



Eficiência de Malhas Escalonadas vs Quadradas em Escavações Verticais com Solo Grampeado: Análise de Estabilidade 3D

Tuã Chaves de Oliveira

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, tua.chaves@ufu.br

Jean Rodrigo Garcia

Professor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: A técnica de solo grampeado tem sido amplamente utilizada no Brasil, destacando-se por sua eficiência na estabilização de escavações verticais, adaptabilidade em espaços reduzidos e proteção de estruturas adjacentes. Nesse contexto, este estudo foca especialmente na aplicação dessa técnica em subsolos de edifícios, com ênfase na metodologia construtiva que utiliza malhas de grampos escalonadas e quadradas, visando otimizar a distribuição de tensões e a interação solo-reforço. Foram comparados o fator de segurança (FS) em diferentes configurações de análise, variando o método de cálculo, o tipo de malha utilizada e o formato da superfície de ruptura. Os resultados foram obtidos pelos métodos de Spencer e Janbu. Em ambos os casos, foram analisadas duas geometrias: a malha escalonada (ME) e a malha quadrada (MQ). A malha escalonada apresentou fatores de segurança ligeiramente superiores em malhas mais densas, sobretudo no método Spencer. Entretanto, à medida que se aumentou o espaçamento ($S_v = S_h$) de 0,8 m para 1,2 m, a malha quadrada se mostrou mais eficiente. Além do mais, notou-se que maiores espaçamentos resultam em menores fatores de segurança, indicando uma redução na interação entre os grampos. Conclui-se que tanto o tipo de malha quanto o método de cálculo estão diretamente relacionados à estabilidade, sendo Spencer mais sensível às variações dos parâmetros e Janbu mais estável nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Solo grampeado, equilíbrio limite, fator de segurança, escavação vertical, malha de grampos, estabilidade de taludes.

ABSTRACT: The soil nailing technique has been widely used in Brazil, standing out for its efficiency in stabilizing vertical excavations, adaptability in confined spaces, and protection of adjacent structures. In this context, the present study focuses specifically on the application of this technique in building basements, with emphasis on the construction methodology that employs staggered and square nail mesh configurations, aiming to optimize stress distribution and soil-reinforcement interaction. The factor of safety (FS) was compared under different analysis configurations, varying the calculation method, the type of mesh used, and the shape of the failure surface. The results were obtained using the Spencer and Janbu methods. In both cases, two geometries were analyzed: staggered mesh (ME) and square mesh (MQ). The staggered mesh showed slightly higher safety factors, especially with the Spencer method. However, as the spacing ($S_v = S_h$) increased from 0.8 m to 1.2 m, this difference decreased. Furthermore, it was observed that larger spacings resulted in lower safety factors, indicating a reduction in the interaction between nails. It is concluded that both the type of mesh and the calculation method are directly related to the overall stability, with the Spencer method being more sensitive to parameter variations and Janbu providing more stable results.

KEYWORDS: Soil nailing, limit equilibrium, factor of safety, vertical excavation, nail mesh, slope stability.

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de obras em áreas urbanas com espaços limitados tem incentivado o uso de técnicas de contenção eficientes, como o solo grampeado, amplamente utilizado na estabilização de escavações verticais e taludes, proporcionando rapidez e segurança. A técnica consiste na inserção de barras de aço revestidas com calda de cimento no interior do solo, a fim de obter uma estrutura de reforço passivo que atua em conjunto com o concreto projetado aplicado sobre o paramento (França, 2007). Por obter um equilíbrio entre versatilidade e desempenho, o solo grampeado tem sido amplamente adotado no Brasil e no mundo, especialmente para a contenção de escavações em áreas densamente ocupadas.

O funcionamento e a eficiência do sistema de solo grampeado estão diretamente relacionados à interação entre o solo e os grampos, que por sua vez podem variar suas geometrias e disposição. Configurações de malhas distintas influenciam a distribuição de tensões e, conseqüentemente o desempenho global da contenção. A escolha adequada da malha, malha escalonada (ME) ou malha quadrada (MQ), do ponto de vista estrutural oferece uma melhor distribuição das tensões no maciço, aumenta a interação entre o solo e o elemento de reforço, melhorando a estabilidade e segurança do conjunto. Além disso, uma malha bem dimensionada permite melhor aproveitamento dos materiais e uma maior produtividade, contribuindo para a eficiência do cronograma e para a viabilidade econômica da obra.

A análise tridimensional foi essencial neste estudo devido à complexidade geométrica da malha escalonada. Enquanto a malha quadrada pode ser adequadamente representada em modelos bidimensionais, como no Slide 2, por meio da extrusão do perfil com espaçamento constante no eixo de perfuração, a malha escalonada possui uma disposição intercalada entre os níveis de grampos, o que inviabiliza sua representação fiel em 2D. Embora o talude analisado, por suas características, indicasse inicialmente que uma análise bidimensional seria suficiente, o objetivo desta investigação foi justamente identificar se a diferença entre os arranjos de malha gera efeitos significativos no comportamento global do sistema. Assim, a modelagem tridimensional no Slide 3 permitiu simular ambas as geometrias com maior realismo e avaliar comparativamente sua influência na estabilidade da escavação.

Com isso, o presente trabalho analisou a influência da geometria da malha de grampos na estabilidade de escavações de subsolos de edifícios, isto é, taludes a 90°. Comparando os fatores de segurança obtidos com o uso de malhas escalonadas e quadradas e seu comportamento à variação do espaçamento entre os grampos. Para isso, foram realizadas simulações numéricas no Software Slide 3 da Rocscience utilizando o método do equilíbrio limite com os critérios de Spencer e Janbu.

2 MODELO DE ANÁLISE

2.1 Características do Solo e dos grampos

Uma análise preliminar foi realizada considerando um talude vertical (90°), com 12 metros de altura, na condição sem reforço por elementos de contenção, as características geotécnicas indicaram uma situação de instabilidade global (Figura 1), evidenciando a necessidade de aplicação da técnica do solo grampeado para oferecer estabilidade ao maciço durante o processo de escavação.

Portanto, tornou-se imprescindível a aplicação da técnica para elevar o fator de segurança, garantindo que o talude se enquadre nos requisitos de segurança essenciais para uma área urbana. Fixou-se a inclinação do grampo em 15 graus em relação à horizontal, conforme prática recomendada por Clouterre (1991) e Lazarte *et al.* (2015) que indicam ângulos entre 10° e 20° como ideias para garantir boa mobilização de esforços e facilitar a execução. Posteriormente, foi realizado um pré-dimensionamento dos grampos injetados com base nas recomendações de Bruce; Jewell (1986), que indicam a adoção da razão L/H entre 0,5 e 0,8. Considerando a escavação vertical de 12 metros, foi adotado o comprimento dos grampos de 9 metros.

O perfil do terreno do local de análise é composto por quatro camadas de solo, predominantemente arenosas, ilustrado na Tabela 1.

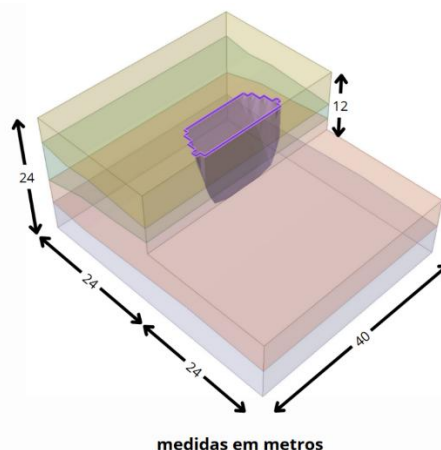


Figura 1. Talude Instável (Autores).

Inicialmente, obteve-se o N_{SPT} das camadas por meio de um ensaio de sondagem a percussão (SPT), e posteriormente, determinados os parâmetros do solo como peso específico (γ) e a coesão (c) utilizando valores médios propostos por Joppert (2007) e suas correlações. Por fim, para determinação completa dos parâmetros geotécnicos (Tabela 1) estimou-se o ângulo de atrito (ϕ), utilizando como base a equação proposta por Teixeira & Godoy (1998):

$$\phi = \sqrt{20 \times N_{SPT}} + 15 \quad (1)$$

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos das camadas de solo (Autores).

Camada	N_{SPT} médio	ϕ (°)	c (kPa)	γ (kN/m ³)
Argila-Arenosa	4,0	23,9	15	17
Argila-Arenosa*	8,6	28,1	25	18
Argila-Arenosa**	10,7	29,6	30	18
Areia-Argilosa	18,5	34,2	30	19

Para dimensionamento dos grampos, adotaram-se barras de aço CA-50 com 20 mm de diâmetro e perfuração de 100 mm. Com isso, foi obtido a resistência à tração de cálculo do grampo (R_{td}) por meio da equação (2):

$$R_{td} = f_{yd} \times A_{\text{útil}} \quad (2)$$

Onde:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ (Resistência de cálculo à tração do aço, } \gamma_s = 1,15 \text{)}$$

$A_{\text{útil}}$: Área da seção da barra de aço descontada a espessura de sacrifício por corrosão, que de acordo com ABNT NBR 16920:2021 equivale a 0,6 mm.

A interação solo-grampo foi avaliada por meio da resistência de aderência (q_s), estimada com base nos valores de N_{SPT} utilizando correlações semiempíricas propostas por Ortigão (1997); Ortigão & Sayao (2004); Springer (2006). A força de aderência unitária (t), correspondente à resistência por metro linear do grampo, foi calculada pela multiplicação do q_s crítico fornecido a partir das correlações pelo perímetro do furo, conforme equação (3). Os valores obtidos foram utilizados como parâmetros para os modelos numéricos analisados neste estudo.

$$t = q_s \times \pi D \quad (3)$$

Onde: D é o diâmetro nominal do grampo, em metros

3 METODOLOGIA

3.1 Métodos de Análise

Foram adotados dois métodos de equilíbrio limite de diferentes complexidades: Janbu, mais simples e adequado para análises preliminares por sua rapidez e baixa sensibilidade aos parâmetros; e Spencer, mais preciso por considerar o equilíbrio simultâneo de forças e momentos, embora com maior tempo de processamento. A utilização conjunta permite uma análise equilibrada entre praticidade e rigor, ampliando a confiabilidade dos resultados.

3.2 Estruturação da Análise

Este estudo adotou um fluxograma que relaciona o método de cálculo do fator de segurança, o algoritmo de busca e o tipo de superfície de ruptura (Figura 2). Optou-se pelos métodos de Janbu e Spencer, combinados

exclusivamente ao algoritmo metaheurístico *Cuckoo Search*, que explora iterativamente o espaço de busca com base em princípios estocásticos. Essa escolha favorece a identificação de superfícies mais realistas e garante uniformidade na comparação entre os métodos, eliminando interferências decorrentes da variação do algoritmo de busca.

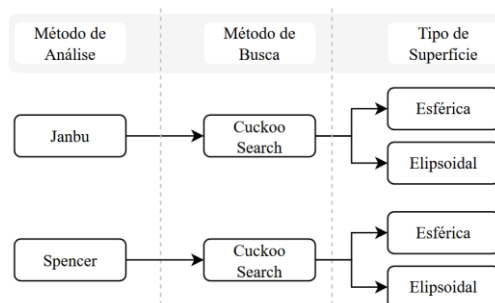


Figura 2. Fluxograma de Análise (Autores).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Malha Quadrada

Com o objetivo de estabilizar o talude original (Figura 1), adotou-se inicialmente a malha quadrada, disposição convencional amplamente utilizada em contenções com solo grampeado. Os grampos foram distribuídos conforme a Figura 3, com três espaçamentos distintos ($S_v = S_h = 0,8 \text{ m}$; $1,0 \text{ m}$; $1,2 \text{ m}$), sendo realizadas simulações para cada configuração, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 2. Essa etapa permitiu avaliar a influência do espaçamento entre grampos, bem como a sensibilidade dos métodos Janbu e Spencer à variação da densidade de reforço, servindo também de base comparativa para a malha escalonada (Figura 7).

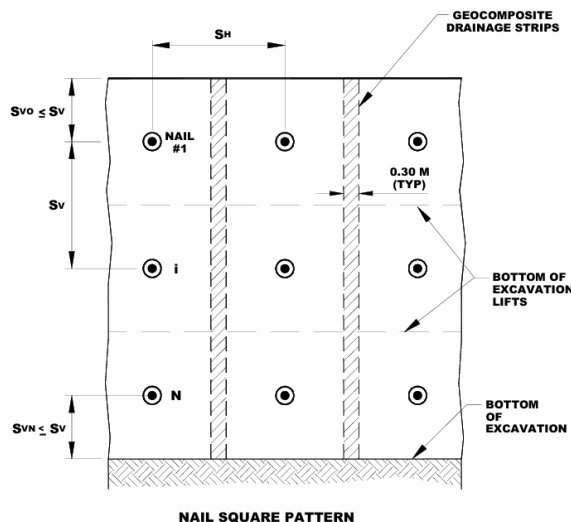


Figura 3. Disposição dos grampos na Malha Quadrada (Lazarte et al., 2015).

A análise inicial com a malha quadrada teve como foco a coerência geométrica das superfícies de ruptura geradas, de modo a garantir representatividade dos mecanismos reais de instabilidade. Para isso, compararam-se simulações com configurações-padrão e refinadas do algoritmo *Cuckoo Search*, observando-se a compatibilidade das superfícies obtidas com o comportamento esperado do maciço, bem como a variação dos fatores de segurança (FS). Foram selecionadas, para cada caso, as superfícies mais coerentes, assegurando maior fidelidade ao modelo.

Os resultados indicam que o FS diminui com o aumento do espaçamento entre grampos, devido à redução da densidade de reforço e da interação solo-grampo (Figura 6). Nota-se ainda que os métodos de Spencer, sobretudo com superfícies esféricas, fornecem FS mais elevados. Isso se deve à geometria simétrica dessas superfícies, que tendem a interceptar maior número de grampos, especialmente quando há sobreposição

das áreas de influência, favorecendo a mobilização da resistência por aderência. Já as superfícies elipsoidais, embora mais realistas, resultam em FS menores, pois envolvem menor volume de solo resistente e permitem trajetórias de ruptura mais flexíveis.

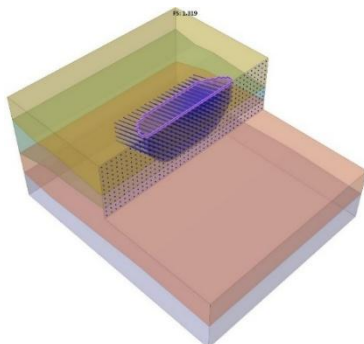


Figura 4. Superfície crítica - Janbu - Malha Quadrada - $S_v = S_h = 1,0$ m (Autores).

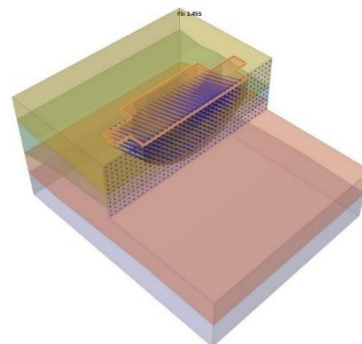


Figura 5. Superfície crítica - Spencer - Malha Quadrada - $S_v = S_h = 1,0$ m (Autores).

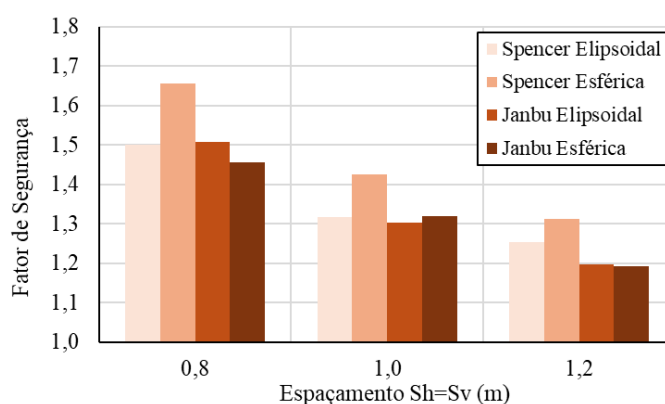


Figura 6. Fatores de Segurança – Malha Quadrada (Autores).

4.2 Malha Escalonada

Para aprofundar a análise do desempenho do solo grampeado, avaliou-se a malha escalonada configuração alternativa com disposição intercalada dos grampos entre camadas (Figura 7). Essa geometria favorece a sobreposição das zonas de influência, potencializando a interação solo-reforço. As simulações seguiram a mesma metodologia aplicada à malha quadrada, conforme o fluxograma (Figura 2), adotando os mesmos espaçamentos verticais (S_v) e horizontais (S_h).

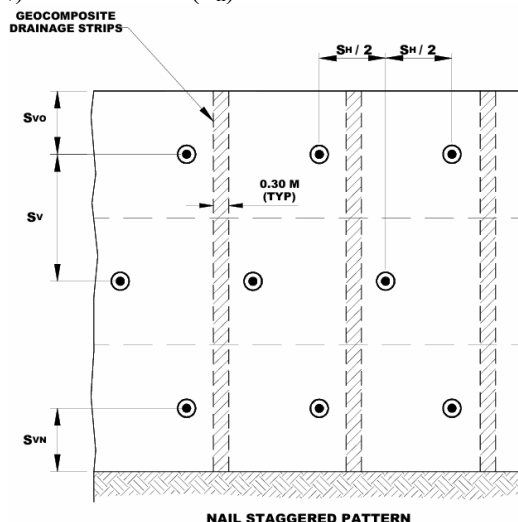


Figura 7. Disposição dos grampos na Malha Escalonada (Lazarte et al., 2015).

Assim como na malha quadrada, os resultados da malha escalonada seguiram os critérios de coerência das superfícies de ruptura e variabilidade dos fatores de segurança (FS). No entanto, a geração de superfícies coerentes nesse caso exigiu atenção ao número de lamelas utilizadas na discretização da massa de solo. Para isso, adotou-se a variação progressiva do número de colunas nas direções X e Y, buscando o equilíbrio entre o refinamento da malha de cálculo e o tempo de processamento. Essa estratégia foi adotada para garantir a distribuição adequada das forças ao longo da superfície crítica e evitar distorções geométricas que comprometessem a interpretação dos resultados.

A análise mostrou que o aumento do espaçamento entre os grampos reduz o fator de segurança (FS) em todos os casos, independentemente do método adotado, devido à menor densidade de reforço e, conseqüentemente, à redução da estabilidade, comportamento semelhante ao observado na malha quadrada. No entanto, diferentemente da disposição quadrada, os resultados com o método de Spencer apresentaram inversões: em $S_h = S_v = 0,8$ m, a maior FS foi obtida com superfície elipsoidal; já em $S_h = S_v = 1,0$ m, com superfície esférica (Figuras 8 e 9). Essa mudança indica que, embora mais preciso, o método de Spencer é mais sensível a variações geométricas e à distribuição assimétrica da malha escalonada.

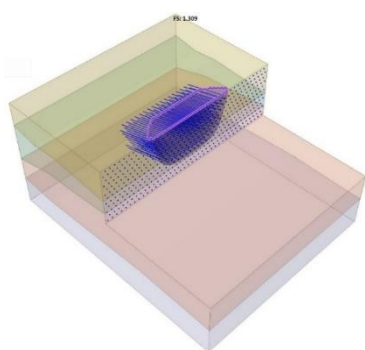


Figura 8. Superfície crítica - Janbu - Malha Escalonada - $S_v = S_h = 1,0$ m (Autores).

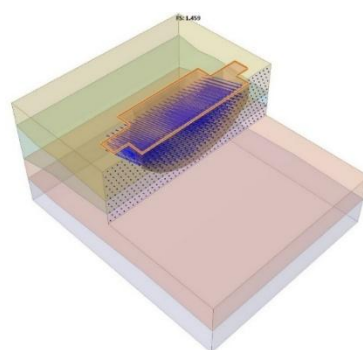


Figura 9. Superfície crítica - Spencer - Malha Escalonada - $S_v = S_h = 1,0$ m (Autores).

Acredita-se que essa variação ocorre devido a distribuição assimétrica dos grampos na malha, onde a superfície elipsoidal em espaçamentos reduzidos, por sua flexibilidade geométrica, se ajusta com precisão às regiões de maior concentração de grampos, onde há sobreposição entre os níveis de reforço, aumentando a estabilidade do modelo. No entanto, para espaçamentos maiores, a redução da densidade dos grampos compromete essa sobreposição, e a superfície elipsoidal passa a identificar trajetórias mais críticas, refletindo em menores FS (Figura 10). Por outro lado, a superfície esférica, devido a sua rigidez geométrica, continuou interceptando um número significativo de grampos, mesmo em malhas mais abertas, o que explica o aumento do FS em espaçamentos maiores. Esse comportamento evidencia como a interação entre a geometria da malha e a forma da superfície crítica de ruptura pode influenciar nos resultados obtidos.

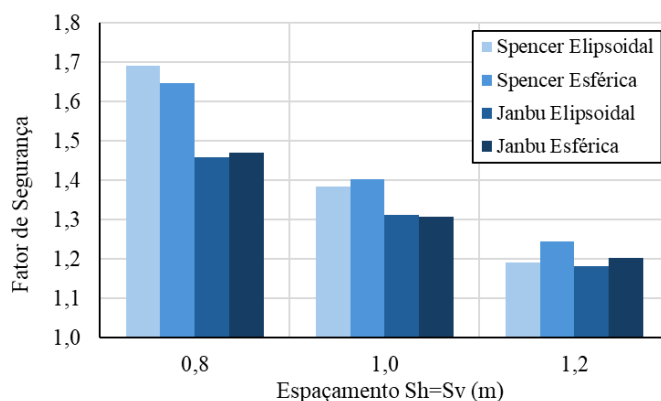


Figura 10. Fatores de Segurança – Malha Escalonada (Autores).

4.3 Comparação entre os tipos de malha (Malha Quadrada vs Malha Escalonada)

Por fim, com o objetivo de avaliar a influência de disposição geométrica dos grampos na estabilidade de taludes verticais, realizou-se a comparação dos resultados processados em ambas as malhas: a malha quadrada (MQ) e a malha escalonada (ME). Com isso, será possível compreender como a variação no arranjo espacial dos grampos afeta o desempenho global do sistema de reforço. A partir das análises, buscou-se identificar padrões de comportamento, ganhos de eficiência e limitações associadas a cada configuração de malha, a fim de oferecer subsídios técnicos para auxiliar na definição do melhor tipo de malha a ser utilizado em cada situação, a depender das particularidades de projeto e condicionantes geotécnicos.

4.3.1 Análise comparativa dos resultados com o método Janbu

O método de Janbu, por ser simplificado, mostrou menor sensibilidade às alterações do modelo, como a disposição dos grampos introduzida pelos tipos de malha e a geometria da superfície de ruptura, resultando em fatores de segurança (FS) com variações sutis (Figura 11).

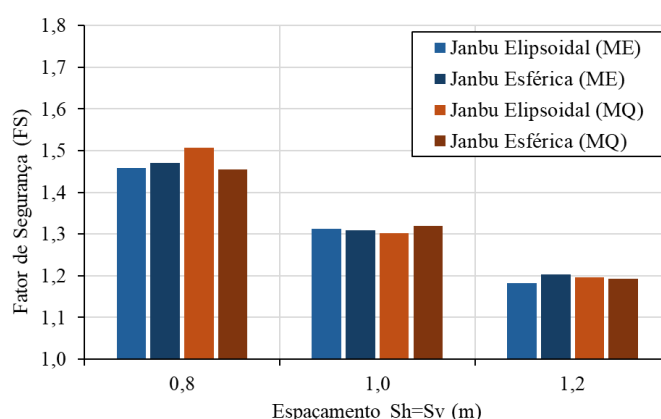


Figura 11. Comparação entre os Fatores de Segurança das malhas – Método Janbu (Autores).

Essa estabilidade, por sua vez, deve ser interpretada com cautela, já que pode suavizar efeitos estruturais significativos em modelos com maior complexidade. Entretanto, ainda sim, é possível notar o decréscimo do fator de segurança à medida que se aumentou o espaçamento. Em geral, os resultados foram muito próximos evidenciando a limitação do método em refletir a influência da configuração da malha sobre a estabilidade global do conjunto.

4.3.2 Análise comparativa dos resultados com o método Spencer

O método Spencer, por sua vez, resultou em diferenças mais pronunciadas nas configurações, evidenciando a sensibilidade do método às variações impostas, o que comprova a complexidade da análise (Figura 12).

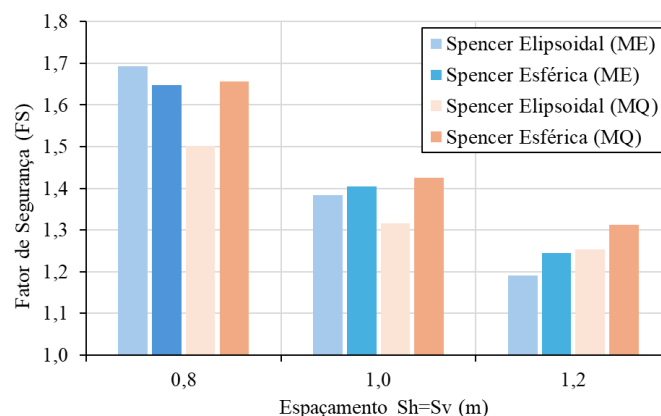


Figura 12. Comparação entre os Fatores de Segurança das malhas – Método Spencer (Autores).



Os resultados, em geral, apresentam valores de Fator de Segurança (FS) mais elevados em ambas as malhas, em comparação com o método de Janbu, indicando sua maior capacidade de mobilizar a resistência do sistema de solo-grampeado de forma precisa, principalmente em malhas mais densas. Observou-se a maior eficiência da malha escalonada (ME) em espaçamentos reduzidos, sobretudo combinada à superfície elipsoidal. Entretanto, à medida que se aumentou as distâncias entre os grampos, a malha quadrada (MQ) mostrou-se mais eficiente, com valores de segurança superiores. O que pode estar relacionado com a sobreposição das áreas de influência dos reforços em malhas escalonadas mais densas, que perde essa sobreposição efetiva em malhas mais espaçadas, gerando lacunas entre os níveis de grampos. Essa análise destaca como a disposição dos grampos influencia no desempenho estrutural da contenção, reforçando a importância de levar em consideração o método de cálculo, o tipo de malha e de superfície de ruptura na escolha do sistema mais adequado para a situação de projeto.

5 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a estabilidade de escavações verticais com solo grampeado depende fortemente da configuração da malha de grampos, do espaçamento adotado e do método de cálculo utilizado. Observou-se que o aumento do espaçamento de 0,8 m para 1,2 m resultou em uma redução média de 27% no fator de segurança (FS), evidenciando a perda de eficiência com a diminuição da densidade de reforço.

A malha escalonada apresentou desempenho superior em malhas mais densas, com FS até 13% maiores em relação à malha quadrada. No entanto, em espaçamentos mais amplos, a malha quadrada superou a escalonada em até 10%, beneficiando-se de sua disposição regular. Quanto aos métodos de análise, o método de Spencer forneceu FS até 15% superiores aos de Janbu, embora com maior sensibilidade a variações geométricas.

Esses resultados reforçam a necessidade de considerar, de forma integrada, o arranjo geométrico, a densidade de grampos e o método de cálculo na escolha do sistema de contenção, buscando soluções que aliem segurança estrutural e racionalidade técnica.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Universidade Federal de Uberlândia pela aquisição da licença de uso do software SLIDE 3, da Rocscience, utilizado na realização deste artigo e da pesquisa que o originou. Agradece-se também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à Iniciação Científica..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 16920-2 - Muros e Taludes em solos reforçados - Parte 2: Solos grampeados*.
- Bruce, D. A., & Jewell, R. A. (1986). Soil nailing: Application and practice – Part 1. *Ground Engineering*, 19(8), 10–15.
- Clouterre. (1991). *Recommendations Clouterre 1991*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Presses de l'ENPC.
- França, F. A. N. (2007). *Ensaio de arrancamento em solo grampeado em laboratório. Dissertação (Mestrado)*. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Joppert Jr., I. (2007). *Fundações e Contensões de Edifícios - qualidade total na gestão do projeto e execução* (1st ed.). Pini Ltda.
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., & Berg, R. (2015). *Geotechnical Engineering Circular N° 7 Soil Nail Walls - Reference Manual*.
- Ortigão, J. A. R. (1997). *Solo, Ensaio de arrancamento para projetos de Grampeado*. ABMS.
- Ortigão, J. A. R., & Sayao, A. S. (2004). *Handbook of Slope Stabilisation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Springer, F. O. (2006). *Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss*. PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Teixeira, A. H., & Godoy, N. S. de. (1998). Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. In C. S. C. e S. N. Waldemar Hachich, Frederico F. Falconi, José Luiz Saes, Régis G. Q. Frota (Eds.), *Fundações: teoria e prática* (2nd ed.). PINI.