

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/183

Avaliação da utilização de solo reforçado com grampo na estabilização de um talude de escavação composto por solo arenoso

Marcos Túlio Fernandes

Engenheiro Geotécnico, Progen, Nova Lima, Brasil, marcostuliofernandes@hotmail.com

Glaucimar Lima Dutra Fernandes

Analista de Gestão de Riscos, Vale, Itabira, Brasil, galdutra@hotmail.com

Thiago Bomjardim Porto

Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica, Curvelo, Brasil, thiago.porto@cefetmg.br

RESUMO: Técnicas de reforço de solos, como a de solo grampeado, têm ganho cada vez mais espaço na estabilidade de taludes urbanos, devido à metodologia de execução garantir a estabilização do talude durante o processo de escavação. Visto a grande aplicação desta técnica no meio geotécnico, o presente trabalho tem por finalidade avaliar a aplicação da técnica de solo grampeado na estabilização de um talude composto por solo arenoso, com foco na análise da influência das propriedades do solo e, principalmente, da tensão de adesão do grampo no fator de segurança. O estudo foi realizado em uma obra localizada no bairro Bom Retiro, avenida Usiminas, na cidade de Ipatinga-MG. O reforço teve como objetivo estabilizar o talude de escavação do terreno para a construção de um estacionamento. Para esta obra foram realizados ensaios de arrancamento em grampos que reportaram valores de tensão de adesão de 32,82, 39,30 e 58,10 kPa, quando executados com somente bainha, uma etapa de injeção e duas etapas de injeções, respectivamente. A partir das análises realizadas no software Slide 2D da Rocscience, foi possível constatar que os fatores de segurança recomendados em norma somente seriam atingidos com a execução dos grampos com preenchimento da bainha e duas etapas de injeção, demonstrando a importância de ensaios prévios para a definição das tensões de adesão a serem empregadas no projeto. Constatou-se com as análises probabilísticas que, embora não se tenha atingido os fatores de segurança recomendados, as demais soluções de execução dos grampos refletiram em probabilidades de falha da contenção que tendem a zero.

PALAVRAS-CHAVE: Solo grampeado, Estabilidade de taludes, Tensão de adesão, Contenções em centros urbanos

ABSTRACT: Soil reinforcement techniques, such as soil nailing, have been gaining more and more prominence in the stability of urban slopes, due to the execution methodology ensuring slope stabilization during the excavation process. Given the widespread application of this technique in the geotechnical field, this paper aims to evaluate the application of soil nailing in stabilizing a slope composed of sandy soil, focusing on analyzing the influence of soil properties and primarily the bond stress of the nail on the safety factor. The study was conducted at a site located in the Bom Retiro neighborhood, Usiminas avenue, in the city of Ipatinga-MG. The reinforcement aimed to stabilize the excavation slope for the construction of a parking lot. For this project, pull-out tests on nails were conducted, yielding bond stress values of 32.82, 39.30, and 58.10 kPa, when executed with only grout, one grout injection stage, and two grout injection stages, respectively. Through analyses performed in Rocscience's Slide 2D software, it was found that the recommended safety factors according to standards would only be achieved with the execution of nails filled with grout and two grout injection stages, highlighting the importance of preliminary tests to define the bond stresses to be used in the design. Probabilistic analyses revealed that although the recommended safety factors were not achieved, the other nail execution solutions resulted in containment failure probabilities approaching zero.

KEYWORDS: Soil nailing, Slope stability, Bond stress, Urban containment walls.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção são elementos essenciais para várias obras e projetos de engenharia como rodovias, pontes, ferrovias, prédios, usinas, barragens, etc., tendo como objetivo fornecer suporte para o maciço do solo ou rocha, visando impedir a ruptura ou escorregamentos, promovendo assim a estabilidade (Ehrlich e Becker, 2009). O emprego da técnica de solo grampeado começou há cerca de 5.000 anos, porém os materiais empregados na execução destas obras eram mais rústicos como esteiras de cana e galhos (Mitchell e Villet, 1987). No Brasil, este método de reforço começou a ser utilizado como suporte de túneis e galerias escavadas, sendo a técnica conhecida como *New Austrian Tunneling Method* (NATM). A primeira obra executada no Brasil data de 1966, em que o solo grampeado foi utilizado para promover a estabilização de um talude da barragem de Chavantes, no estado de São Paulo, em que, como material estabilizador, utilizaram-se chumbadores curtos, concreto projetado e tela metálica (Abramento *et al.*, 1998).

A construção de um reforço de solo grampeado consiste na escavação do talude, perfuração dos grampos e injeção de caldas de cimento. Os grampos são confeccionados em linhas e são mobilizados após o maciço de solo se deformar, promovendo a estabilidade do talude. Esta é considerada uma técnica passiva de reforço, pois somente atua após a mobilização dos esforços gerados pelos deslocamentos.

No Brasil a norma que orienta sobre a aplicação desta técnica é a NBR 16920-2 (ABNT, 2021). Para o dimensionamento e execução da técnica de solo grampeado é também recorrente a utilização das recomendações de Clousterre (1991).

Tendo em vista a grande vantagem deste método, principalmente por possibilitar a estabilização dos taludes à medida que se avança com as escavações, neste trabalho será apresentado a aplicação deste método na estabilização de um talude arenoso, com foco na avaliação da influência da tensão de adesão (q_s) e variabilidade dos parâmetros do solo no fator de segurança e probabilidade de falha do talude.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na cidade de Ipatinga, no bairro Bom Retiro, Av. Usiminas. O proprietário do imóvel desejava realizar a construção de uma garagem no subsolo, tendo solicitado os serviços de contenção de um talude com inclinação de 90° e altura aproximada de 3,00 m.

2.2 Caracterização da área de estudo

Para determinar as propriedades do solo em estudo, foram realizados ensaios do tipo Standard Penetration Test (*SPT*) até a profundidade de 20 m. Observou-se que o solo presente no local é composto por areia média, de cor amarela, pouco argilosa, que se estendia até a profundidade de 11,20 m. A partir desta cota, o solo passa a ser composto por uma areia média de cor amarela, com presença de pedregulho grosso. Na Figura 1 é apresentado o perfil típico do talude e os resultados do *SPT*. Ressalta-se que o nível d'água inicial foi encontrado abaixo de 6,00 metros de profundidade, contudo, devido ao fechamento do furo, não foi possível medir o nível de água após 24 horas. Cabe ressaltar que, após as etapas de escavação, não foi encontrado o nível de água aflorando na superfície.

Para o dimensionamento das estruturas de reforço, é necessário determinar algumas propriedades do solo como: ângulo de atrito, coesão e peso específico do solo. A estimativa dos parâmetros do solo foi feita de forma semiempírica. A determinação do ângulo de atrito (φ) foi feita por meio da formulação de Godoy (1983), descrita na Equação 1:

$$\varphi = 28^\circ + 0,4N_{SPT} \quad (1)$$

Sendo: N_{SPT} = valor médio de resistência a penetração.

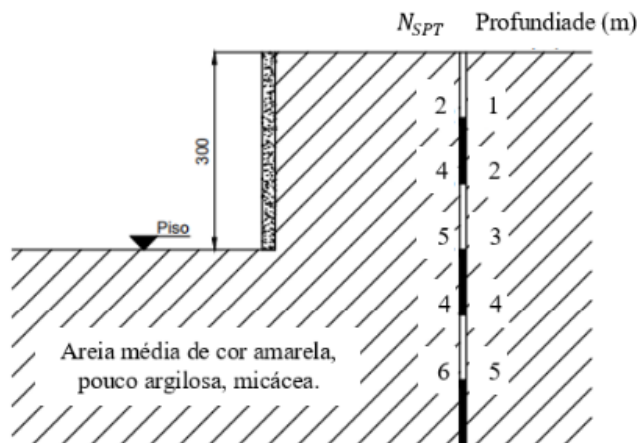


Figura 1. Perfil de sondagem.

O peso específico do solo foi determinado pela Tabela 1, elaborada por Godoy (1972).

Tabela 1. Peso específico de solos arenosos, Godoy (1972).

| N_{spt} | Compacidade | Peso específico (kN/m ³) | | |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------|-------|----------|
| | | Areia seca | Úmida | Saturada |
| <5 | Fofa | | | |
| 5-8 | Pouca Compacta | 16 | 18 | 19 |
| 9-18 | Medianamente Compacta | 17 | 19 | 20 |
| 19-40 | Compacta | 18 | 20 | 21 |
| >40 | Muito Compacta | | | |

Embora o solo possua uma pequena parcela de coesão, ela foi desprezada, por se tratar de uma coesão aparente, devido à sucção, podendo em um caso de saturação do solo chegar a zero. Considerando um valor médio de N_{SPT} de 3,75 na região de interesse, obtém-se valores de ângulo de atrito da ordem de 29°, contudo, sendo mais conservador, adotou-se o valor de 28°. Desta forma, foram aplicados nas análises os valores médios de peso específico de 18 kN/m³, ângulo de atrito de 28° e intercepto coesivo de 0. Como a variabilidade dos parâmetros geotécnicos pode ser grande, conforme destacado por Duncan (2000), foram realizadas análises para verificar a influência da variabilidade dos parâmetros nos fatores de segurança. Os parâmetros utilizados nestas análises podem ser vistos na Tabela 2.

Os valores máximos e mínimos relativos referem-se aos limites das curvas de distribuição de cada variável. Estes valores foram definidos considerando que 99,7% do espaço amostral de uma distribuição normal estão compreendidos no intervalo de ± 3 desvios padrões da média. Para os parâmetros de peso específico e ângulo de atrito, os desvios padrões foram definidos considerando coeficientes de variação de 3,70 e 3,57%, valores estes que estão nos intervalos apresentados por Harr (1984), Kulhawy (1992) *apud* Duncan (2000). Para a coesão, foi adotado um valor de máximo relativo de 3 kPa, considerando a hipótese de se ter uma coesão aparente no material.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas análises.

| Parâmetro | Tipo de distribuição | Valor médio | Desvio padrão | Máximo relativo | Mínimo relativo |
|--------------------------------------|----------------------|-------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Peso específico (kN/m ³) | Normal | 18,00 | 0,67 | 2,00 | 2,00 |
| Coesão (kPa) | Lognormal | 0,00 | 1,00 | 3,00 | 0,00 |
| Ângulo de atrito (°) | Normal | 28,00 | 1,00 | 3,00 | 3,00 |

2.2 Dimensionamento da estrutura de solo grampeado

2.1.1 Determinação da tensão de adesão (q_s)

Para determinar a tensão de adesão, foram confeccionados cinco grampos, sendo estes, um com a injeção somente da bainha, dois com bainha e uma reinjeção e outros dois com a injeção da bainha e duas reinjeções. A perfuração dos grampos foi realizada com trado manual de 100 mm, pois uma perfuração mecânica poderia gerar o fechamento do fuste, por se tratar de um solo arenoso. Os grampos possuem comprimento de cinco metros e foram utilizadas barras de aço de 20 mm CA-50 com comprimento de 6 metros na montagem. O comprimento adicional de um metro da barra serve para o acoplamento do macaco hidráulico, responsável pela aplicação da carga e rompimento do grampo.

Ao longo da barra de aço foram acoplados tubos de PVC de diâmetro de 25 mm e nestes criados furos com espaçamento de 1 m, também chamados de válvulas de injeção, conforme visto na Figura 2. Estas válvulas são previstas para o processo de reinjeção (segunda injeção) de calda de cimento nos grampos, garantindo o preenchimento dos vazios causados pela exsudação da calda de cimento e uma melhor ancoragem do grampo. Para cada etapa de injeção foi necessário um tubo e o mesmo não foi retirado após a operação.

A calda de cimento utilizada possui fator água cimento de 0,75 e foi empregado cimento CP II-E-32. O enchimento da bainha foi realizado com uma bomba de 1CV, sob baixa pressão, até completar perfeitamente os vazios no furo. As demais injeções foram executadas em intervalos de tempo, a primeira quatro 4 horas após a execução da bainha e a segunda 12 horas. Após a cura dos grampos foi realizado o ensaio de arrancamento. A carga foi aplicada por meio de um macaco hidráulico com capacidade de 50 toneladas.



Figura 2. Montagem das barras com os centralizadores e tubos de injeção.

Na Tabela 3 estão expostos os resultados dos ensaios. Cabe destacar que os valores apresentados foram bem inferiores ao que se esperava alcançar. Como exemplo, caso fosse utilizada a equação proposta por Ortigão (1997), considerando um valor médio de N_{SPT} de 4, teríamos tensão de adesão da ordem de 80 kPa.

Tabela 3. Resultado dos Ensaio de Arrancamento dos Grampos.

| Quant. de Injeções | Grampo | q_s (kPa) | $q_{s,méd}$ (kPa) |
|---------------------------|--------|----------------|----------------------|
| Bainha | 4 | 32,82 | 32,82 |
| Bainha mais 1 injeção | 1 2 | 29,94 48,65 | 39,3 |
| Bainha mais 2 injeções | 3 5 | 48,65 67,36 | 58,1 |

2.1.1 Pré-dimensionamento dos grampos

Para realizar um pré-dimensionamento dos grampos, pode-se recorrer aos ábacos de Gigam (1986) e as recomendações presentes no projeto Clouterre (1991), presente na Tabela 4. Analisando a Tabela 4, verifica-

se que grampos executados com diâmetro de 100 mm, sendo o caso dos grampos executados na obra, se enquadram no critério de grampos elevados, pois o perímetro ultrapassa os 200 mm. Sendo assim, foram avaliados inicialmente a adoção de grampos com comprimento de $1,2H$, com espaçamento horizontal (S_h) de 1,50 metros e vertical (S_v) de 1,00 metros, tendo um valor de grampo por metro quadrado um pouco maior do que o recomendado. Porém, observou-se que devido ao carregamento distribuído de 25 kN/m^2 aplicado na superfície do terreno, estes valores não refletiriam condições de segurança satisfatória. Posto isto, nas análises foram adotados grampos de 5 metros de comprimento com inclinação de 15° , espaçamento vertical de 1,00 metro e horizontal de 1,50 metro. As linhas de grampos iniciaram a 60 cm do topo do talude.

Tabela 4. Pré-dimensionamento para estruturas com face vertical e topo horizontal, adaptado de Clouterre (1991).

| Parâmetros | Espaçamento entre Grampos | |
|--|---------------------------|--------------|
| | Reduzidos (1) | Elevados (2) |
| Comprimento dos grampos | 0,5 a 0,7 H | 0,8 a 1,2 H |
| Número de grampos por m^2 de face | 1 a 2 | 0,15 a 0,40 |
| Perímetro de grampo | 150 a 200 mm | 200 a 600 mm |
| Resistência à tração | 120 a 200 kN | 100 a 600 kN |

(1) Grampos cravados ou grampos injetados de pequenos diâmetros.

(2) Grampos injetados com grandes diâmetros.

A resistência característica do elemento resistente a tração do grampo foi calculada em função da tensão de escoamento do aço, adotando uma espessura de sacrifício de 0,60 mm, conforme sugerido pela ABNT (2021). Considerando a utilização de barras de 20mm CA-50, obtém-se uma resistência característica a tração de 138,80 kN.

2.1.1 Análises de estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas no software Slide 2D da fabricante Rocscience, utilizando o método de análise de Morgenstern & Price e Spencer, devido ao seu maior rigor na análise de forças entre as lamelas. Foi empregado o modelo de Mohr-Coulomb para o material representativo do solo presente no local e os reforços foram modelados como suporte *soil nail*, utilizando um modelo passivo de aplicação da força.

Nas análises probabilísticas foi adotado o método de amostragem de Latin-Hypercube, por possibilitar uma convergência de resultados com um menor número de amostras, conforme destacado por Iman *et al.* (1980) e Startzman e Wattenbarger (1985). No tipo de análise foi adotado a busca por todas as superfícies (*overall slope*).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação da influência da tensão de adesão no fator de segurança

Na Figura 3 estão expostos os valores de fatores de segurança obtidos nas análises, considerando os valores de q_s para cada condição de execução dos grampos: bainha, bainha mais 1 injeção e bainha mais 2 injeções. Observa-se que o fator de segurança mínimo de 1,50, conforme recomendado pela ABNT 2021 para condições em que pode ocorrer danos materiais alto e perda de vidas humanas alto, somente foi alcançado para a condição de execução dos grampos com aplicação da injeção da bainha e 2 injeções. Para as demais condições, devido ao valor baixo da tensão de adesão, os fatores de segurança foram de 1,36 e 1,43.

Isto demonstra que para esta configuração de grampos analisada, o valor de q_s tem que ser superior a 58 kPa. Para a aplicação de valores menores de tensão de adesão, necessita-se reduzir o espaçamento horizontal para valores da ordem de 1,00 m, aumentando a densidade de grampos, a fim de atingir a condição de segurança satisfatória.

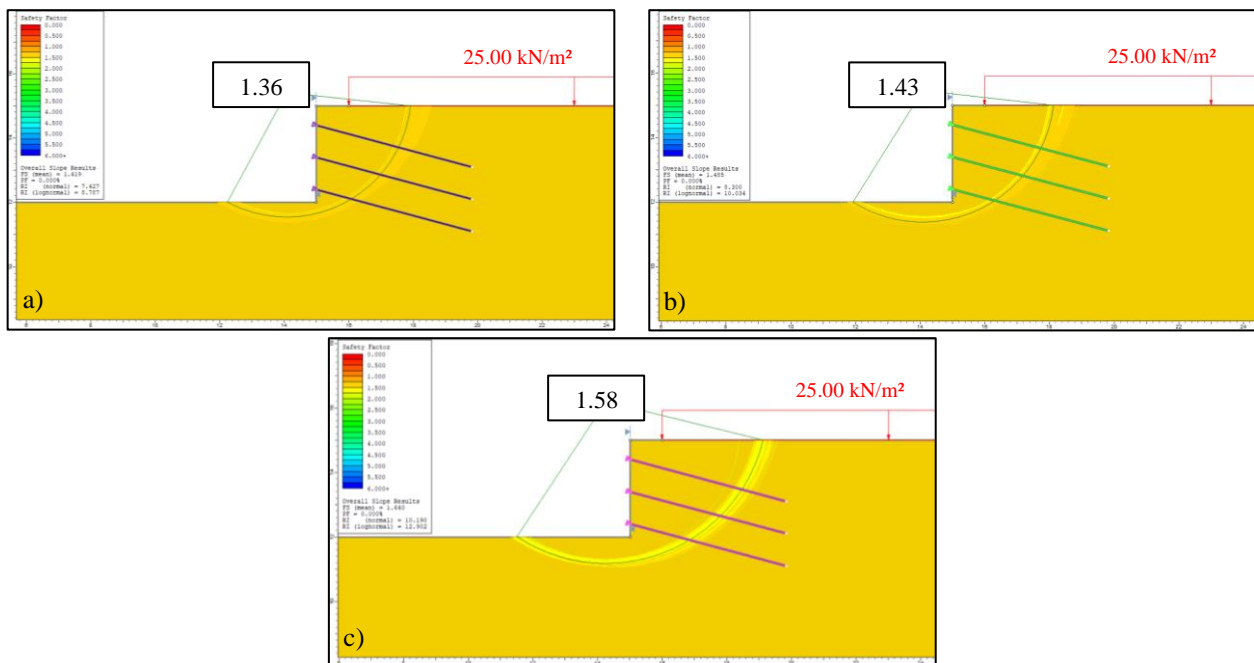


Figura 3. Resultados das análises de estabilidade: a) simulação com q_s de 32,82 kPa; b) simulação com q_s de 39,30 kPa; a) simulação com q_s de 58,10 kPa.

3.1 Avaliação da probabilidade de falha

Para analisar a influência da variabilidade dos parâmetros na probabilidade de falha foram realizadas 1000 simulações. Observa-se na Figura 4 que a convergência dos valores se deu com um valor menor de simulações, da ordem de 200.

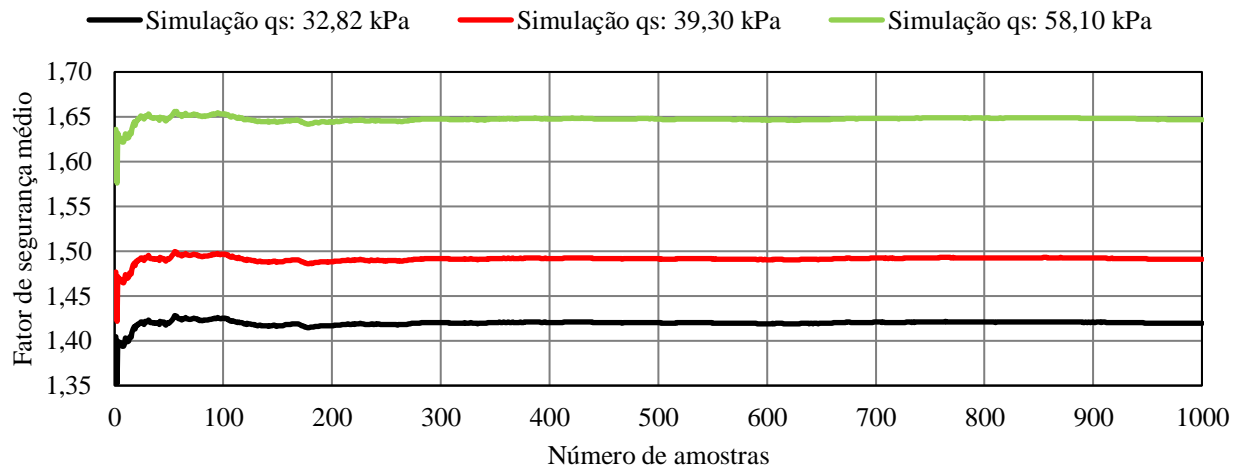


Figura 4. Teste de convergência da simulação.

Na Figura 5 podem ser vistos os resultados das análises probabilísticas. É possível notar que a probabilidade de falha tende a 0,00 para ambas as condições, comprovando que mesmo considerando a variabilidade dos parâmetros não se encontrou fatores de segurança menores que a unidade. Observa-se que nas simulações com q_s de 32,82 e 39,30 kPa a probabilidade de se ter valores de fatores de segurança menor do que 1,50 é elevada, 90% e 55%, corroborando a necessidade de se adotar técnicas construtivas que possibilitem elevar os valores das tensões de adesão.

Nas simulações com valor de q_s de 58,10 kPa, nota-se que mesmo com a variabilidade dos parâmetros de resistência do solo, a probabilidade de se ter valores inferiores a 1,50 é muito pequena.

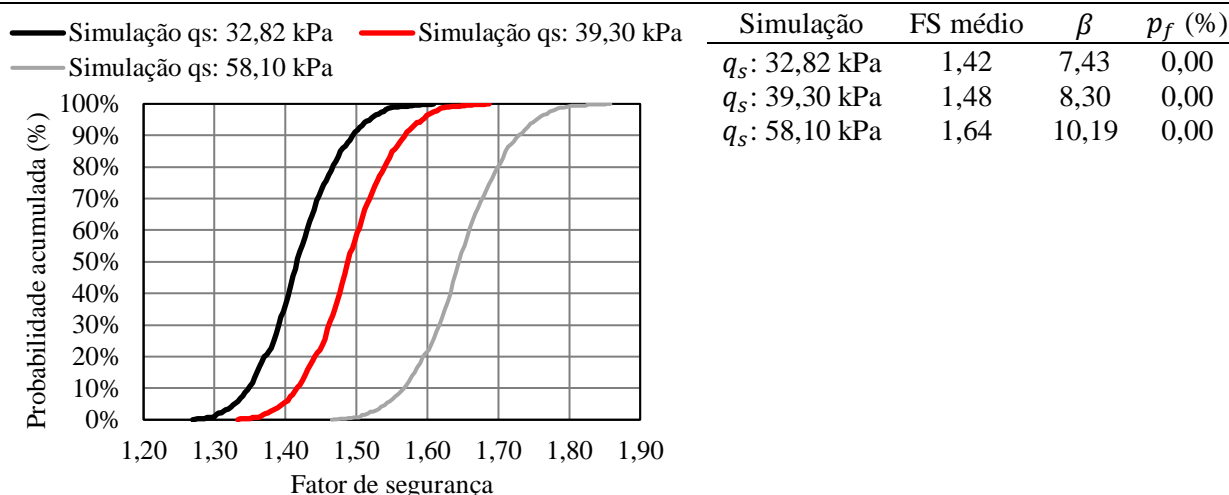


Figura 5. Resultados das análises probabilísticas.

Em relação ao índice de confiabilidade, observa-se valores bem elevados, muito acima dos valores recomendados por EUROCODE EN 1990:2002+A1 (CEN, 2005), JCSS (2001), USACE (1995) e Meyerhof (1995).

3.1 Avaliação de sensibilidade da variação dos parâmetros no fator de segurança

A fim de avaliar a influência de cada variável no fator de segurança determinístico, foi realizada uma análise de sensibilidade, exposta na Figura 6. Nota-se que o parâmetro que mais influenciou na variação do fator de segurança foi o ângulo de atrito, tendo sua redução promovido fatores de segurança de até 1,45.

A consideração de uma pequena parcela de intercepto coesivo foi suficiente para elevar consideravelmente os valores de fatores de segurança, enquanto o peso específico pouco influenciou a condição de segurança. Portanto, a execução de ensaios de laboratório, com a finalidade de se ter valores mais confiáveis de parâmetros de resistência para este solo, podem melhorar significativamente os resultados das análises de estabilidade.

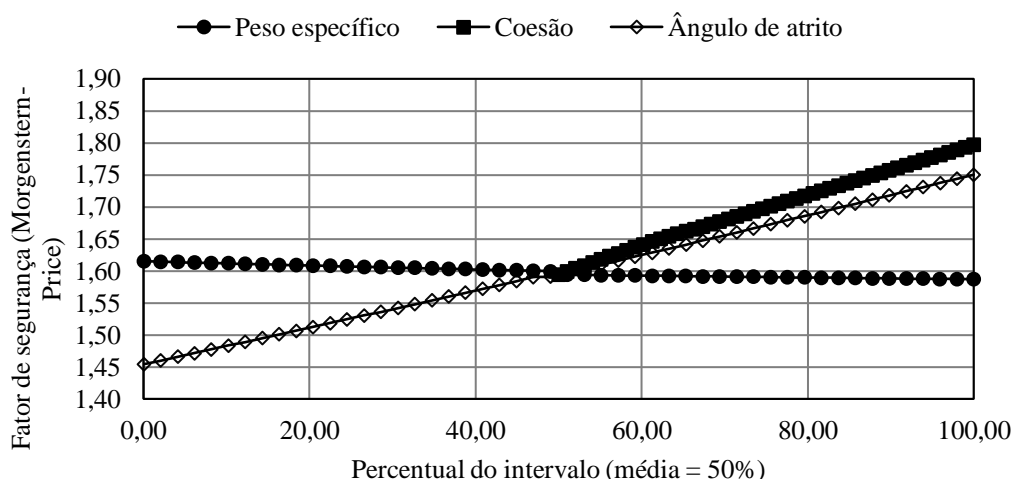


Figura 6. Resultados das análises probabilísticas.

3 CONCLUSÕES

Por meio destas análises, foi possível constatar que os fatores de segurança recomendados por norma somente seriam alcançados para a condição de execução dos grampos com injeção da bainha e duas reinjeções,

demonstrando a importância do valor da tensão de adesão na condição de estabilidade do talude durante o processo de escavação. Isto reflete a necessidade da realização de ensaios de arrancamento em etapas que antecedem a execução da obra, proporcionando um dimensionamento com maior nível de confiabilidade. O atendimento aos fatores de segurança para as outras condições de execução dos grampos somente seriam obtidos aumentando a densidade de grampos por metro quadrado, o que refletiria em elevação no custo da construção.

No que se refere a avaliação da probabilidade de falha, observa-se que mesmo com uma possível variabilidade dos parâmetros, corroborado por uma ausência de ensaios de laboratório, o índice de confiabilidade é bem elevado e a probabilidade de falha tende a 0, para todos os cenários analisados. Caso os fatores de segurança médios para as condições de valores de tensões de adesão de 32,82 kPa e 39,30 kPa fossem superiores ao recomendado por norma, baseado na baixa probabilidade de falha apresentada, a adoção destes valores poderia ser uma alternativa aceitável do ponto de vista de segurança estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramento, M., Koshima, A., Zirlis, A. C. (1998) *Reforço do terreno. Fundações – Teoria e Prática*, 2 ed., PINI, São Paulo. Cap. 18, p. 641-690.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-2. *Muros e taludes em solos reforçados Parte 2: Solos grampeados*. Rio de Janeiro.
- Iman, R. L., Davenport, J. M., Zeigler, D. K. (1980) Latin Hypercube Sampling (a program user's guide). [LHC, in FORTRAN]. *Technical Report*.
- Ortigão, A. (1997) Ensaios de Arrancamento em Obras de Solo Grampeado. *Solos e Rochas*, São Paulo, 20 (1), p. 39-43.
- Startzman, R.A., Wattenbarger, R. A. (1985) An improved computation procedure for risk analysis problems with unusual probability functions. *Hydrocarbon economics and evaluation symposium*, Texas, March.
- U.S. Army Corps of Engineers (1995) *Engineering and design introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering*. Department of the Army, Washington, D. C. Tech. Letter, N. 1110-2-547, September.
- Joint Committee on Structural Safety (2001) *Probabilistic model code - Part 1 - basis of design*. JCSS.
- Meyerhof, G. G. (1995) Development of Geotechnical Limit State Design. *Canada Geotech. J.* 32: p. 128-136.
- European Committee for Standardization (2005). EN 1990:2002+A1:2005. *Eurocode: Basis of structural design*. Brussels: CEN.
- Clouterre (1991) *Recommendations Clouterre – soil recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing*. French National Project Clouterre, English Language Translation, 302 p.
- Ehrlich, M., Becker, L. (2009) *Muros e Taludes de Solo Reforçado – Projeto e Execução*, 1st ed., Oficina de Textos, São Paulo.
- Godoy, N. S. (1972) *Fundações: Notas de Aula, Curso de Graduação*, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- Godoy, N. S. (1983) Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra, Escola de Engenharia de São Carlos-USP.
- Mitchell, J. K., Villet, W. C. B. (1987) *Reinforcement of earth slopes and embankments*. NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., USA, 323 p.
- Duncan, J. (2000) Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, V. 126, N. 4, April.