

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise Paramétrica de Estabilidade de Dois Taludes Homogêneos Assentes sobre Solo e Rocha

Isabella Marques Torres de Souza

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,
isabella7.torres@gmail.com

Mariana Aparecida Vieira

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,
marianavieira49@hotmail.com

Sophia Kallena Borba Claro

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,
sopclaro@gmail.com

Naloan Coutinho Sampa

Professor, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, naloan.sampa@ufsc.br

RESUMO: Rupturas de taludes são recorrentes no Brasil, principalmente na época chuvosa devido a uma série de fatores que contribuem para a redução da resistência do solo. Dependendo do local e da magnitude desses eventos, as consequências podem ser dramáticas em termos de perdas de vida, prejuízos econômicos e impactos ambientais. Por consequência, previsões de rupturas e análise de estabilidade visam auxiliar na tomada de medidas preventivas ou corretivas necessárias em taludes instáveis. O artigo apresenta e discute os resultados de uma análise paramétrica em dois taludes homogêneos assentes sobre solo e rocha. A análise consistiu na avaliação da influência dos parâmetros de resistência do solo, da geometria do talude, da sobrecarga e dos métodos de análise no fator de segurança. A faixa de variação das variáveis foi definida com base na literatura, sendo que o solo é considerado isotrópico, obedecendo o critério de ruptura Mohr-Coulomb. As simulações foram feitas no *software* SLOPE/W da GeoStudio, considerando os métodos de Fellenius e Bishop Simplificado. Como resultados dos 100 casos analisados, são apresentadas figuras que mostram a influência das variáveis analisadas no fator de segurança. Embora de forma e intensidade diferentes, todas as variáveis analisadas e os métodos adotados influenciam diretamente no fator de segurança, sendo que a razão coesiva e sobrecarga são as que proporcionam maiores influências. Para a faixa dos valores atribuídos às variáveis, os taludes analisados são considerados estáveis e apresentam fatores de segurança maiores que 1,5.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Talude, Análise Paramétrica, Bishop Simplificado, Fellenius, Mohr-Coulomb.

ABSTRACT: Slope failures are recurrent in Brazil, mainly in the rainy season due to several factors that contribute to the reduction of soil resistance. Depending on the location and magnitude of these events, the consequences can be dramatic in terms of loss of life, economic damage and environmental impacts. Consequently, failure predictions and stability analysis aim to assist in taking necessary preventive or corrective measures on unstable slopes. The paper presents and discusses the results of a parametric analysis on two homogeneous slopes resting on soil and rock. The analysis consisted of evaluating the influence of soil strength parameters, slope geometry, surcharge and analysis methods on the factor of safety. The range of variation of the variables was defined based on the literature, and the soil is considered isotropic, obeying the Mohr-Coulomb failure criterion. The simulations were performed in SLOPE / W software from GeoStudio, considering the Fellenius and Simplified Bishop methods. As a result of the 100 cases analyzed, figures that demonstrate the influence of the analyzed variables on the factor of safety are presented. Although of different ways and intensity, all the analyzed variables and the adopted methods directly influenced the factor of safety, and the cohesive ratio and surcharge are the ones that provided the greatest influence. For the range of values assigned to the variables, the analyzed slopes are considered stable and have factors of safety greater than 1.5.



KEYWORDS: Slope Stability, Parametric Analysis, Simplified Bishop, Fellenius, Mohr-Coulomb.

1 Introdução

Os taludes são extensões de solo, de rocha ou de solo e rocha com declividades mensuráveis, podendo sofrer deslocamentos em função de sua inclinação, sendo que os artificiais estão presentes em obras de terra, tais como aterros, barragens de terra ou cortes em rodovias e ferrovias, etc, enquanto que os naturais se desenvolvem em consequência de processos naturais, principalmente a erosão, durante um longo período (Barnes, 2016, Bodó e Jones, 2017)

A estabilidade dos taludes é governada principalmente pelo modelo geológico, forma construtiva e condições da água subterrânea através da variação da resistência ao cisalhamento dos solos e das forças de gravidade. Portanto, os taludes são considerados instáveis quando as forças de gravidade atuantes na massa do solo excedem a resistência ao cisalhamento do solo (Barnes, 2016).

As consequências de rupturas de taludes instáveis, dependendo do local da ocorrência do evento, podem ser catastróficas para a vida, a economia e o meio ambiente. Para evitar ou minimizar as consequências, recorre-se a análise de estabilidade de taludes que é considerada uma tarefa importante, interessante e desafiadora da engenharia civil. Ela visa prevenir rupturas de taludes durante e após a construção de obras de terra ou estabilizar taludes naturais, intactos, antes ou após a ocorrência de instabilidade. Geralmente, ela é feita na condição não drenada (curto prazo) sem ocorrência considerável da dissipação do excesso de poropressão ou na condição drenada (longo prazo) com dissipação significativa do excesso de poropressão (Bodó e Jones, 2017, Duncan *et al.*, 2014). Em ambos os casos, os métodos baseados no conceito de equilíbrio limite são utilizados para estimar o menor fator de segurança relacionado à superfície de deslizamento crítico.

Com a implementação dos métodos de equilíbrio limite em *softwares*, a estabilidade de taludes simples e complexos passa a ser analisada de forma rápida e precisa, sem a necessidade de ábacos e tabelas. Em intervalos de minutos, diversas análises podem ser realizadas em modelos geomecânicos mais complexos em termos de características do solo, condições da água subterrânea e carregamentos externos.

Partindo do pressuposto que a estabilidade de talude depende das características do solo, da geometria do talude e das condições do carregamento, esse artigo se propõe a analisar parametricamente a estabilidade de dois taludes homogêneos e hipotéticos assentes sobre solo e rocha, variando os parâmetros de resistência do solo, da geometria do talude, a sobrecarga e os métodos de análise.

2 Fundamento Teórico – Análise de Estabilidade de Taludes

A análise de estabilidade de taludes naturais e artificiais é feita geralmente através de um conjunto de métodos – Círculo de Atrito, Sueco e Cunhas – baseados no conceito de equilíbrio limite que visam determinar o menor fator de segurança, averiguar a estabilidade, prevenir a ruptura, analisar escorregamentos, etc.

Os Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como rígido-plástico, na iminência de entrar no processo de escorregamento (Massad, 2010). Por causa disso, os métodos são formulados com base nas equações de equilíbrio estático em termos de forças horizontais ou/e de momentos que atuam na massa do solo.

Dentre os três métodos supracitados, o Método Sueco (das Fatias ou lamelas) é o mais utilizado na prática para a análise de estabilidade de taludes finitos com superfícies de deslizamentos circulares. Este método é formulado para representar uma condição de linhas de ruptura aproximadamente circulares e escorregamentos dos fragmentos da massa de solo instável em fatias ou lamelas, com faces verticais (Massad, 2010). Em geral, considera-se que o segmento de solo acima do arco circular de raio R tem espessura unitária e é dividido em várias fatias verticais, geralmente de largura igual a b , altura h variável, comprimento l e ângulo α da base em relação à linha horizontal. Nessa condição, todas as fatias giram em torno do centro do círculo (O) como corpos rígidos, de modo que o fator de segurança seja o mesmo para cada fatia (Barnes, 2016).

O fator de segurança (FS) para a superfície de deslizamento em análise (Equação 1) é geralmente definido como a relação entre a resistência ao cisalhamento máxima disponível em torno da superfície de



deslizamento, τ_f , e a tensão de cisalhamento, τ_m , induzida pelo momento desestabilizante (Barnes, 2016). Vale ressaltar que o critério de ruptura Mohr-Coulomb é normalmente considerado ao longo da superfície de deslizamento.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (1)$$

Por via de regra, o requisito fundamental para a estabilidade de taludes é a garantia de que a resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura seja maior do que a tensão de cisalhamento necessária para o equilíbrio. Para essa análise, é importante frisar que os fatores de segurança podem ser determinados com base na relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e a tensão de cisalhamento ($FS = \tau_f/\tau_m$) ou através da relação entre o momento resistente e o momento desestabilizante ($FS = M_R/M_D$).

Os métodos considerados na análise divergem por causa das considerações e simplificações que os autores fizeram nas suas formulações, sendo que as principais diferenças residem na satisfação ou não das condições de equilíbrio de momentos ou de forças, e também na consideração ou não das forças normais e tangenciais entre as fatias (Geoslope, 2007). A Tabela 1 lista os principais métodos baseados no conceito de equilíbrio limite e a indicação de quais condições de equilíbrio e das forças entre as fatias que os mesmos satisfazem e consideram.

Tabela 1. Equações de equilíbrio satisfeitas e forças consideradas entre as fatias (Geoslope, 2007).

Método	Equilíbrio de Momentos	Equilíbrio de Forças	Força normal entre fatias (E)	Força cisalhante entre fatias (X)
Fellenius	sim	não	não	não
Bishop Simplificado	sim	não	sim	não
Janbu Simplificado	não	sim	sim	não
Spencer	sim	sim	sim	sim
Morgenstern-Price	sim	sim	sim	sim
Corpo de Engenheiros - 1	não	sim	sim	sim
Corpo de Engenheiros - 2	não	sim	sim	sim
Lowe-Karafiath	não	sim	sim	sim
Janbu Generalizado	sim	sim	sim	sim
Sarma	sim	sim	sim	sim

O método de Fellenius (1936) é um dos mais simples e prático pelo fato de satisfazer apenas o equilíbrio de momentos e desconsiderar as forças normais e cisalhantes entre as fatias adjacentes. Por consequência, apresenta menores valores de FS em relação aos demais métodos.

Para um talude homogêneo - coesão (c') e o ângulo de atrito (ϕ') constantes ao longo da superfície de deslizamento - o fator de segurança do método de Fellenius pode ser determinado a partir da Equação 2, tendo em consideração o equilíbrio de momentos e a desconsideração das forças normais e cisalhantes entre as fatias.

$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{R(S + \sum F')}{R \sum T} = \frac{\sum c'l + \sum [(N - ul) \operatorname{tg} \phi']}{\sum T} = \frac{\sum c'l + \sum [(W \cos \alpha - ul) \operatorname{tg} \phi']}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \quad (2)$$

Sob outra perspectiva, o método de Bishop Simplificado (1955) satisfaz também somente o equilíbrio de momentos, porém leva em conta as forças normais entre as fatias. Por esse motivo, a equação do fator de segurança não é linear e requer um procedimento iterativo de cálculo, como será mostrado mais adiante. A Equação 3 permite estimar o fator de segurança de um talude homogêneo, sendo que a resistência ao cisalhamento mobilizada na base da fatia é dada por c'/FS e $\operatorname{tg} \phi'/FS$.



$$FS = \frac{M_R}{M_D} = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \frac{[c'l \cos \alpha + (W - U \cos \alpha) \operatorname{tg} \phi']}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \phi'}{FS} \sin \alpha} \quad (3)$$

Uma vez que o FS ocorre em ambos os membros da Equação 3, há necessidade sempre de atribuir um valor inicial para o FS do lado direito, a fim de obter um valor para o FS do lado esquerdo. Por interações sucessivas, obtém-se a convergência do valor verdadeiro do FS.

Em ambas equações, M_R e M_D são os momentos resistentes e desestabilizantes, respectivamente, R é o raio do círculo, S , T e F' são força resistente de coesão, força tangencial e força efetiva de atrito, respectivamente, c é a coesão, l é o comprimento da fatia, N é a componente normal do peso da fatia (W), u é a poropressão, ϕ' é o ângulo de atrito e δ é o ângulo da base da fatia.

Com relação aos demais métodos, não serão dadas as suas respectivas equações por não fazerem parte do escopo principal deste artigo, porém algumas considerações a respeito são resumidas na Tabela 1. De modo geral, os fatores de segurança calculados através dos métodos que satisfazem somente o equilíbrio de forças tendem a ser menores que os calculados através dos métodos que satisfazem o equilíbrio de momentos, para valores de λ menor que 0,42. Por outro lado, os métodos que satisfazem ambas as condições de equilíbrio e consideram ainda as forças normais e cisalhantes entre as fatias são as mais rigorosas, precisas e trabalhosas, demandando assim o uso de *softwares* e computadores (Geoslope, 2007).

Atualmente, existem vários *softwares* no mercado voltados para análise de estabilidade de taludes de forma rápida e precisa, determinando o menor fator de segurança dentre os vários calculados com arcos de círculos de diferentes centros e raios. Para além da praticidade, esses *softwares* também permitem análises de tensões e deformações no corpo de talude com perfis de solo mais complexos, condições complexas de água subterrânea, carregamentos externos e efeitos sísmicos (Barnes, 2016).

Independente da abordagem considerada, é importante frisar que a estabilidade de um talude, seja natural ou artificial, é afetada por vários processos diferentes que podem levar a redução da resistência ao cisalhamento ou o aumento da tensão de cisalhamento de equilíbrio. Os principais processos consistem na mudança da geometria do talude, carregamento no topo e descarregamento no pé, choque ou vibrações, rebaixamento do lençol freático e mudanças no regime de chuva e infiltração, ruptura progressiva, intemperismo, erosão interna, etc. (Duncan et al.).

Levando tudo isso em consideração, a NBR 11682 (2009) e vários autores recomendam faixa de valores mínimos de fatores de segurança (1,2 a 1,5) em função do nível de segurança contra danos à vida e contra danos materiais e ambientais, e também em função da variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos. De modo geral, um talude considerado estável apresenta fator de segurança maior que 1,2 e 1,5 para riscos considerados baixo e alto, respectivamente.

3 Procedimentos Metodológicos

A Figura 1 mostra os dois modelos de taludes homogêneos considerados nas análises paramétricas realizadas no *software* SLOPE/W da GeoStudio. O primeiro modelo representa a condição de um talude assente sobre o solo de igual característica, ao passo que o segundo modelo representa um talude sobre uma camada rochosa – mais resistente e rígida.

Em ambos os modelos, são variados os parâmetros do solo, a geometria do talude e a carga externa. O nível da água encontra-se abaixo das fundações dos taludes de modo que não influencia na estabilidade dos mesmos. Os valores de referência da condição definida como padrão são 4 m para a altura dos taludes (H), 35° para ângulo de inclinação dos taludes (β), 27,5° para o ângulo de atrito do solo (ϕ'), 19 kN/m³ para o peso específico do solo (γ), 0,75 para a razão coesiva ($c/(\gamma H)$) e sem sobrecarga ($q = 0 \text{ kN/m}^2$). A faixa de variação das propriedades do solo adotado enquadra-se dentro de solos classificados como areia argilosa.

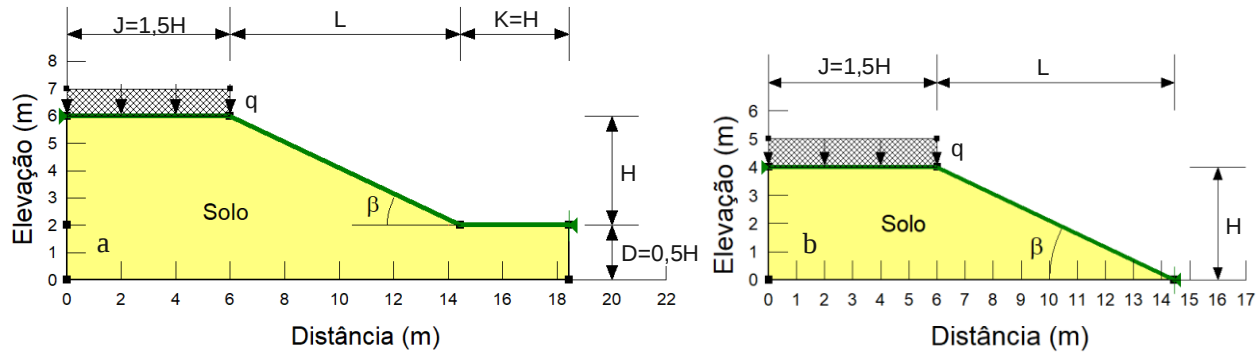


Figura 1. Modelos de taludes – a) sobre solo, b) sobre rocha.

A Tabela 2 apresenta a faixa de variação das variáveis consideradas para ambos os modelos. Para análise da influência de uma certa variável no FS, os demais parâmetros mantêm-se constantes, assumindo os valores de referência apresentados no parágrafo anterior. Ao todo, foram simulados e analisados 100 casos, 50 para cada modelo, considerando os métodos de Fellenius - 25 casos, e o método de Bishop Simplificado – 25 casos.

Tabela 2. faixa das variáveis analisadas no estudo paramétrico.

Variável	Modelo 1 (sobre solo)	Modelo 2 (sobre rocha)
Ângulo de atrito - ϕ (°)	22,5, 25, 27,5, 30, 32,5	
Inclinação do talude - β (°)	25, 30, 35, 40, 45	
Razão coesiva - $c/(\gamma H)$	0,05, 0,10, 0,25, 0,50 e 0,75	
Embutimento normalizado - D/H	0,05, 0,25, 0, 50, 0,75 e 1,00	-
Largura da crista normalizada - J/H	1,5	0,5, 1,0, 1,5, 2,0, e 2,5
Sobrecarga - q (kN/m ²)	0, 50, 100, 150 e 200	
Métodos de cálculo	Fellenius e Bishop Simplificado	

Após a simulação de cada caso, valores mínimos de fator de segurança e as suas respectivas superfícies de deslizamento foram extraídos no *software* para elaboração das figuras apresentadas a seguir de modo a auxiliar na avaliação das influências das variáveis analisadas no fator de segurança.

4 Resultados

Os 100 casos simulados e analisados resultaram em 100 superfícies de deslizamento circular críticas e 100 fatores de segurança mínimos. Por questão de espaço, a Figura 2 ilustra somente as duas condições típicas de taludes com o destaque para a superfície de deslizamento crítica e a discretização da massa de solo em fatias. As superfícies de deslizamento apresentam um padrão característico observado em solos homogêneos – inicia na crista e termina no pé, sem envolver muita massa de solo, resultado da condição adotada neste trabalho.

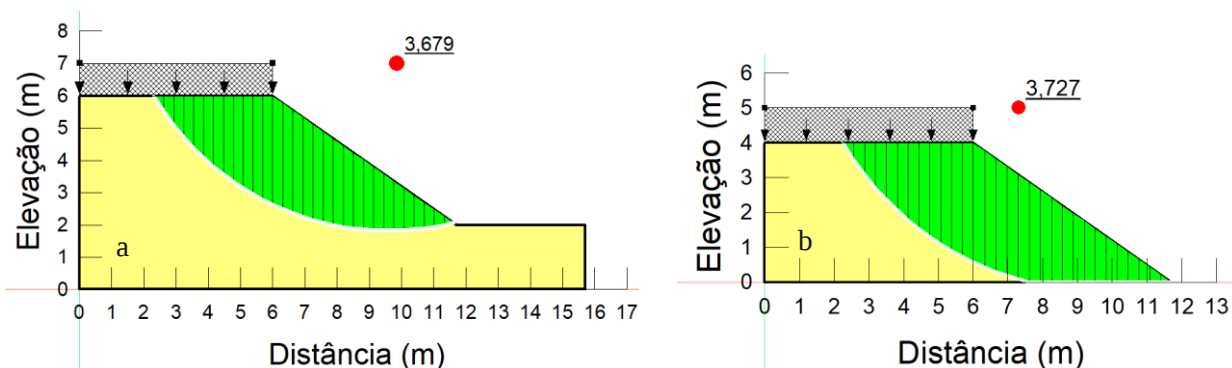


Figura 2. Representação das superfícies cilíndrica de deslizamento e das fatias – a) modelo 1 e b) modelo 2.

A variação linear do FS em função dos parâmetros de solo é mostrada na Figura 3. Como era esperado, nota-se a influência positiva do aumento do ângulo de atrito e da razão coesiva na estabilidade do talude. Dentro da faixa de variação do ângulo de atrito, o FS aumentou de aproximadamente 5,8 para 6,5 no modelo 1 e de 6,2 a 6,8 no modelo 2. Por outro lado, a variação do FS em relação à razão coesiva fica entre 1,3 a 6,2 e entre 1,3 a 6,5 nos modelos 1 e 2, respectivamente. Corroborando a literatura, os FS do método de Bishop Simplificado são maiores que os de Fellenius em todas as análises. Por exemplo, a razão média entre os FS do método de Bishop Simplificado e de Fellenius (FS_{BS}/FS_F) é de aproximadamente 2,48% (ϕ) e 4,10% ($c/(\gamma H)$) no modelo 1 e 1,29% (ϕ) e 2,90% ($c/(\gamma H)$) no modelo 2.

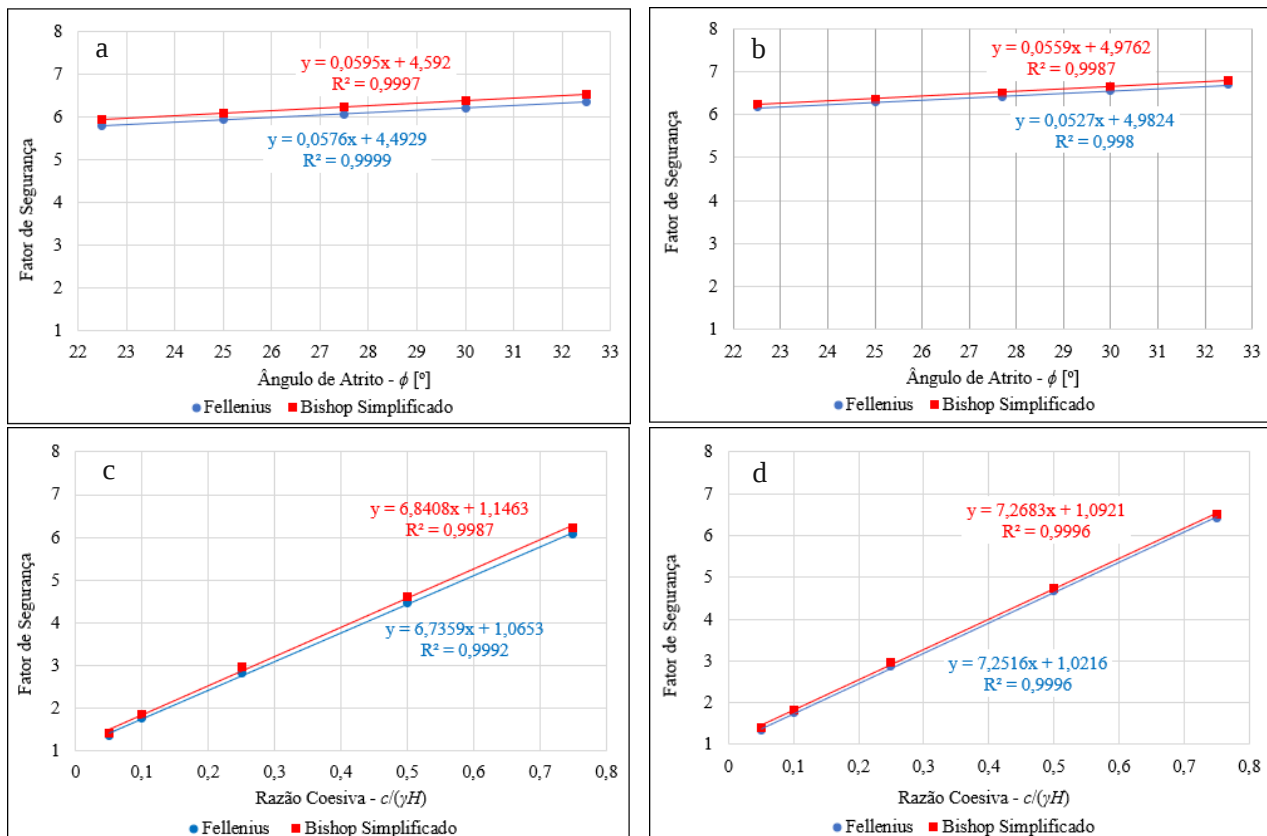


Figura 3. Influência dos parâmetros de solo no FS – a e c) modelo 1 e b e d) modelo 2.

A comparação direta dos resultados dos modelos 1 e 2 não apresenta diferença significativa, apesar dos maiores valores de segurança serem observados no modelo 2. Diante do exposto, é razoável afirmar que a consideração do embutimento normalizado de 0,5 como referência não é suficiente para que o comportamento do talude do modelo 1 divirja do modelo 2.

A Figura 4 apresenta a variação do fator de segurança em relação às variáveis da geometria dos taludes dos modelos 1 e 2. É possível observar que a inclinação do talude faz reduzir o FS de 7,0 para 5,6 no modelo 1 e de 7,9 para 5,6 no modelo 2. A variação do embutimento normalizado e da largura da crista normalizada não influenciam praticamente o FS, tendo assim uma média de aproximadamente 6,20 no modelo 1 e de 6,49 no modelo 2. Esse comportamento não corrobora de forma clara a conclusão de vários autores que afirmam que o FS aumenta com a redução do embutimento normalizado. Uma das possíveis explicações para esse comportamento é a menor dimensão do talude e da carga aplicada, o que acaba por envolver menores níveis de tensões e deformações na massa do solo.

Novamente, os valores do FS do método de Bishop Simplificado são maiores que os do método de Fellenius em todos os casos apresentados na Figura 4, como era esperado e por razões acima citadas. A razão média (FS_{BS}/FS_F) é de aproximadamente 2,90% (β) e 2,24% (D/H) no modelo 1 e 1,29% (β) e 2,90% (J/H) no modelo 2.

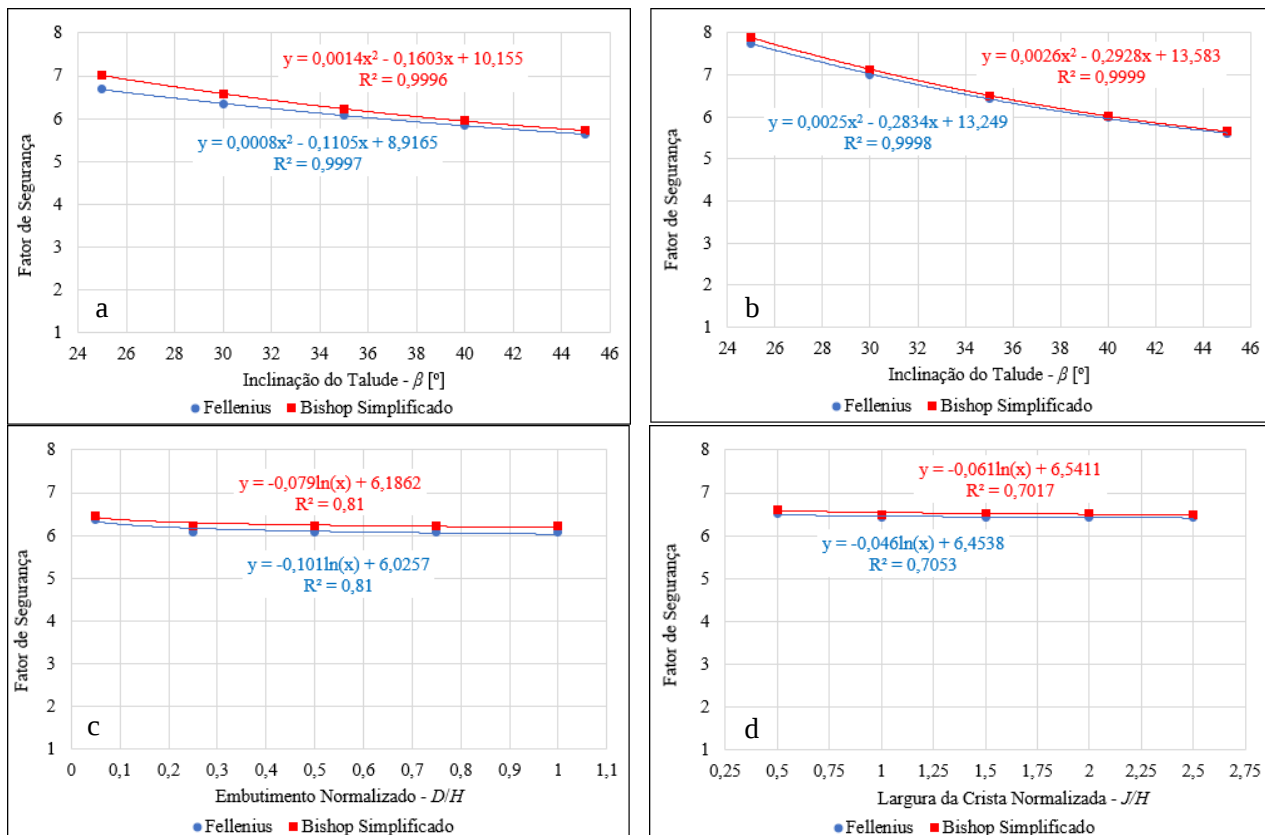


Figura 4. Influência das variáveis de geometria do talude no FS – a) e c) modelo 1 e b) e d) modelo 2.

Por fim, a Figura 5 mostra a variação do FS em função da sobrecarga aplicada na crista do talude. De forma clara, nota-se a redução significativa e não linear do FS com o aumento da sobrecarga, saindo de 6,10 para 1,78 no modelo 1 e de 6,43 para 1,93 no modelo 2. Qualquer carga externa aplicada no talude atua desfavoravelmente à sua estabilidade, porém de forma não linear. Nota-se uma tendência de estabilização de FS para valores de sobrecarga maiores que 150 kPa devido às condições adotadas no modelo geomecânico. A razão média (FS_{BS}/FS_F) é de aproximadamente 5,86% e 6,13% nos modelos 1 e 2, respectivamente.

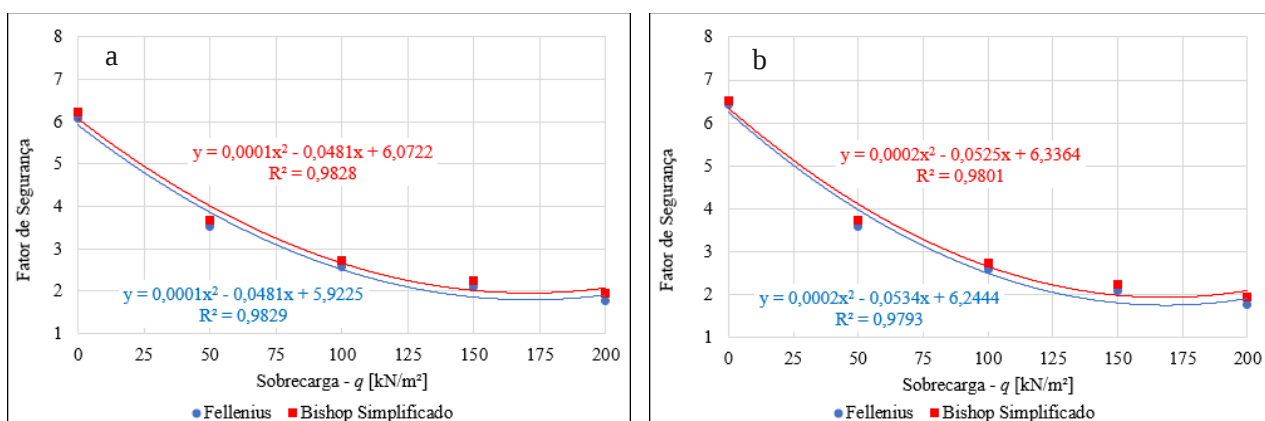


Figura 5. Influência da sobrecarga no FS – a) modelo 1 e b) modelo 2.

Em todos os casos analisados, os taludes são considerados estáveis por apresentarem fatores de segurança maiores que 1,5, reflexo dos parâmetros de solo, da geometria do talude e da sobrecarga considerados nas análises. Corroborando as conclusões dos estudos anteriores, o aumento dos parâmetros de



solo afetam de forma positiva e linear a estabilidade de taludes, enquanto que o aumento da sobrecarga e do ângulo de talude contribuem para a instabilidade do talude.

5 Conclusão

O presente artigo analisou parametricamente a influência dos parâmetros de solo, da geometria do talude, da sobrecarga e do método de cálculo no valor de fator de segurança, considerando dois modelos de taludes homogêneos assentes sobre solo e rocha. Com base nos resultados obtidos, é possível estabelecer as seguintes conclusões como o síntese do estudo:

- 1) Todos os 100 casos de taludes analisados são estáveis, com fatores de segurança maiores que 1,5 devido ao intervalo das variáveis consideradas. Em função disso, sugere-se as mesmas análises para taludes homogêneos e estratificados de maiores extensões e alturas;
- 2) A variação crescente dos parâmetros do solo aumentaram o fator de segurança de ambos os modelos. No modelo 1, o aumento do ângulo de atrito e da razão coesiva proporcionaram um aumento do FS de 5,8 para 6,5 e de 1,3 para 6,2, respectivamente. Os resultados do modelo 2 seguiram a mesma tendência, apresentando valores do FS com a mesma ordem de grandeza.
- 3) O aumento da sobrecarga e do ângulo do talude diminuíram o FS, contudo o maior efeito é observado na variação da sobrecarga. Por outro lado, a variação do embutimento normalizado e da largura da crista normalizada não tendem a afetar a estabilidade dos taludes;
- 4) Os fatores de segurança do método de Bishop Simplificado apresentaram, em todos os casos, valores maiores que os do método de Fellenius, como era esperado. A razão entre os fatores de segurança de Bishop Simplificado e de Fellenius depende da variável analisada, porém está dentro do intervalo de 1,29% a 6,13%;
- 5) O *software* utilizado para análises apresentou um excelente desempenho, permitindo a simulação rápida de todos os casos. Aliado a isso, os resultados obtidos possuem padrões de comportamentos similares aos encontrados na literatura, o que realça de certa forma a qualidade do *software* para análises de problemas que envolvem estabilidade de taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Barnes, G.E. (1999). A commentary on the use of the pore pressure ratio ru in slope stability analysis. *Ground Engineering*, 32, n. 8, p. 32-40.
- Barnes, G.E. (2016). *Mecânica dos Solos: princípios e práticas*. 3º ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- Bishop, A.W., Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10, n. 4, p. 129-150.
- Bodó, B., Jones, C. *Introduction to soil mechanics*. 1st Ed. John Wiley & Sons, 2013.
- Duncan, M.J., Wright, S.G., Brandon, T.L. *Soil Strength and Slope Stability*. 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014.
- GeoStudio (2007). *SLOPE/W 2007 – Slope Stability Analysis, Version 7.15, User's Manual*, Geo-Slope International, Alberta, Canada.