

Análises de estabilidade de um talude reforçado com grampeamento a partir de metodologias determinísticas e probabilísticas

Caio Farias Benetti

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, caiofbbenetti@gmail.com

Rômulo Castello Henriques Ribeiro

Professor, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, romulocastello@yahoo.com.br

Katia Vanessa Bicalho

Professora, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, kvbicalho@gmail.com

Bruno Teixeira Dantas

Professor, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, dantasbd@gmail.com

RESUMO: As análises tradicionais de estabilidade de taludes são avaliadas frequentemente por métodos chamados determinísticos, com parâmetros do solo (valores médios para os dados de entrada) considerados constantes, e expressas sob a forma de um fator de segurança (constante). As análises de estabilidade de taludes podem também ser avaliadas por métodos chamados probabilísticos, que permitem avaliar incertezas associadas aos dados e métodos, complementando o FS por meio do índice de confiabilidade e probabilidade de falha. Neste trabalho utilizam-se metodologias probabilísticas para avaliar um talude localizado no km 299 da BR101, no município de Viana-ES. O talude investigado apresentava-se potencialmente instável e representava alto risco, pois seu rompimento além de causar danos diversos, resultaria em possível avaria a um gasoduto existente ao longo de toda sua extensão, o que implicaria em vazamento de gás natural. Assim para sua estabilização foi adotada a técnica denominada "solo grampeado", que se caracteriza por estabilizar um talude pela inserção de barras de aço envolvidas com calda de cimento. As análises determinísticas utilizaram os métodos de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price e as análises probabilísticas exploraram de forma rigorosa os métodos da Simulação de Monte Carlo e Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM), evidenciando suas particularidades por meio de comparações entre seus resultados de índices de confiabilidade e probabilidades de ruptura. O Método do Segundo Momento de Primeira Ordem mostrou-se inconsistente para a análise específica. A Simulação de Monte Carlo (MCS) mostrou-se a mais adequada para a análise. Além disso, para a determinação da resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo, que é fator crucial para o tipo de estabilização fornecida pelo grampeamento, foram avaliadas três correlações empíricas baseadas em resultados de sondagens SPT e seus impactos nas análises de estabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Talude, solo grampeado, análises determinísticas, análises probabilísticas.

ABSTRACT: Traditional slope stability analyses are often evaluated using so-called deterministic methods, with soil parameters (average values for the input data) considered constant, and expressed in the form of a (constant) factor of safety. Slope stability analyses can also be evaluated using so-called probabilistic methods, which allow uncertainties associated with the data and methods to be assessed, complementing the FS by means of the reliability index and probability of failure. This work uses probabilistic methodologies to evaluate a slope located at km 299 of the BR101 highway, in the municipality of Viana-ES. The slope investigated was potentially unstable and posed a high risk, since its collapse would not only cause various types of damage, but would also result in possible damage to an existing gas pipeline along its entire length, which would imply a natural gas leak. To stabilize the slope, a technique called "soil nailing" was adopted, which is characterized by stabilizing a slope by inserting steel bars wrapped in cement grout. The deterministic analyses used the Simplified Bishop and Morgenstern-Price methods, while the probabilistic analyses rigorously explored the Monte Carlo Simulation and First Order Second Moment (FOSM) methods, highlighting their particularities through comparisons between their reliability index results and probabilities of failure. The First Order Second Moment Method proved to be inconsistent for the specific analysis. Monte Carlo Simulation (MCS) proved to

be the most suitable for the analysis. In addition, in order to determine the shear strength at the soil-staple contact, which is a crucial factor for the type of stabilization provided by the stapling, three empirical correlations based on SPT drilling results were evaluated and their impact on the stability analyses.

KEYWORDS: Slope, soil nailing, deterministic analysis, probabilistic analysis.

1 INTRODUÇÃO

Talude é a designação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, sendo estes naturais, as encostas, ou construídos pelo homem, como, por exemplo, os taludes de aterros e cortes. (Gerscovich, 2016)

Em projetos, as análises de estabilidade são feitas comumente por meio dos denominados Fatores de Segurança (FS), que estão sujeitos a utilização de parâmetros do solo dotados de incertezas envolvidas, próprias dos ensaios, e de métodos e correlações. Para o solo, que é um material naturalmente heterogêneo, essas variabilidades mostram-se ainda mais relevantes. Por isso, de maneira mais recente, o desenvolvimento de análises geotécnicas chamadas probabilísticas elevou o nível dos estudos de estabilidade, pois se utilizam de recursos da probabilidade e estatística para mensurar essas incertezas envolvidas nos parâmetros de resistência empregados nas análises, quantificando agora não só fatores médios, mas também variabilidades e os riscos associados. Nessa abordagem, destacam-se a Probabilidade de Falha (PF) que quantifica a porcentagem de chances de um talude romper em um número n de análises realizadas e o Índice de Confiabilidade (β), que mensura quão confiável a análise é, quantificando o número de desvios padrão entre o valor médio da resistência e o valor correspondente à ruptura.

O presente artigo explora as análises probabilísticas em apoio às análises determinísticas por meio do estudo de caso de um talude potencialmente instável localizado no km 299 da BR101. Para isso foram utilizados os métodos de Simulação de Monte Carlo (MCS) e Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM).

2 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

De acordo com Sandroni e Sayão (1992) a avaliação probabilística da estabilidade de um talude é feita considerando-se usualmente o fator de segurança médio FS como uma função de variáveis aleatórias x_i , independentes, que representam os parâmetros geotécnicos. Obtém-se a probabilidade de ruptura do talude como sendo igual à área sob a curva da distribuição de FS . Nesse sentido, um ponto chave de análise é a forma da distribuição. Os métodos utilizados para análises probabilísticas dividem-se em exatos e aproximados. Os métodos exatos necessitam que seja conhecida a função de probabilidade de todas as variáveis independentes. Na falta desta, assume-se comumente a distribuição dos parâmetros como normal, abordagem validada pelo Teorema do Limite Central (TLC), que afirma que, à medida que o tamanho da amostra cresce, a distribuição amostral tende a uma distribuição normal, independentemente da forma da população.

2.1 Simulação de Monte Carlo

O principal método considerado como referência para a avaliação probabilística da estabilidade de taludes é a MCS. Esse método baseia-se em processos de amostragem estatística, nos quais um grande número de combinações de variáveis de entrada é gerado de forma aleatória, obedecendo às distribuições estatísticas previamente definidas para cada parâmetro de interesse. A partir dessas amostras, a função de desempenho $F(X)$, que representa o fator de segurança, é avaliada repetidamente até que os resultados obtidos sejam estatisticamente representativos do comportamento real do sistema.

A precisão dos resultados obtidos por esse método é diretamente proporcional ao número de simulações realizadas. Em teoria, à medida que o número de amostras tende ao infinito, os resultados convergem para a solução estatisticamente exata. Contudo, essa característica também implica em um elevado custo computacional, especialmente em problemas com muitas variáveis ou com funções de desempenho complexas, o que justifica a utilização de softwares especializados para a sua aplicação.

No presente estudo, foi utilizado o *software* Slide2 (Rocscience), disponível comercialmente, de análises de estabilidade de taludes por métodos determinísticos e probabilísticos em duas dimensões. Os dados de entrada adotados foram os valores médios dos parâmetros geotécnicos do solo, acompanhados de seus

respectivos desvios-padrão, que definem a variabilidade estatística de cada variável aleatória. Essa configuração permitiu a realização de múltiplas simulações, obtendo os fatores de segurança do talude para cada combinação analisada, possibilitando a construção de uma distribuição estatística de FS.

2.2 Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM)

Quanto aos métodos aproximados, o método FOSM destaca-se pela praticidade. Harr (1987) indica que o método FOSM expressa a função de performance como função de diferentes variáveis aleatórias consideradas na análise estatística. Phoon e Kulhawy (1999) enfatizam que essa abordagem é denominada de segundo momento pois utiliza a variância que é o segundo momento em relação à média e denominada de linear pois advém diretamente da expansão em série de Taylor truncada, que despreza termos de ordem superior, assumindo que são insignificantes para incrementos suficientemente pequenos.

Com a função de desempenho representada por um fator de segurança FS, se consideradas independentes as demais variáveis, a variância do fator de segurança recai em um somatório do produto entre os quadrados das derivadas parciais da função FS em relação a cada parâmetro e suas respectivas variâncias.

Para o cálculo das derivadas parciais necessárias, Christian et al. (1994) recomendam o uso do método das diferenças finitas progressivas, no qual cada parâmetro é variado separadamente, e a correspondente alteração no fator de segurança é avaliada. Assim, a derivada parcial é aproximada pela razão entre a variação observada no fator de segurança e o incremento aplicado ao parâmetro, comumente 10%.

A série de Taylor é, portanto, a base teórica que legitima essa abordagem. Ao truncar a série após o termo linear, assume-se que a função de desempenho do fator de segurança comporta-se aproximadamente como uma reta nas proximidades do ponto de interesse, validando a substituição de derivadas por diferenças finitas. Contudo, se testes com incrementos ΔX_i cada vez menores não resultarem em estabilização dos valores calculados, é um indício de uma possível presença de não linearidades significativas ou termos de ordem superior não desprezíveis, indicando a não viabilidade da aplicação do método para o caso específico.

3 ESTUDO DE CASO

O talude utilizado para análise situa-se no quilômetro 299 da Rodovia BR 101, no bairro Canaã, município capixaba de Viana. Possui aproximadamente 320 metros de extensão, com altura variando de 1,50 a 12,90 metros, com a existência de uma tubulação de gás ao longo do solo em talude. A estabilização do talude mostrou-se necessária em virtude dos escorregamentos localizados, processos erosivos e evidências de trincas de tração, expostas na Figura 1, a seguir.



Figura 1. Processos de instabilidade do talude estudado

Para a situação descrita, foi proposto um projeto de estabilização que fosse o mais adequado para a resolução do problema visto que a existência do gasoduto em talude, implicava em um processo delicado de instabilização da encosta, já que, além do dano ao patrimônio e à operação do sistema, havia ainda os riscos inerentes a um possível vazamento de gás natural, afetando os ocupantes da área no entorno, bem como o fluxo de veículos na rodovia. A solução proposta foi inicialmente conter as erosões e deslizamentos com sacos de solo cimento de forma a conformar a geometria do talude e em seguida aplicar uma estabilização com grampeamento. Em virtude do duto mencionado, o layout do grampeamento proposto teve que ser elaborado de forma minuciosa de modo a não interceptar o mesmo. A Figura 2 retrata imagens do talude sendo parcialmente recomposto com os sacos de solo-cimento e etapa de seu grampeamento.



Figura 2. Recomposição com sacos de solo cimento e processo de grampeamento

3.1 Parâmetros geotécnicos

O solo do talude apresentou-se majoritariamente composto de argila arenosa de baixa plasticidade, pelo sistema unificado de classificação. Assim, a fim de obter as características de resistência deste solo, foram realizados ensaios de cisalhamento direto drenados e com corpos de prova inundados, mais especificamente nove ensaios, a partir de 3 blocos indeformados. Por meio desses ensaios, utilizou-se de uma regressão linear a fim de determinar os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) médios. De acordo com Ribeiro (2008), para a aplicação de métodos probabilísticos em estudos geotécnicos, são necessários os valores estatísticos de média e variância dos parâmetros do solo, selecionados como variáveis aleatórias. As variâncias $V[c']$ e $V[tg\phi']$ foram calculadas conforme Neter et al. (1982). Para o peso específico médio, aplicaram-se as equações básicas da estatística sobre os resultados dos ensaios de massa específica.

A tabela 01 indica os resultados de parâmetros médios, variâncias e demais fatores probabilísticos:

Tabela 01. Resumo de Parâmetros e Variâncias

Parâmetro	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$\Phi (^{\circ})$	$c' (\text{kPa})$
Média (μ)	16,49	34	6,86
Desvio Padrão (σ)	0,13	1,25	1,93
Variância (V)	0,02	1,56	3,72
Coef. de Variação (Cv)	0,81%	3,76%	28,13%

Uma análise relevante é a comparação entre os coeficientes de variação calculados e os valores típicos de literatura. Na Tabela 2, comparam-se os resultados deste estudo com os intervalos sugeridos por Assis et al. (2012). A análise mostra que o peso específico ($Cv = 0,81\%$) e o ângulo de atrito ($Cv = 3,76\%$) apresentaram variabilidade abaixo do intervalo sugerido na literatura, enquanto a coesão ($Cv = 28,13\%$) permaneceu dentro dos limites, porém de forma próxima à extremidade. Tal contraste evidencia que o uso exclusivo de indicações literárias, sem ensaios específicos, pode gerar estimativas com elevadas incertezas. Além disso, um número reduzido de ensaios pode também não representar a real variabilidade esperada de um parâmetro.

Tabela 02. Comparação de coeficientes de variação

Parâmetro	γ	Φ'	c'
Cv calculado (%)	0,81	3,76	28,13
Cv literatura (%)	3 (2 a 8)	10 (04 a 20)	40 (20 a 80)

3.2 Análises de estabilidade

A escolha da seção crítica deu-se em função das características geométricas e pela posse de resultados de ensaios “Standard Penetration Test”, o SPT, além de ensaios de caracterização e os referidos ensaios de cisalhamento direto. A seção consiste em um talude de 9,58 metros, com 67 graus de ângulo médio, sem a presença de nível d'água.

3.2.1 Seção natural

As análises das seções foram feitas considerando uma camada de solo homogêneo, com os valores dos parâmetros definidos no tópico anterior. Os resultados dessas análises resultaram em fatores de segurança inferiores a um, o que provavelmente indica a presença de uma coesão aparente suficiente para manter a estabilidade do talude, que foi desfeita com a submersão para os ensaios de cisalhamento direto. Além disso, como os fatores de segurança resultaram menores que a unidade, as análises nas seções naturais consideraram apenas métodos determinísticos, visto que as probabilidades de ruptura foram próximas a 100% em todas as simulações, já que esta representa a área do gráfico de frequência com FS menor do que um.

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados determinísticos obtidos pelos métodos de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price.

Tabela 03. Valores de FS das seções naturais investigadas	
Fator de Segurança	
Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
0,827	0,822

A análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price é apresentada na Figura 3.

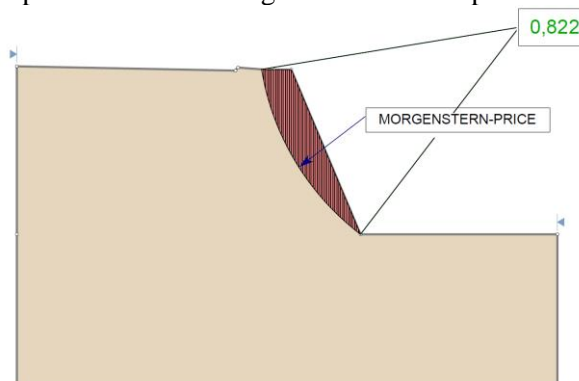


Figura 3. Análise determinística da seção natural (Morgenstern-Price)

3.2.2 Seções estabilizadas

3.2.2.1 Estabilização com grampeamento

Em virtude dos fatores de segurança insatisfatórios para as seções naturais, foi proposta uma estabilização com solo grampeado. O dimensionamento dos grampos foi realizado à luz da nova norma ABNT NBR 16.920-2021 Muros e taludes em solos reforçados Parte 02: Solos grampeados. Na prática, o fator crucial para dimensionamento dos grampos e determinação da malha de grampeamento consiste no dimensionamento geotécnico, função da definição da resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo (q_s). Sua atuação é o principal mecanismo de transferência de esforços em estruturas de solo grampeado, na qual os grampos impõem resistência aos deslocamentos do maciço por meio da interação por atrito e adesão na interface entre a calda de cimento e o solo adjacente.

Para determinação de q_s , além de objetivando computar sua influência na segurança e probabilidade de falha dos taludes, foram utilizadas as correlações, típicas de literatura, de Ortigão (1997), Ortigão e Sayão (2004) e Springer (2006), respectivamente:

$$q_s = 50 + 7.5 \cdot N_{spt} \quad (1)$$

$$q_s = 67 + 60 \cdot \ln(N_{spt}) \quad (2)$$

$$q_s = 45 \cdot \ln(N_{spt}) - 15 \quad (3)$$

Portanto, foram utilizadas as três correlações supracitadas para cálculo do valor de resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo (q_s). O item 6.2.1.2.1 da NBR 6122:2022 recomenda ainda que quando se utilizarem métodos semiempíricos, que é o caso das correlações apresentadas nas equações (1), (2) e (3), utilize-se um fator de segurança igual a dois para cálculo de q_s *admissível*, premissa que foi adotada.

Como é necessário calcular as variâncias e desvios-padrão para a aplicação dos métodos probabilísticos, utilizou-se a estratégia de calcular o valor de q_{sadm} para cada valor do número de golpes dos ensaios SPT representativos para cada seção e, assim, posteriormente calcular desvio-padrão e variância dos dados pelas formulações clássicas da estatística.

Tabela 04. Valores estatísticos de resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo (q_s).

Correlação	Seção 08		Seção 10	
	$q_{s,adm}$ (kPa)	$\sigma [q_{s,adm}]$	$q_{s,adm}$ (kPa)	$\sigma [q_{s,adm}]$
(1)	68,56	13,22	72,71	16,05
(2)	105,47	10,85	124,03	13,87
(3)	46,48	8,14	47,83	10,4

Como exposto na introdução, a escolha da malha de grampeamento teve de ser adotada levando em conta a presença do duto passante no interior do talude. Além disso, a conformação do talude na geometria estabelecida foi feita por meio da inclusão de sacos de solo-cimento a fim de conter erosões iniciais. Definiu-se o uso de grampos de 20mm de diâmetro, espaçamento horizontal de 1,5m e espaçamento vertical variável.

3.2.2.2 Resultados das análises

Com a malha de grampeamento definida, foi realizada a análise determinística de estabilidade das seções grampeadas pelos métodos de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price. De maneira conjunta, realizou-se a análise probabilística das seções pela MCS pelo mesmo software. Com essa metodologia pode-se determinar as probabilidades de falha e índices de confiabilidade, para cada correlação e seção, assim como plotar histogramas. A fim de garantir robustez à análise, utilizou-se o valor de 100 mil simulações. A inserção desse dado no software juntamente com os parâmetros estatísticos e a determinação do método de busca definem a análise. O método de busca foi definido como mínimo global, cuja análise probabilística é realizada especificamente na superfície de deslizamento crítica, previamente obtida por meio das análises determinísticas de estabilidade.

O resumo de resultados encontrados pode ser visto na tabela 05 a seguir:

Tabela 05. Resultados das análises determinísticas e Simulações de Monte Carlo

Resultados	Bishop Simplificado			Morgenstern-Price		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
FS	1,372	1,529	1,246	1,426	1,535	1,307
β	3,612	6,186	2,545	5,510	7,207	4,085
PF	6,00E-05	0,00E+00	4,82E-03	0,00E+00	0,00E+00	7,00E-05

A análise apresentou maiores variações dos valores de FS entre métodos determinísticos na seção estabilizada (centésimos) em relação às análises naturais (milésimos). Tal observação é coerente, visto que o método de Bishop Simplificado desconsidera forças verticais entre fatias, o que limita sua precisão especialmente em cenários com elementos estabilizadores, como os grampos. Já o método de Morgenstern-Price, por considerar todas as condições de equilíbrio, representa de forma mais realista essas interações.

Com o olhar probabilístico observa-se que os índices de confiabilidade acompanharam a magnitude do FS, ratificando o entrelace segurança-confiabilidade. Os Fatores de Segurança e parâmetros probabilísticos também se modificaram significativamente de acordo com as correlações utilizadas. Essa análise reforça atenção especial ao cálculo da resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo (q_s), uma vez que diferentes correlações utilizadas para estimar esse parâmetro podem levar a resultados distintos, que poderiam mudar a classificação de confiabilidade do talude. As PFs apresentaram-se não nulas no caso de Bishop Simplificado e correlação 1, de Ortigão (1997) e para os casos com uso da correlação 3, de Springer (2006), verificada como a mais conservadora, com PF de 0,482%, ou 482 rupturas em 100 mil análises para o caso crítico.

Cabe ressaltar que ocorrências de PFs nulas não significam inexistência de uma PF mínima, em campo, mas apenas que, dentro da quantidade de combinações analisadas, não se registrou nenhum caso com $FS < 1$. Assim, a representatividade dos resultados depende diretamente da minuciosidade da análise computacional, já que quanto maior o número de análises, maior a chance de capturar cenários raros de ruptura. Por exemplo,

ao se adotar 100 mil simulações, uma nulidade indica que a probabilidade de falha é menor que 10^{-5} . Nesse sentido, torna-se fundamental estabelecer um número suficientemente robusto de simulações, de modo a assegurar previsibilidade adequada e verificar se os valores obtidos se mantêm compatíveis com níveis aceitáveis de confiabilidade, reduzindo riscos associados ao modelo teórico adotado. Sob essa óptica, Wolff (1996) indica que, em análises de estabilidade de taludes usuais, uma probabilidade de ruptura da ordem de 10^{-3} ($\beta \approx 3$) pode ser admitida como aceitável, constituindo um parâmetro de referência para a validação dos resultados numéricos, e também um direcionamento para a definição do quantitativo simulacional necessário. Assim, apenas o caso Bishop Simplificado e correlação 3, estaria acima do limite de confiabilidade.

A Figura 4 apresenta o histograma do fator de segurança para o caso crítico, na qual destaca-se em vermelho as simulações com fator de segurança menor que 1, representando a PF.

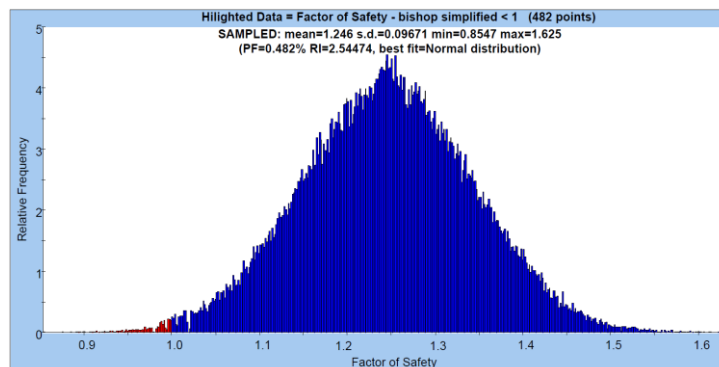


Figura 4. Distribuição do FS, com área representativa da PF destacada para o caso crítico

Para aplicação do método FOSM, há a necessidade de se escolher de forma prévia uma porcentagem de incremento nas variáveis, de modo a computar o efeito na variação do FS. Uma recomendação é a aplicação de acréscimos de 10% para o método, conforme Sandroni e Sayão (1992). Essa abordagem visa garantir que a aproximação linear local seja válida, evitando distorções por incrementos excessivamente pequenos ou grandes, mas nem sempre é válida, como explicado no tópico 2.2.

Ademais, foram testadas diferentes porcentagens de acréscimo a fim de verificar a aplicabilidade. Para esse estudo foram verificados os incrementos de 15%, 10%, 8%, 5% e 1% nos parâmetros, em que, para aplicação em *qsadm*, foi utilizada a correlação 1, de Ortigão (1997), como mostra o gráfico da Figura 5, abaixo.

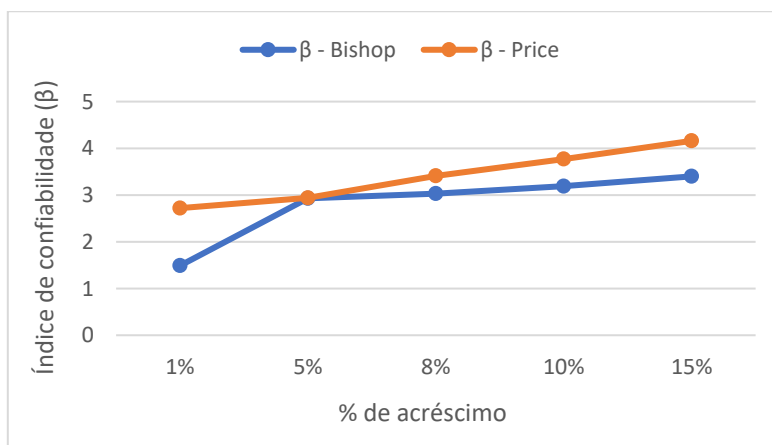


Figura 5. Gráfico de verificação da convergência de diferentes acréscimos no método FOSM

Os resultados obtidos para os diferentes percentuais de acréscimo não demonstraram tendência de estabilização nos valores do índice de confiabilidade (β), tanto para o método de Bishop Simplificado quanto para o de Morgenstern-Price. Observa-se que o comportamento do β segue uma tendência crescente com o aumento do acréscimo, sem indicar convergência ou estabilização, o que pode comprometer a confiabilidade da aproximação utilizada pelo FOSM.

Particularmente para o método de Bishop Simplificado, nota-se que um acréscimo de 5% gera um índice β de 2,93, enquanto para um acréscimo de apenas 1%, β resulta em 1,49. Essa diferença pode ser significativa

e resulta em um aumento de duas ordens de grandeza na probabilidade de falha (PF), de $1,68 \times 10^{-3}$ para $6,80 \times 10^{-2}$, evidenciando a sensibilidade do método a pequenas variações no acréscimo percentual.

Adicionalmente, verifica-se que a única situação em que os dois métodos determinísticos apresentaram valores praticamente coincidentes de β foi com 5% de acréscimo, ambos em torno de 2,93–2,94, o que pode indicar um ponto de maior coerência entre métodos nessa faixa específica de perturbação.

3 CONCLUSÕES

Com relação às análises determinísticas, pode-se inferir que taludes grampeados apresentam maior variabilidade nos resultados de fatores de segurança calculados por diferentes métodos em comparação com a variabilidade de resultados nos taludes naturais.

Com relação aos métodos probabilísticos, verificou-se que os fatores de segurança determinísticos têm influência significativa nos índices de confiabilidade e probabilidade de ruptura.

Quanto ao número de simulações para o método MCS, torna-se fundamental estabelecer um número robusto, de modo a assegurar previsibilidade adequada e verificar se os valores obtidos se mantêm compatíveis com níveis aceitáveis de confiabilidade, reduzindo riscos associados ao modelo teórico adotado.

Dentre as correlações analisadas para o cálculo da resistência ao arrancamento no contato solo grampo, a correlação 3, de Springer (2006), mostrou-se a mais conservadora para o caso analisado. A correlação 2, de Ortigão e Sayão (2004), em contrapartida, revelou-se a mais otimista.

Quanto ao método FOSM, seu comportamento sugere que sua aplicação pode ser inadequada para situações específicas com elevada não linearidade ou com fortes interações entre variáveis, como é comum em sistemas com grampeamento de solo e propriedades altamente incertas. Nesses casos, métodos robustos como a MCS ou o Método de Confiabilidade de Segunda Ordem são preferíveis, pois independem de aproximações locais.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assis, A.P., Espósito, T.J., Gardoni, M.G., Silva, P.D.E.A. & J.A. Maia (2012). *Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia*. Publicação G.AP-002/2012. Apostila do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, UNB, Brasília.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. “NBR 16920-2 - Muros e Taludes em solos reforçados - Parte 2: Solos grampeados.” 2021.
- Christian, J. T.; Ladd, C. C.; Baecher, G. B. *Reliability applied to slope stability analysis*. Journal of geotechnical engineering, v. 120, n. 12, p. 2180-2207, 1994.
- Gerscovich, D. M. S. *Estabilidade de taludes*. Oficina de textos. Rio de Janeiro, 2016.
- Harr, M. E. *Reliability- Based Design in Civil Engineering*. McGraw- Hill, Inc., U.S.A. 1987.
- Neter, J., Wassermann, W. e Whitmore, G. A., *Applied Statistics*. Allyn and Bacon, Inc., Boston, E.U.A., segunda edição. 1982.
- Ortigão, J. A. R. 1997. *Solo, Ensaios de arrancamento para projetos de Grampeamento*. ABMS.
- Ortigão, J. A. R., and A. S. Sayao. 2004. *Handbook of Slope Stabilisation*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Phoon, K.; Kulhavy, F. H. *Characterization of geotechnical variability*. Canadian geotechnical journal, v. 36, n. 4, p. 612-624, 1999.
- Ribeiro, R. C. H. *Applications of probability and statistics in geotechnical analyses*. 2008.
- Sandroni S. S.; Sayão, A. S. F. J. *Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes*. 1a Conferência Brasileira sobre Estabilidades de Taludes, Rio de Janeiro, ABMS, vol. 2, pp. 523-535, 1992.
- Springer, F. O. 2006. *Ensaios de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss*. PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Wolff, T. F. *Probabilistic slope stability in theory and practice*. In: *Uncertainty in the geologic environment: From theory to practice*. ASCE, 1996. p. 419-433.