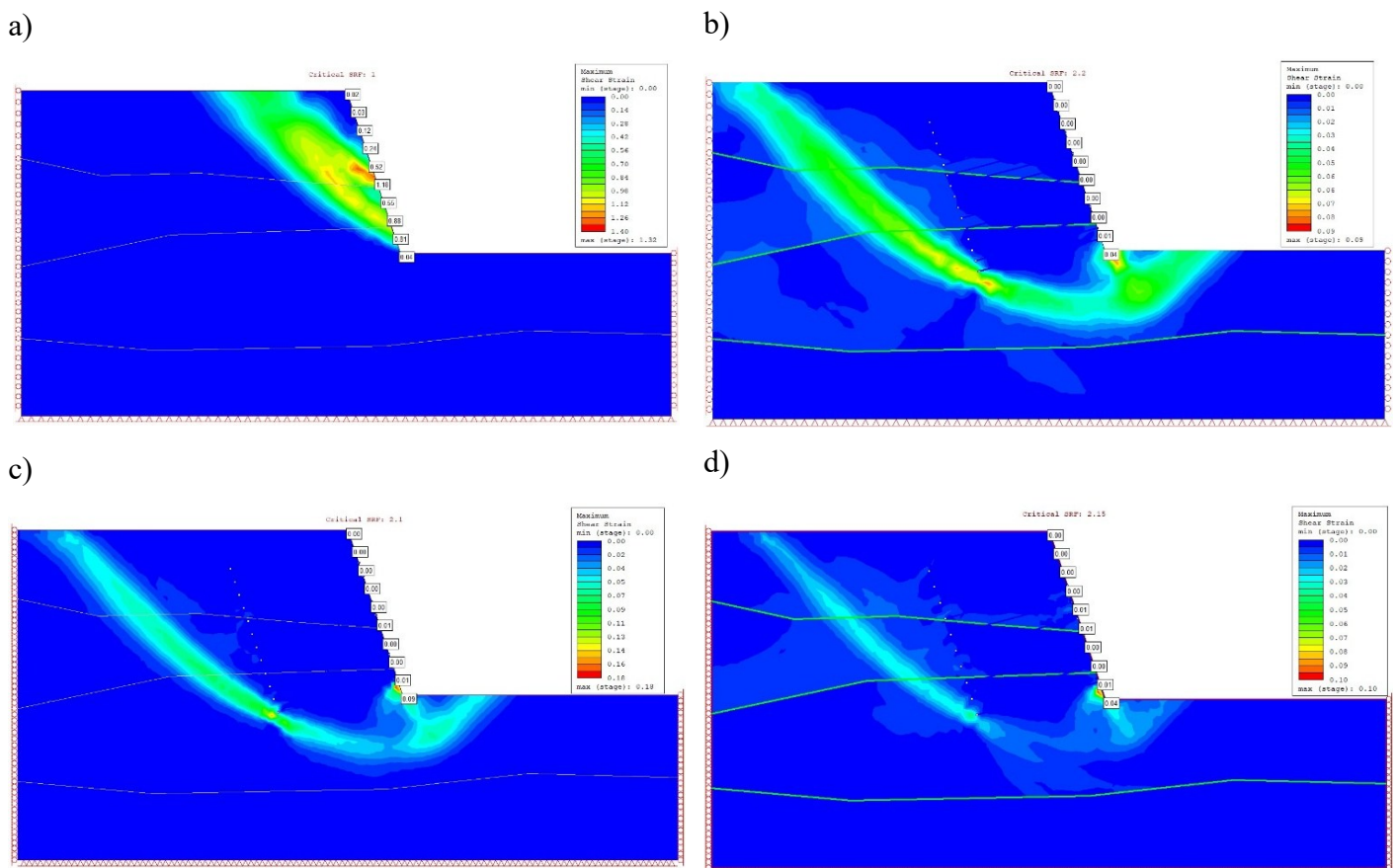
4.3 Análise da *Maximum Shear Strain*

A deformação máxima de cisalhamento, ilustrada na Figura 8, representa a superfície de cisalhamento do talude. Verifica-se que o modelo do talude instável (Figura 8a), apresenta os

maiores valores de cisalhamento, com boa concordância com a superfície de ruptura identificada no software Slide2. Nos modelos com solo grampeado em malha quadrada (Figura 8b, 8c e 8d, apresentam os seguintes espaçamentos $S_{v,h}=0,8m$, $S_{v,h}=1,0m$, $S_{v,h}=1,2m$, respectivamente), observa-se uma maior área mais extensa de deformação por cisalhamento, quando comparado ao modelo não reforçado.

A análise da Figura 8 permite verificar que os modelos com reforço em grampos apresentaram valores mais conservativos para a deformação máxima de cisalhamento, com a superfície de ruptura localizada ao interior do maciço em comparação ao talude instável.

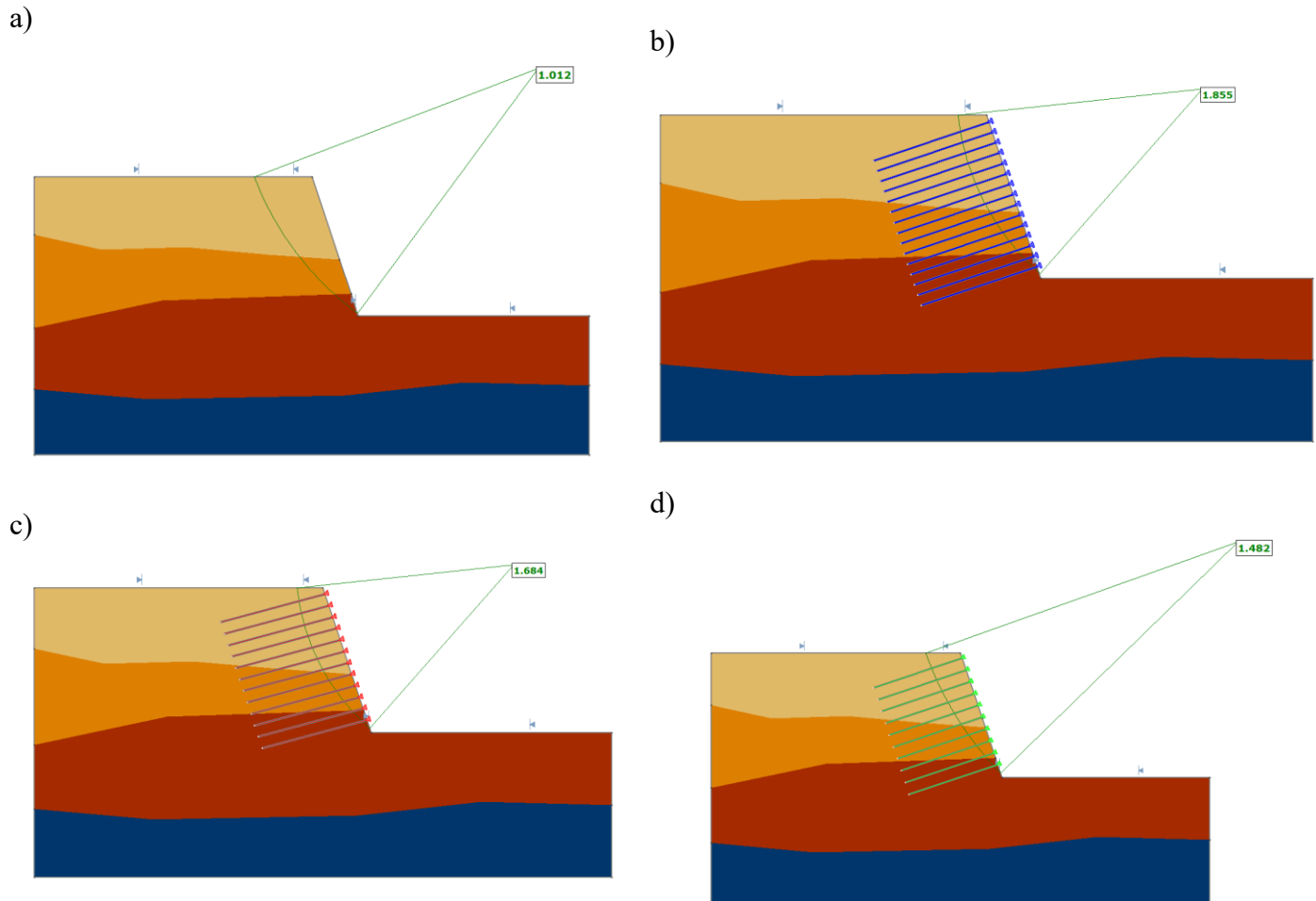
Figura 8. Resultado das deformações máximas de cisalhamentos: a) talude instável, b) grampeamento com $S_v=Sh=0,8m$, c) grampeamento com $S_v=Sh=1,0m$, d) grampeamento com $S_v=Sh=1,2m$.



Fonte: Autores (2025).

De acordo com a Figura 9, que apresenta os resultados obtidos pelo método do equilíbrio limite na mesma configuração da Figura 8, observa-se uma superfície de ruptura menos abrangente em relação àquela obtida pela análise de *Maximum Shear Strain*.

Figura 9. Superfícies de ruptura: a) talude instável, b) grampeamento com $S_v=Sh=0,8m$, c) grampeamento com $S_v=Sh=1,0m$, d) grampeamento com $S_v=Sh=1,2m$.



Fonte: Autores (2025).

Observa-se que, enquanto o talude instável (Figura 9a) apresenta a superfície de ruptura mais próxima à face do talude, os modelos reforçados (Figura 9b,c,d) mostram um deslocamento progressivo da zona de cisalhamento para o interior do maciço, com redução significativa nos valores de deformação.

4.4 Método equilíbrio limite *versus* *Shear Strength Reduction (SSR)*

Foram geradas superfícies de ruptura para cada tipo de talude, variando o espaçamento dos grampos ($S_{v,h}$). Os resultados dos deslocamentos horizontais ao longo do talude estão apresentados no gráfico da

Figura 10, que ilustra a variação dos deslocamentos em função dos diferentes espaçamentos adotados: $S_{v,h}=0,8m$, $S_{v,h}=1,0m$ e $S_{v,h}=1,2m$.

Para fins de comparação, foram adotados valores de SRF próximos ao FS obtidos na análise de equilíbrio limite, conforme a Tabela 5. Verificou-se que os resultados obtidos pelo método *Shear*

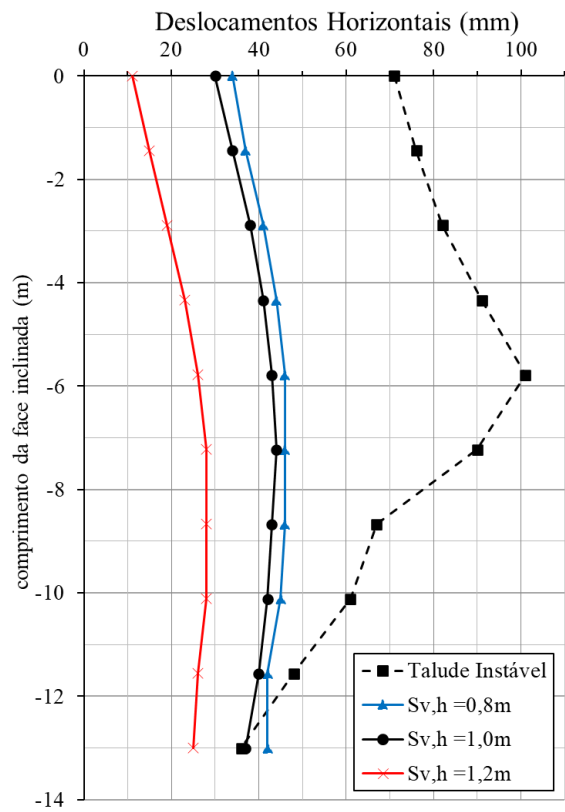
Strength Reduction (SSR) em relação ao Fator de Segurança (FS), evidenciam que menores espaçamentos entre grampos proporcionam maior estabilidade. Entretanto, os deslocamentos horizontais máximos, tiveram valores maiores à medida em que o espaçamento entre os grampos foi ampliado.

Tabela 5. Resumo dos valores de FS, SRF e deslocamentos.

Tipo de talude	Talude Instável	$S_{v,h} = 0,8m$	$S_{v,h} = 1,0m$	$S_{v,h} = 1,2m$
Equilíbrio Limite	1,01	1,85	1,68	1,48
SRF	1,01	1,80	1,70	1,50
Deslocamentos horizontais [mm]	101	50	47	28

Fonte: Autores (2025).

Figura 10. Deslocamentos horizontais com SRF variável.



Fonte: Autores (2025).

Observa-se que, no talude instável, o deslocamento máximo ocorre na região central, por volta dos 6m de altura, diminuindo em direção ao pé do talude (

Figura 10). Essa área coincide com uma possível zona de ruptura, evidenciada pela superfície crítica identificada na análise. Com a adição do reforço em solo grampeado, em todos os cenários analisados, houve redução dos deslocamentos na região central do talude, com concentração do deslocamento máximo deslocando-se para o pé do talude. Além disso, à medida que o espaçamento

entre os grampos aumenta, observa-se alteração no formato e na posição da superfície de ruptura. Nessa condição, o deslocamento máximo concentra-se no pé do talude, enquanto a região próxima à extremidade dos grampos apresentou deslocamentos pouco significativos.

A análise dos deslocamentos em taludes reforçados com solo grampeado permite compreender o comportamento do maciço e identificar zonas críticas de instabilidade. Ressalta-se, ainda, a importância da utilização de múltiplos métodos geotécnicos, o que possibilita comparações entre os resultados e contribui para um dimensionamento mais seguro e confiável.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco de avaliar a estabilidade de um talude 12 m de altura, reforçado com solo grampeado em malha quadrada e diferentes espaçamentos ($S_{v,h}=0,8\text{m}$, $S_{v,h}=1,0\text{m}$ e $S_{v,h}=1,2\text{m}$). Foram realizadas análises bidimensionais por meio dos softwares Slide2[®] e RS2[®], utilizando os métodos equilíbrio limite e Método dos Elementos Finitos. As simulações consideraram diferentes cenários operacionais, seguindo os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 16920-2:2021.

A análise gráfica mostrada, feitas tanto de equilíbrio-limite e elementos finitos, considerando os deslocamentos possíveis do talude, ambas se complementam. Dessa forma, pela análise observados no item 4.2, trata-se dos deslocamentos horizontais pelo SRF, demonstra que os valores da deformação aumentaram progressivamente com o aumento do espaçamento entre os grampos ($S_{v,h}$) e cumpriram com os parâmetros de verificação de deformação de taludes da FHWA (2015). Além disso, houve alteração no padrão de deslocamento, com pequeno aumento no pé do talude em todos os modelos para a essa mesma posição.

Os resultados obtidos demonstraram que a estabilidade do talude é significativamente influenciada pelo espaçamento dos grampos. As análises realizadas pelos métodos de equilíbrio limite e *Shear Strength Reduction* (SSR) quando analisados os valores de SRF próximos ao FS encontrados pelo método de equilíbrio limite indicaram deslocamentos horizontais maiores no modelo com espaçamento $S_{v,h}=0,8\text{ m}$, por sua vez, apresentaram comportamento distinto, com valores máximos reduzindo de 50 mm para 28 mm à medida que o espaçamento aumentou de 0,8 m para 1,2 m.

Em suma, a abordagem integrada dos métodos de equilíbrio limite e elementos finitos complementam-se e mostrou-se essencial para uma avaliação abrangente da estabilidade de taludes reforçados em solo grampeado de malha quadrada. Os resultados reforçam a necessidade de considerar tanto os fatores de segurança quanto os deslocamentos do maciço no

dimensionamento de contenções em solo grampeado, conforme preconizado pela ABNT NBR 16920-2:2021.

6 REFERÊNCIAS

- AMERATUNGA, Jay; SIVAKUGAN, Nagaratnam; DAS, Braja M. **Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-81-322-2629-1>.
- ASSIS, H. B.; GIACON JUNIOR, A. J.; NOGUEIRA, C. G. Implementação Em Planilha Eletrônica De Métodos De Equilíbrio Limite Para Análise De Estabilidade De Taludes. **GEOCENTRO: Implementação Em Planilha Eletrônica De Métodos De Equilíbrio Limite Para Análise De Estabilidade De Taludes**, [s. l.], p. 431–436, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16920-2 - Muros e Taludes em solos reforçados - Parte 2: Solos grampeados. Rio de Janeiro, 2021.
- DERGHOUM, Rabah; MEKSAOUINE, Mohamed. 3D numerical analysis of soil nailing in sedimentary soil with vertical inclusions. **International Journal of Geo-Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 15, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1186/s40703-021-00144-5>.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil Strength and Slope Stability**. 1. ed. [S. l.]: Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **FHWA-NHI-14-007 - Geotechnical Engineering Circular No. 7 - Soil Nail Walls - Reference Manual**. Washington: Federal Highway Administration, 2015.
- FINN, W. D. Liam. Earthquake Stability of Cohesive Slopes. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 1–11, 1966.
- FRANÇA, Fagner Alexandre Nunes. **Ensaio de arrancamento em solo grampeado em laboratório. Dissertação (Mestrado)**. 2007. 123 f. - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, [s. l.], 2007.
- GARCIA, Jean R.; ALBUQUERQUE, Paulo J. R.; MUCHETI, Alexsander Silva. Probabilistic and Deterministic Analysis of an Excavation Supported by Tiebacks and Nailing in Residual Soil of Gneiss. *In*: [S. l.: s. n.], 2019. p. 31–41. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-01884-9_3.
- GARCIA, Jean Rodrigo; MACHADO, Lucas Bellini. Análise probabilística da estabilidade de obras em solo grampeado considerando a relação entre qs e NSPT. *In*: , 2019. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 10.
- JAKY, J. The coefficient of earth pressure at rest. **Society of Hungarian Architects and**

- Engineering**, [s. l.], p. 355–358, 1944.
- KANG YAMING, YANG MINGCHENG, Hu Yanxiang. Análise híbrida da estabilidade de taludes usando o método de equilíbrio limite e o método dos elementos finitos. **China Mining**, [s. l.], 2006.
- KULHAWY, F.H.; MAYNE, P.W. **Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design**. New York: Electric Power Research Institute, 1990.
- LAZARTE, Carlos A. *et al.* **Geotechnical Engineering Circular N° 7 Soil Nail Walls - Reference Manual**. Washington, DC, USA: [s. n.], 2015.
- LI, C.H.; LIU, T.P.; WANG, H.Y.; XIE, Y.J. Research progress and prospect on slope stability analysis method. **Northeast Water Resources and Hydropower**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 63–65, 2020.
- MOHSEN, Farzi. The Effect of Nail Inclination Angle on Improving the Performance of Nailing System in Vertical Excavation. **Civil Engineering Research Journal**, [s. l.], v. 1, n. 3, 2017. Disponível em: <https://juniperpublishers.com/cerj/CERJ.MS.ID.555561.php>.
- ORTIGÃO, J. A. R. Solo, Ensaios de arrancamento para projetos de Grampeado. *In*: [S. l.]: ABMS, 1997.
- ORTIGÃO, J. A. R.; SAYAO, A. S. **Handbook of Slope Stabilisation**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2004.
- RANKINE, W.J.M. On the Stability of Loose Earth. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, [s. l.], v. 147, p. 9–27, 1857. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1857.0003>.
- ROCSCIENCE. **RS2 Documentation: Shear Strength Reduction Overview**. [S. l.], 2025.
- SPRINGER, F. O. **Ensaios de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss**. 2006. 301 f. - PUC-Rio, Rio de Janeiro, [s. l.], 2006.
- TEIXEIRA, A.H.; GODOY, N.S. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática**. São Paulo: Ed. Pini, 1996.
- TEIXEIRA, Alberto Henriques. Análise, Projeto e Execução de Fundações. *In*: , 1996, Rio de Janeiro: ABNT. **3o Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia PROJETO**. Rio de Janeiro: ABNT: ABMS, 1996. p. 1–18.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3. ed. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 1996-. ISSN 00137952.