

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/257

VARIABILIDADE DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO ESTUDO DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE

José Martins Paravidino

Discente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jose.paravidino@engenharia.ufjf.br

Tatiana Tavares Rodriguez

Docente Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, tatiana.rodriguez.ttr@gmail.com

Sabrina Medeiros Penasso

Geotécnica, Fontes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, sabrina.penasso@engenharia.ufjf.br

RESUMO: Devido a desastres causados por deslizamentos de terra ou movimento de blocos de rocha, torna-se cada vez mais evidente a importância de realizar análises mais minuciosas dos taludes, a fim de evitar que outros acidentes ocorram futuramente. Logo, o objetivo deste trabalho é analisar a variabilidade dos parâmetros de resistência do solo e sua influência no estudo de um talude localizado no município de Mar de Espanha – MG, através da análise paramétrica considerando a faixa de valores de coeficientes de variação da literatura e valores médios obtidos de ensaios de laboratório. Para tanto, foi utilizado o software SLOPE/W para a análise de estabilidade do talude submetendo os parâmetros de resistência à coeficientes de variação para o intercepto coesivo: -20%, -50% e -80% e para o ângulo de atrito: -4%, -10% e -20%. Dessa forma, foram adquiridos os valores dos Fatores de Segurança e a superfície de ruptura. Os resultados mostraram que a variabilidade do intercepto coesivo demonstrou maior influência na análise de estabilidade do talude que a do ângulo de atrito. Além disso, algumas análises resultaram em FS menor que 1, ou seja, situação de instabilidade. Por fim, constatou-se, que a partir de um coeficiente de variação de -58% aplicado sobre o intercepto coesivo, obtém-se FS inferior a 1,3 que é o mínimo adotado de acordo com a norma.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de talude, Fator de segurança, Parâmetros de resistência, Variabilidade.

ABSTRACT: Due to disasters caused by landslides or movement of rock blocks, the importance of carrying out more detailed analyzes of the slopes is becoming increasingly evident, in order to prevent other accidents from occurring in the future. Therefore, the aim of this work is to analyze the variability of soil resistance parameters and their influence on the study of a slope located in Mar de Espanha - MG, through parametric analysis considering the range of values of coefficients of variation in the literature and mean values obtained from tests. For that, the software SLOPE/W was used to analyze the stability of the slope, submitting the resistance parameters to several coefficients of variation for cohesive intercept: - 20%, - 50% and - 80% and for the friction angle: - 4%, - 10% and - 20%. Thus, the values of the Safety Factors and the rupture surface were acquired. The results showed that the variability of the cohesive intercept showed a greater influence on the slope stability analysis than the friction angle. In addition, some analyzes resulted in SF less than 1, indicating a instability. Finally, it was found that, from a CV of - 58% applied over the cohesive intercept, SF lower than 1,3 is obtained, which is the minimum adopted according to the standard.

KEYWORDS: Slope Stability, Safety Factor, Strength Parameters, Variability.

1 INTRODUÇÃO

Devido ao processo de formação natural do solo, este apresenta variabilidade em suas propriedades (PHOON; KULHAWY, 1999 *apud* SOUZA, 2017), assim acarreta incertezas no decorrer do desenvolvimento de um projeto de uma estrutura geotécnica. Ademais, segundo Kulhawy, Phoon e Grigoriu (1995 *apud* SOUZA, 2017), há, ainda, outras incertezas que influenciam na variabilidade das propriedades do solo que ocorrem principalmente por: variabilidade espacial, falhas de medição, quantidade insuficiente de ensaios, etc.

Os parâmetros de resistência do solo, seguindo o critério de Mohr-Coulomb, englobam o ângulo de atrito e o intercepto coesivo (TELES, 2013). O critério de ruptura proposto por Mohr-Coulomb, como Braja Das (2019) menciona, é definido pela Equação 1, a partir de ensaios de resistência ao cisalhamento.

$$\tau_f = c' + (\sigma' \times tg\phi') \quad (1)$$

Onde c' é o intercepto coesivo e ϕ' é o ângulo de atrito, com base na tensão efetiva.

Normalmente, os parâmetros, citados anteriormente, são submetidos às condições mais desfavoráveis previstas dentro da vida útil de cada projeto específico, como, por exemplo, a condição de saturação do solo. A partir dos parâmetros de resistência, é possível realizar o estudo de estabilidade de um talude.

Para avaliar a estabilidade de um talude, pode ser utilizada a análise do fator de segurança. O fator de segurança se configura como a relação entre os esforços resistentes e os atuantes, de forma a conduzir a uma situação satisfatória de segurança (ABNT, 2009). O fator de segurança deve compreender três aspectos de engenharia, de acordo com Aoki (2008): “[...] a) o técnico que considera a fórmula que associa o fator de segurança à probabilidade de ruína; b) o legal de ter que adotar o valor mínimo das normas vigentes e, c) ao mercado que comanda o custo total incluindo o custo do risco das consequências econômico – financeiras da ruína”.

Rosa (2017) determinou os parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) de um talude de corte, localizado na cidade de Mar de Espanha – MG, através do ensaio de cisalhamento direto em cinco corpos de prova dos dois tipos de solo encontrados no talude, totalizando 10 corpos de prova submetidos a ensaio. Portanto, não segue o mínimo de 12 ensaios por solo indicado pela NBR 11682 (ABNT, 2009) para determinar desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros citados anteriormente. É necessário levar em consideração a variabilidade dos mesmos para determinação de um fator de segurança com o objetivo de não haver um desempenho impróprio da obra.

A variabilidade dos parâmetros do solo citado interfere diretamente no valor do fator de segurança de um talude. Assim, dependendo da variação, o equilíbrio do talude pode ser comprometido, visto que é preciso um valor mínimo para o fator de segurança a fim de garantir a seguridade e não haver riscos de desmoronamento.

Quando não há ensaios e nem número suficiente de informações para definir o desvio padrão dos parâmetros, Tonus e Kormann (2009) apontam que podem ser estimados valores a partir de valores típicos do coeficiente de variação (CV), considerando que este é a razão entre o desvio padrão e a média de cada parâmetro. A Tabela 1 apresenta valores típicos de CV para peso específico, coesão efetiva, ângulo efetivo de resistência e coesão não drenada.

Tabela 1: Valores típicos do coeficiente de variação baseados em Sandroni e Sayão (1992), Lee et al (1983), Pacheco (1991), Christian et al (1992) *apud* Tonus e Kormann (2009).

Parâmetro	Coeficiente de variação (%)
Peso específico	2 a 8
Coesão efetiva	20 a 80
Ângulo efetivo de resistência	4 a 20
Coesão não drenada	20 a 50

Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade dos parâmetros de resistência do solo e sua influência no estudo de um talude localizado no município de Mar de Espanha – MG,

através da análise paramétrica considerando a faixa de valores de coeficientes de variação como sugerido no trabalho de Tonus e Kormann (2009) e valores médios obtidos de ensaios.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de Estudo

O talude que é objeto de estudo desse trabalho se localiza no município de Mar de Espanha, no bairro Balança, rua Dom Luis Orione, no loteamento de casas populares São Francisco de Paola. O talude foi cortado pela prefeitura com o fim de construir vias pavimentadas (ROSA, 2017).

A área em que o talude está tem a presença de rochas metamórficas como gnaiss, a qual é proveniente do granito, com composição dos minerais feldspato e biotita (ROSA, 2017).

Através do levantamento topográfico realizado na região por Rosa (2017), após ser realizado o corte do talude e as vias pavimentadas, é possível determinar a localização exata do talude (Talude 1) analisado e, também, suas cotas. A cota do topo é 528,579 m e a base, que é a cota da rua, se encontra em 523,992 m. Sendo assim, o talude possui, aproximadamente, 4,5 m de altura. Já sua projeção horizontal é de 3,57 m. Dessa forma, determina-se que a inclinação do talude com a horizontal é próxima de 52°.

O talude estudado, Talude 1, possui em sua composição o solo denominado como Solo Rosa, como demonstra a Figura 1 que contém o perfil topográfico do local.

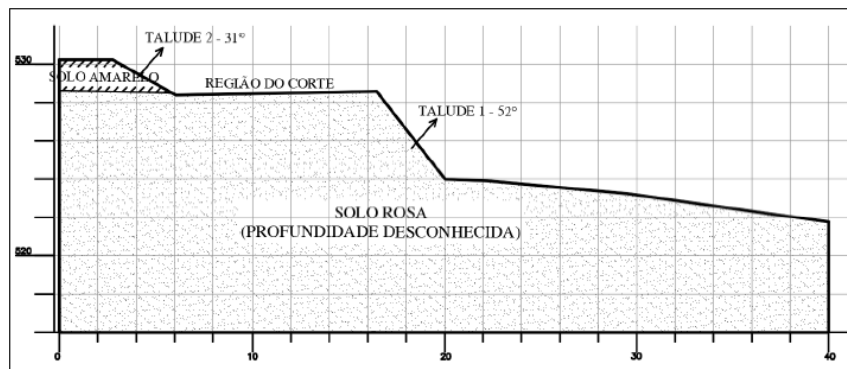


Figura 1: Perfil Topográfico.

Realizando a caracterização física do Solo Rosa é possível defini-lo como argila arenosa, de acordo com a NBR 6502 da ABNT (1995), com composição granulométrica, com defloculante, de 55% de argila, 14% de silte e 31% de areia. Ademais, através do ensaio do picnômetro, foi determinada a massa específica dos grãos como 2,681 g/cm³ (ROSA, 2017).

Por meio do ensaio de cisalhamento direto, Rosa (2017) definiu o peso específico do solo em condições naturais, cujo valor é de 14,67 kN/m³, e os valores de σ' (Tensão Normal na ruptura) e τ_r (Tensão Cisalhante na ruptura) a fim de determinar a envoltória de resistência do solo.

Através da envoltória, obtiveram-se os valores de ângulo de atrito de 29,05° e intercepto coesivo de 14,18 kPa. Já considerando apenas as tensões normais mais elevadas (50, 100 e 200 kPa) a envoltória de resistência desse solo demonstra um comportamento diferente. Assim, os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito obtidos foram de 0 kPa e 32,50°, respectivamente. Tais valores devem ser adotados somente para análises mais críticas de carregamento no solo (ROSA, 2017).

Enfim, Rosa (2017) realizou a análise de estabilidade no talude, utilizando a envoltória de resistência do solo que considera todos os cinco valores de tensões normais, cujos parâmetros são 14,18 kPa para o intercepto coesivo e 29,05° para ângulo de atrito. Nestas condições, Rosa (2017) encontrou que o talude, gerado após o corte da encosta original, apresenta fator de segurança de 2,10, valor maior dos que os indicados na NBR 11682 (ABNT, 2009).

2.2 Análise de Estabilidade

Nesse trabalho, foi utilizado o software SLOPE/W, do pacote GeoStudio 2019, para realizar as análises de estabilidade. É possível, através do programa, adquirir o valor do Fator de Segurança e a superfície de ruptura para diferentes condições analisadas do talude. O tipo de análise escolhido foi Morgenstern-Price.

O perfil do talude foi traçado no programa com base no levantamento topográfico apresentado por Rosa (2017). A direção do movimento determinada foi da esquerda para direita, com opção de superfície de pesquisa como entrada e saída.

Além disso, o software possibilita que sejam inseridas propriedades dos solos que compõe o talude, tais como os parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) e peso específico.

Por fim, são definidos os intervalos de entrada e saída da superfície de pesquisa. Feito isso, é iniciada a análise de estabilidade e o programa fornece o valor do Fator de Segurança e a linha de ruptura do movimento de massa. Neste trabalho, o valor mínimo adotado para o Fator de Segurança foi de 1,3, considerando que o nível de segurança contra danos a vidas humanas é médio e o nível de segurança contra danos materiais e ambientais é baixo.

Para esse trabalho, foi escolhido para o intercepto coesivo o coeficiente de variação de - 20%, - 50% e - 80%, já para o ângulo de atrito foi determinado o CV de - 4%, - 10% e - 20%. Buscou-se avaliar os limites das faixas de CV para ambos os parâmetros e a combinação mais desfavorável. Além disso, optou-se por um valor intermediário de CV para cada parâmetro a fim de avaliar a relação entre coeficiente de variação e fator de segurança.

3 RESULTADOS

Considerando os coeficientes de variação das análises, chegou-se aos valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito adotados conforme mostrado na Tabela 2. O intercepto coesivo variou entre os valores de 2,84 kPa e 14,18 kPa, enquanto o ângulo de atrito esteve entre 23,24° e 29,05°.

Tabela 2: Valores dos parâmetros de resistência.

Análise	CV de c'	c' (kPa)	CV de ϕ'	ϕ' (°)
Análise Base	0	14,18	0	29,05
Análise Paramétrica 1	- 20%	11,34	0	29,05
Análise Paramétrica 2	- 50%	7,09	0	29,05
Análise Paramétrica 3	- 80%	2,84	0	29,05
Análise Paramétrica 4	0	14,18	- 4%	27,89
Análise Paramétrica 5	0	14,18	- 10%	26,15
Análise Paramétrica 6	0	14,18	- 20%	23,24
Análise Paramétrica 7	- 80%	2,84	- 20%	23,24

Inicialmente, foi feita a análise com o coeficiente de variação de 0% tanto para o intercepto coesivo quanto para o ângulo de atrito. Dessa forma, foram utilizados os parâmetros de resistência médios obtidos por Rosa (2017). A Figura 2 apresenta o resultado da análise com o valor do fator de segurança de 2,10 e a linha de ruptura.

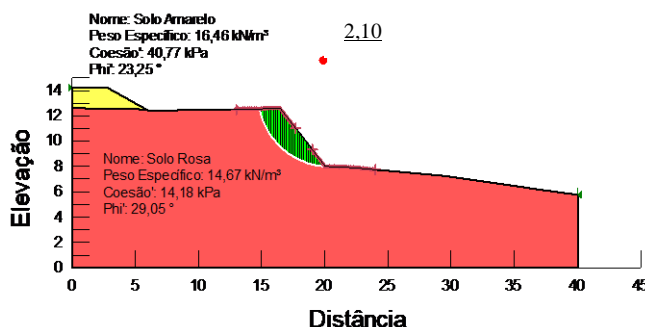


Figura 2: Análise Base.

Em seguida, as análises paramétricas foram realizadas. As três primeiras análises feitas tiveram variação apenas no intercepto coesivo (ângulo de atrito médio mantido nessas análises), com coeficiente de variação de - 20%, - 50% e - 80%, mostradas, respectivamente, pelas Figura 3, Figura 4 e Figura 5.

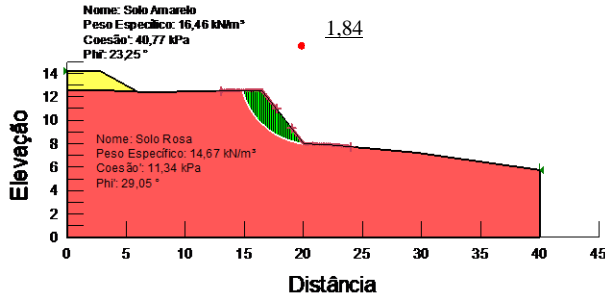


Figura 3: Análise Paramétrica 1.

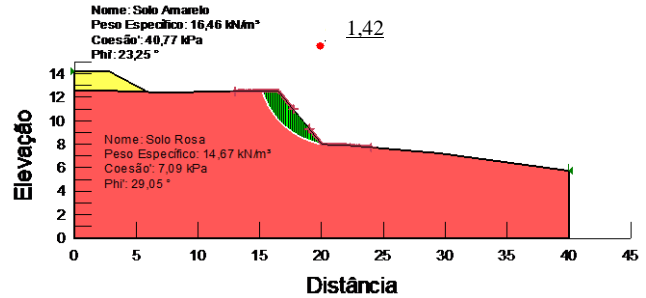


Figura 4: Análise Paramétrica 2.

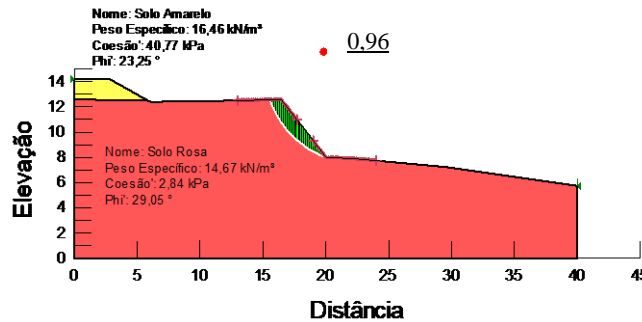


Figura 5: Análise Paramétrica 3.

Então, foram realizadas as análises nas quais o coeficiente de variação foi aplicado apenas no ângulo de atrito, mantendo o intercepto coesivo médio. Assim, mais três análises foram feitas com CV de - 4%, - 10% e - 20%, mostradas nas Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

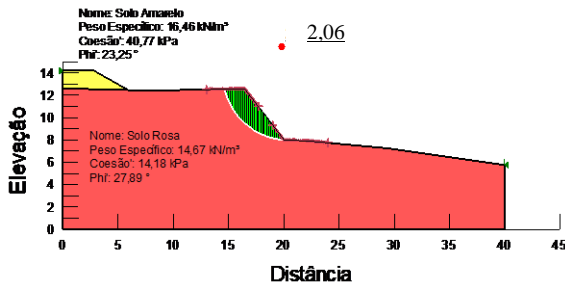


Figura 6: Análise Paramétrica 4.

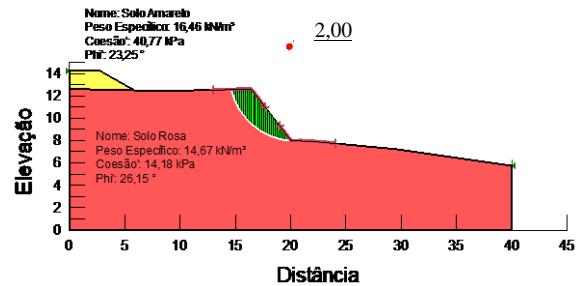


Figura 7: Análise Paramétrica 5.

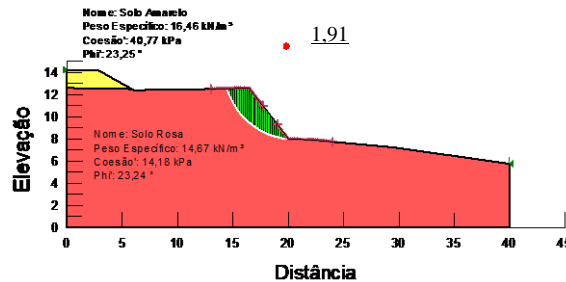


Figura 8: Análise Paramétrica 6.

Por fim, foi feita a análise na qual utilizou coeficiente de variação máximo indicado para cada um dos parâmetros, - 80% para intercepto coesivo e - 20% para ângulo de atrito, mostrada na Figura 9.

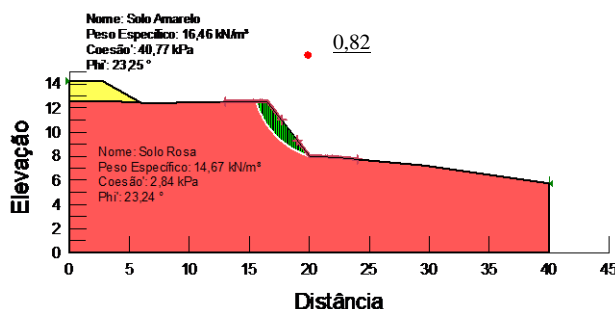


Figura 9: Análise Paramétrica 7.

A Tabela 3 apresenta os Fatores de Segurança encontrados para cada análise feita. A partir disso, pode-se observar que as análises paramétricas 3 e 7 possuem um valor para o FS menor do que 1, indicando que o talude não apresentaria estabilidade, pois as forças atuantes estariam superando as forças resistentes.

Tabela 3: Fatores de Segurança das análises realizadas

Análise Global	Fator de Segurança
Análise Base	2,10
Análise Paramétrica 1	1,84
Análise Paramétrica 2	1,42
Análise Paramétrica 3	0,96
Análise Paramétrica 4	2,06
Análise Paramétrica 5	2,00
Análise Paramétrica 6	1,91
Análise Paramétrica 7	0,82

Além disso, observando as análises paramétricas 1 e 6, nas quais o coeficiente de variação é -20%, sendo na primeira para o intercepto coesivo e na segunda para o ângulo de atrito, percebe-se que, no estudo desse talude, c' possui maior influência no resultado do Fator de Segurança que ϕ' . O FS da Análise Paramétrica 1 (1,84) é menor que o da 6 (1,91), indicando que está numa situação menos segura.

Por fim, apresenta-se o gráfico na Figura 10 que mostra a relação entre o Coeficiente de Variação e o Fator de Segurança. O FS do talude fica abaixo do que foi adotado como mínimo segundo a norma (FS = 1,3) a partir do coeficiente de variação para o intercepto coesivo igual a - 58%.

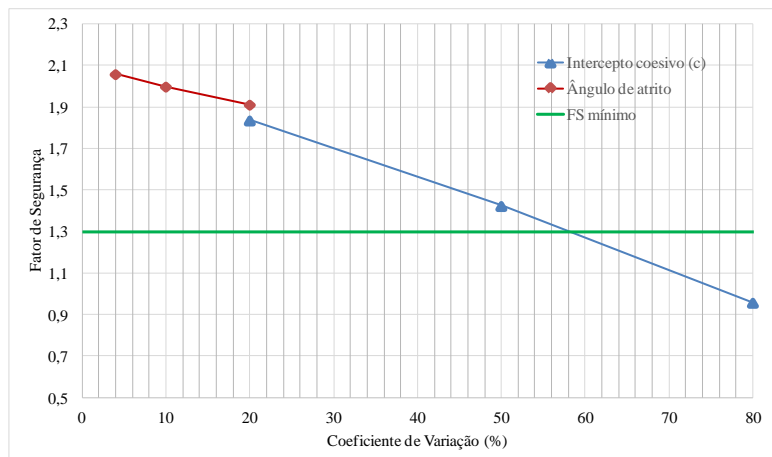


Figura 10: Relação entre Coeficiente de Variação e Fator de Segurança.

4 CONCLUSÃO

Após serem feitas 7 análises paramétricas, conclui-se que quanto maior o valor absoluto do coeficiente de variação sobre os parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de atrito) menor é o Fator de Segurança.

Nas análises em que o intercepto coesivo foi submetido aos coeficientes de variação de -20%, -50% e -80%, sendo mantido o ângulo de atrito médio, o Fator de Segurança variou de 0,96 a 1,84. Já nas análises em que o ângulo de atrito foi submetido aos CV's de -4%, -10% e -20%, mantendo o intercepto coesivo médio, foram obtidos FS de 1,91 a 2,06. Para a análise em que foi aplicado coeficiente de variação máximo indicado em ambos os parâmetros de resistência, -80% para o intercepto coesivo e -20% para o ângulo de atrito, o Fator de Segurança encontrado foi de 0,82.

É possível constatar que duas análises paramétricas resultaram em um Fator de Segurança com valor menor que 1. A análise paramétrica 3, na qual o intercepto coesivo é submetido a um coeficiente de variação de -80%, apresentou um FS de 0,96. Já na análise paramétrica 7, na qual o intercepto coesivo está sobre um CV de -80% e o ângulo de atrito está sobre um CV de -20%, resultou em um FS de 0,82. Desse modo, significa que estão em uma situação de instabilidade.

Ademais, constatou-se que na análise do Talude 1, o intercepto coesivo possui maior influência sobre o Fator de Segurança do que o ângulo de atrito. Isso porque, quando se aplicou o coeficiente de variação de -20% no intercepto coesivo resultou em um FS de 1,84, valor menor do que o que foi encontrado quando o ângulo de atrito foi submetido ao mesmo CV, que foi de 1,91.

Além disso, através do gráfico apresentado na Figura 29, é possível perceber que a partir de um coeficiente de variação de -58% sobre o intercepto coesivo, obtém-se valor de Fator de Segurança abaixo do mínimo adotado de acordo com a norma (1,3).

Portanto, infere-se que considerar a variabilidade dos parâmetros de resistência do solo é importante dentro da análise de estabilidade de taludes para evitar futuros desastres causados por deslizamentos de terra ou movimentos de blocos de rocha, já que em alguns casos encontrou-se até situação de instabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N. (2008) *Dogma do fator de segurança*. Palestra proferida no 6º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 21p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*, 33p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) NBR 6502. *Solos e Rocha*, 18p.
- Braja Das, M. (2019) *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 712p.
- GEOSTUDIO, Programa Slope, versão 2019. Licença estudante.

- Rosa, J. P. (2017) *Análise da estabilidade de talude por parâmetros de resistência, na cidade de Mar De Espanha, MG*. Trabalho Final de Curso – UFJF/ Curso de Engenharia Civil, Juiz de Fora, 64p.
- Souza, W. A. dos R. (2017) *Variabilidade de parâmetros de resistência de solos arenosos mediante análise de resultados de sondagens com SPT*. Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Rio Grande do Norte, 20p.
- Teles, G. L. V. (2013) *Estudo sobre os parâmetros de resistência e deformabilidade da areia de Hokksund*. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 87p.
- Tonus, B. P. A.; Kormann, A. C. M. (2009) Aplicação de métodos de equilíbrio limite com ênfase determinística e probabilística na avaliação da estabilidade de uma encosta da Serra do Mar. Conferência Brasileira de Encostas – COBRAE, 5., 2009, São Paulo. *Anais eletrônicos...* São Paulo: ABMS, 9p. Disponível em:
<<https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/Acervo/Detalhe/5444?guid=1630030074469&returnUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1630030074469%26quantidadePaginas%3d1%26codigoRegistro%3d5444%235444&i=2>>. Acesso em: 16 agosto 2021.