

## Comparative Analysis of Slope Stability Using Simplified Fellenius and Bishop Methods: Influence of Geotechnical Parameters on Factor of Safety

### Análise Comparativa da Estabilidade de Taludes Utilizando Métodos de Fellenius e Bishop Simplificado: Influência dos Parâmetros Geotécnicos no Fator de Segurança

Article Info:

Article history: Received 2024-05-10 / Accepted 2024-09-06 / Available online 2024-09-09

doi: 10.18540/jcecv10iss6pp19563



**Carlos Eduardo Pereira de Sousa**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0311-7650>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: [cep.sousa@discente.ufma.br](mailto:cep.sousa@discente.ufma.br)

**Alexandre Magno da Silva Lago Gonçalves**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6481-2230>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: [alexandre.lago@discente.ufma.br](mailto:alexandre.lago@discente.ufma.br)

**Christiano de Sousa Brandão**

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0352-1883>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: [cs.brandao@discente.ufma.br](mailto:cs.brandao@discente.ufma.br)

**George Fernandes Azevedo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2207-7282>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: [gf.azevedo@ufma.br](mailto:gf.azevedo@ufma.br)

#### Abstract

The present article investigates the stability of slopes, which is essential for preventing natural disasters such as landslides that affect infrastructure and human lives. Highlighting the relevance of landslides in Brazil and globally, the study emphasizes the need for efficient methods to analyze and predict these events. Using the Fellenius and Simplified Bishop methods, the research calculates the factor of safety for slopes in the Barbosa area, Colombia, considering specific geotechnical parameters, including cohesion, friction angle, and soil unit weight. With the aid of Slide2 software, the analyses detail how variations in these parameters influence slope stability. The results show that a deep understanding of these parameters is crucial for predicting and mitigating landslides. It is concluded that both methods are effective in assessing slope stability, highlighting the importance of understanding how different conditions affect the factor of safety. The analyses provide valuable information for geotechnical engineering, enabling the implementation of preventive measures in risk areas. In addition to contributing to technical knowledge, the research offers a foundation for developing precise and effective strategies to ensure infrastructure safety, mitigating the impacts of natural disasters. The insights provided can guide engineers and specialists in adopting safer practices and developing action plans for landslide prevention, benefiting society and the environment.

**Keywords:** Stability. Factor of Safety. Fellenius. Simplified Bishop. Slide. Slope. Mass Movement.

#### Resumo

O presente artigo investiga a estabilidade dos taludes, essencial para prevenir desastres naturais como deslizamentos, que afetam infraestrutura e vidas humanas. Destacando a relevância dos

deslizamentos no Brasil e globalmente, o estudo sublinha a necessidade de métodos eficientes para analisar e prever esses eventos. Utilizando os métodos de Fellenius e Bishop Simplificado, a pesquisa calcula o fator de segurança dos taludes na área de Barbosa, Colômbia, considerando parâmetros geotécnicos específicos, incluindo coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo. Com o auxílio do software Slide2, as análises detalham como variações nesses parâmetros influenciam a estabilidade dos taludes. Os resultados mostram que a compreensão aprofundada desses parâmetros é crucial para prever e mitigar deslizamentos. Conclui-se que ambos os métodos são eficazes na avaliação da estabilidade dos taludes, destacando a importância de entender como diferentes condições afetam o fator de segurança. As análises fornecem informações valiosas para a engenharia geotécnica, permitindo a implementação de medidas preventivas em áreas de risco. Além de contribuir para o conhecimento técnico, a pesquisa oferece uma base para o desenvolvimento de estratégias precisas e eficazes na garantia da segurança das infraestruturas, mitigando os impactos dos desastres naturais. Os insights fornecidos podem orientar engenheiros e especialistas na adoção de práticas mais seguras e na elaboração de planos de ação para a prevenção de deslizamentos, beneficiando a sociedade e o meio ambiente.

**Palavras-chave:** Estabilidade. Fator de Segurança. Fellenius. Bishop Simplificado. Slide. Talude. Movimento de Massa.

## NOMENCLATURA

Ângulo de Atrito –  $\phi$  – (Graus)

Coesão –  $c$  – (kPa)

Fator de Segurança – FS

Peso Específico –  $\gamma$  – (kN/m<sup>3</sup>)

## 1. INTRODUÇÃO

Conforme Alcántara-Ayala (2019), quando processos do ambiente geofísico apresentam potencial para determinar danos ou perdas a uma comunidade, tem-se uma ameaça natural. Quando as consequências deste risco imprimem impactos negativos à sociedade, eles se transformam em desastres naturais (Burton e Kates 1963; Alcántara-Ayala I 2002).

Segundo Simonato (2017) o impacto econômico causado por deslizamentos pode ser tanto diretamente, como os gastos em reformas de patrimônio, quanto indiretamente, com o isolamento de regiões causados por movimentos de massa, sendo esse último muito mais negativo.

Aproximadamente 9 de 100 pessoas no Brasil vivem em áreas sujeitas a desastres ambientais com deslizamentos e destroços sendo as principais causas de fatalidades (cerca de 1700 mortes em todo o país entre os anos de 2000 a 2010) segundo Bastos *et al.* (2015), sendo esse processo hidrogeomórfico a principal causa de mortes em acidentes naturais no país (Kahn 2005; Parizoto *et al.* 2013; Dias *et al.* 2018; Kobiyama *et al.* 2019).

Análises feitas na Europa indicam problemas similares, segundo Andersen *et al.* (2016), de janeiro de 1995 até dezembro de 2014 em 27 países, se teve um total de 1370 fatalidades em decorrência direta ou indireta de movimentações de terra e em aproximadamente 90% dos casos foram reportadas ocorrências de chuvas nos locais.

Alcántara-Ayala (2019) destaca que os fenômenos mais comuns capazes de impactar a sociedade e a infraestrutura são aqueles classificados como processos exógenos. Dentre estes, encontram-se eventos como enchentes e escorregamentos, os quais têm grande recorrência no mundo, principalmente em áreas de grande concentração habitacional e de relevo acidentado (Riffel *et al.* 2016). Esses fenômenos em grande parte são em decorrência de causas naturais, contudo, a ação antrópica pode ser um fator determinante para sua causa ou agravamento desses processos (Crozier e Glade 2005).

Segundo Soeteres e Van Westen (1996), os movimentos de massa resultam do enfraquecimento gradual das propriedades mecânicas dos materiais das encostas, enfraquecimento este que pode ser causado por diversos motivos, sejam eles processos naturais ou atividades antrópicas. As causas dos movimentos de massa são complexas e podem envolver uma variedade

de fatores, que podem ser geológicos, morfológicos e climáticos. Como destacado por Shroder *et al.* (2015), os movimentos de massa são um componente crucial do ciclo geológico da terra, sendo gerados de forma contínua pela gravidade e pelo fluxo de água, o qual é impulsionado pela força da gravidade, seguindo sempre em direção ao nível de base dos taludes. Esses movimentos representam a erosão direta da gravidade e podem variar em magnitude e frequência.

A água desempenha um papel de grande importância como agente causador dos escorregamentos, tanto em solos saturados quanto nos solos não saturados, em ambos os casos a água é a responsável pelo processo de desestabilização do solo (Carvalho *et al.*, 2012). Conforme Corominas *et al.* (2014), a percolação da água, infiltração, mudança na poro-pressão causada por agentes hidrológicos e saturação do solo contribuem de forma significativa para o aumento da instabilidade das regiões sujeitas aos desabamentos sendo ao mesmo tempo um fator desencadeante e um fator condicionante.

Segundo Botero (2018), pontos importantes como a redução da sucção, a saturação do solo ou então as elevações do nível freático dependem da interação do solo com as condições climáticas. Em encostas que ainda não foram ocupadas, ou seja, não possuem lançamento de águas servidas, não possuem a influência de ações antrópicas, a principal fonte de água das encostas vai ser proveniente das chuvas. Conforme Highland e Bobrowsky (2008), quando existe a expansão da população para novas áreas, as ações antrópicas estão diretamente ligadas às ocorrências de deslizamentos, uma vez que se torna necessário a criação de bairros, vilas e ou até mesmo cidades.

É importante reconhecer que os movimentos de massas são eventos que podem ser complexos, envolvendo diferentes tipos de materiais de forma simultânea. Cruden e Varnes (1996) enfatizam que qualquer movimento de massa pode ser descrito por dois nomes: o primeiro nome descrevendo o tipo de movimento e o segundo descrevendo o material envolvido. Além disso, Cruden e Varnes (1996) consideram dois aspectos mensuráveis, como o conteúdo de água e a velocidade, para caracterizar tanto o material quanto o movimento.

Essa classificação oferece uma estrutura robusta para a compreensão e a avaliação dos riscos associados aos movimentos de massa. Ao reconhecer a diversidade desses fenômenos e as condições que os influenciam, a capacidade de prever e mitigar os impactos desses eventos naturais melhora significativamente.

Quanto à classificação dos movimentos de massa, existem cinco principais tipos, cada um com sua particularidade. Dentre eles, podemos destacar as quedas, que são eventos bruscos que envolvem a queda de materiais geológicos. Normalmente esses materiais são originados de costas íngremes ou então de falésias. Segundo Varnes (1978), esses movimentos ocorrem ao longo de fraturas mecânicas presentes em maciços rochosos. Possuem uma velocidade característica de muito rápida a extremamente rápida, as quedas ocorrem principalmente por queda livre, sendo sua dinâmica influenciada pela gravidade, resistência mecânica e pela presença de água intersticial.

O segundo tipo de movimento de massa que pode ser destacado são os deslizamentos, ou também conhecidos como escorregamentos. Estes são eventos nos quais uma massa de solo ou rocha desmoronam ao longo de uma superfície de falha ou zona de cisalhamento intenso. Conforme descrito por Highland e Bobrowsky (2008), esses movimentos são predominantemente caracterizados pela sua ocorrência ao longo de superfícies de falha ou zonas de deformação.

De acordo com o sistema de classificação de Varnes (1978), os deslizamentos podem ser categorizados com base na forma da superfície de falha, que pode ser translacional ou rotacional. Os deslizamentos translacionais podem assumir formas planares ou em cunha, embora as superfícies de ruptura geralmente exibam uma complexidade com segmentos planos e curvos.

Segundo Anderson e Sitar (1995), quando esses deslizamentos são causados por chuvas eles são conhecidos como deslizamentos superficiais planares, eles são caracterizados por uma espessura consideravelmente menor que o comprimento do movimento. Geralmente, esses movimentos apresentam sinais iniciais de deslocamento através do surgimento de fissuras na parte superior da encosta.

Mesmo os deslizamentos sendo considerados frequentemente como movimentos rápidos, isso não torna impossível uma previsão de quando irá acontecer, uma vez que existem indícios de estabilidades, que tornam possíveis a previsão de um deslizamento.

O terceiro tipo de movimento de massa são as expansões laterais, esse tipo de movimento normalmente são eventos que ocorrem em encostas com declividades leves ou em terrenos planos. Como destacado por Botero (2013), as mudanças e movimentos predominantes que acontecem no solo ou nas rochas, tendem a ocorrer de forma horizontal, causados por fraturas de cisalhamento ou tensão. A causa principal da falha resultante normalmente é atribuída a liquefação do solo e aos movimentos sísmicos rápidos do solo, da mesma forma que acontece quando ocorre um terremoto.

Os dois últimos tipos de movimentos de massa são as corridas e os tombamentos. As corridas são movimentos contínuos, que muitas vezes não apresentam uma superfície definida ao longo da qual a movimentação ocorra. Conforme descrito por Botero (2013), esses eventos são caracterizados por uma distribuição de velocidades no deslocamento da massa, que lembra um fluido viscoso. De acordo com a velocidade de movimento da massa, pode-se nomear os tipos de corrida. Quando os movimentos são lentos, são nomeados de rastejos, já quando rápidos, são chamados de corridas.

As corridas de detritos e lama são particularmente perigosas e destrutivas na natureza (Cruden e Varnes, 1996). Esse tipo de movimento envolve materiais com alto teor de umidade que perdem coesão e conseqüentemente ganham velocidade ao descerem. Esse fenômeno é altamente móvel e pode causar danos significativos a infraestruturas e comunidades localizadas em áreas de risco. Já os tombamentos consistem na queda de uma ou mais unidades de materiais sobre um ponto, normalmente esse tipo de movimento acontece pela influência da gravidade, forças exercidas por outras unidades ou então fluidos em fissuras. Os tombamentos podem conter alguns tipos de materiais, como rochas, detritos ou terra.

Levando em consideração o elevado crescimento das cidades e conseqüentemente a ocupação de determinadas áreas de risco por parte da população com poucas condições financeiras, é comum a construção de moradias nestes locais sem a adoção dos critérios técnicos mínimos requeridos para a realização de uma construção em determinada área. É comum, em áreas impróprias, existirem riscos de deslizamentos de terras, que podem causar acidentes e muitas vezes perdas de vidas humanas. Conforme Halmenschlager (2019), fica destacado a importância, tanto economicamente quanto socialmente, da utilização de políticas públicas de prevenção aos desastres para minimizar o prejuízo em relação tanto ao número de óbitos de pessoas quanto ao número de desabrigados ou cidades isoladas, entendendo que o gasto com a prevenção é consideravelmente inferior ao de remediação de certas áreas.

Com base nisto, uma opção para entender o comportamento das encostas corresponde aos estudos sobre a características de estabilidade referentes a elaboração de pesquisas baseadas em modelos matemáticos que realizam ensaios sobre ocorrência de movimentos de massa, como avaliação de susceptibilidade. Como exemplos, tem-se os trabalhos de Azevedo *et al.* (2018), Azarafza *et al.* (2021), Huang *et al.* (2021) e Cruz *et al.* (2023). Tais estudos utilizam variáveis determinadas pelas investigações ambientais e geológicas-geotécnicas.

Essa pesquisa visa aprofundar a compreensão dos mecanismos que governam a estabilidade de taludes em condições adversas. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas análises detalhadas utilizando os métodos de Bishop simplificado e Fellenius, considerando variações de parâmetro do solo, como coesão, peso específico e ângulo de atrito. A análise sistemática desses parâmetros permitirá identificar como mudanças nas características geotécnicas podem influenciar a segurança e estabilidade dos taludes em diferentes condições de terreno. Os resultados dessas análises contribuirão para o desenvolvimento de abordagens mais precisas na avaliação e gerenciamento de riscos associados a estabilidade de taludes, fornecendo entendimentos importantes para a engenharia e práticas de mitigação de desastres naturais.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho recorreu a informações presentes na pesquisa de Botero (2018). Tal pesquisa utilizou como área de estudo uma região situada no município de

Barbosa, localizado a 36 km de distância de Medellín, a capital do estado de Antioquia, na Colômbia. A cidade de Barbosa se encontra a uma altitude de 1.300 m acima do nível do mar. A temperatura média anual é de aproximadamente 22°C, enquanto a precipitação média anual atinge cerca de 2.003 mm, com períodos de maior pluviosidade registrados nos meses de maio e outubro. De acordo com o último censo realizado em 2006 pelo Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), a população residente é composta por aproximadamente 43.547 habitantes. O município abrange uma área territorial de 206 quilômetros quadrados. A Figura 1 mostra a área de estudo.



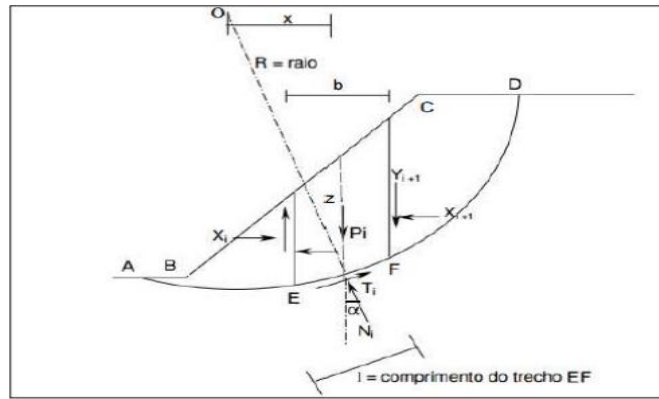
**Figura 1 – Localização Região de estudo (Botero, 2018).**

Segundo Massad (2010), os métodos para análise de talude utilizados atualmente são baseados na hipótese de que existe um estado de equilíbrio em uma massa de solo, considerada como um corpo rígido plástico, que está prestes a entrar em um processo de deslizamento. Isso significa que o solo é tratado como uma estrutura que não vai se deformar internamente até que a tensão atinja um limite crítico, que é o momento em que acontece o deslizamento de forma repentina. Destacando-se dois métodos utilizados para a obtenção do fator de segurança do solo.

Segundo Machado (1997), Fellenius foi responsável por propor uma das primeiras soluções do método das fatias, onde admitiu que os esforços entre as fatias são desprezados. O fator de segurança é determinado diretamente pelo equilíbrio de momentos em torno do centro do círculo deslizante que está sendo estudado. Este método divide a massa do solo do talude em diversas fatias verticais e assume que o deslizamento ocorre ao longo de uma superfície circular.

O método de Bishop Simplificado trabalha de forma semelhante ao método de Fellenius, tendo em vista que também leva em consideração que a superfície de ruptura assume uma forma circular e ambos também dividem o talude em fatias verticais. No método de Bishop simplificado, a principal suposição é que as forças de cisalhamento entre as fatias acontecem de forma horizontal.

A Figura 2 apresenta os parâmetros envolvidos na análise de taludes com superfície curva de ruptura para uma determinada fatia de solo ( $c$ ,  $\phi$ ), de peso ( $P$ ), largura ( $b$ ), altura ( $z$ ) e o comprimento unitário tomada perpendicular ao plano.



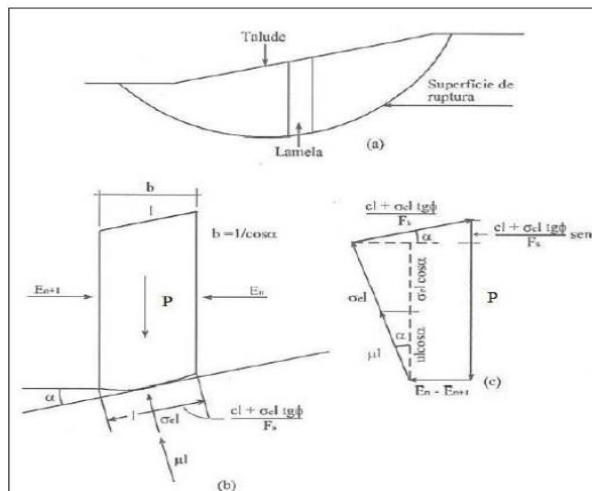
**Figura 2 – Relação de parâmetros envolvidos na análise de taludes com superfície curva de ruptura**

**Fonte: Adaptado de Fabricio (2006).**

Ao analisar estes parâmetros e forças atuantes na superfície de ruptura, chega-se à Equação 1 para definição do fator de segurança pelo método de Fellenius, onde  $F_s$  representa o fator de segurança,  $c$  é a coesão do solo,  $\phi$  corresponde ao ângulo de atrito,  $u$  é a poropressão na base da fatia,  $\alpha_i$  o ângulo da base da fatia,  $P_i$  é o peso da fatia e  $l$  refere-se ao comprimento da base fatia.

$$F_s = \frac{\sum [c.l + \tan \phi . (P_i . \cos \alpha_i - u.l)]}{\sum P_i . \sin \alpha_i} \quad (1)$$

Na Figura 3, tem-se a distribuição das forças envolvidas no equilíbrio da fatia.



**Figura 3 – Forças envolvidas no equilíbrio de uma fatia de solo em uma vertente**

**Fonte: Adaptado Marangon (2004).**

De forma análoga, após análise de forças atuantes verticais na superfície de ruptura, tem-se a Equação 2 para calcular fator de segurança pelo método de Bishop Simplificado, onde  $P_i$  representa o Peso da fatia,  $c$  corresponde a Coesão do solo,  $u$  é a Poropressão,  $l$  é,  $\phi$  refere-se ao Ângulo de atrito, e  $\alpha$  Ângulo da base.

$$F_s = \frac{\sum [c.l + (P_i - u.l . \cos \alpha_i) \tan \phi] . \frac{1}{M(\alpha)}}{\sum P_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

O termo  $M_{(a)}$  é dado pela Equação seguinte:

$$M_{(a)} = \cos\alpha_i + \frac{\tan\phi \cdot \sin\alpha_i}{F_S} \quad (3)$$

A metodologia aplicada envolveu o uso dos dois métodos, Fellenius e Bishop simplificado, presentes no software Slide2, para determinar os fatores de segurança dos taludes. Ambos os métodos e o software são ferramentas fundamentais na avaliação da estabilidade de taludes, permitindo calcular o fator de segurança com base nos parâmetros geotécnicos do solo em uma região específica de modo a variar alguns dos parâmetros envolvidos no problema e fixando os demais, no sentido de analisar o comportamento do fator de segurança gerado em teste. O método de Fellenius é amplamente utilizado para análises de taludes simples, enquanto o método de Bishop simplificado é uma abordagem simplificada do método de Bishop original, sendo adequado para taludes com geometrias mais complexas. Essa abordagem metodológica, complementada pelo uso do software Slide2, permite uma avaliação abrangente da estabilidade dos taludes, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisões em projetos de engenharia geotécnica e na implementação de medidas para garantir a segurança e estabilidade dessas estruturas.

O aspecto central da metodologia da pesquisa consistiu na geração de configurações de taludes correspondendo a diferentes valores dos parâmetros geotécnicos e de inclinação. Isso permitiu verificar o comportamento da estabilidade, com relação ao fator de segurança, dos exemplos estudados dentro da faixa de variabilidade prevista para as variáveis ambientais. Os passos metodológicos podem ser enumerados da seguinte forma:

- Definição dos valores representativos de declividade e parâmetros geotécnicos presentes na área estudada por Botero (2018);
- Estabelecimento dos casos analisados pelo estabelecimento das combinações entre as variáveis geométricas e geotécnicas definidas no passo anterior;
- Representação dos casos de estudo com o auxílio do software Slide2 e aplicação das análises com base nos modelos de Fellenius e Bishop simplificado;
- Compilação dos resultados obtidos e análise dos valores dos fatores de segurança alcançados, relacionando-os com a variação proposta para as variáveis de entrada.

A partir da análise do trabalho de Botero (2018) foi possível coletar dados sobre os aspectos geotécnicos e de geometria do terreno, essenciais para calcular os fatores de segurança. O primeiro dado considerado foi a inclinação do terreno, utilizada para determinar a geometria do talude. Essa inclinação foi definida dentro do intervalo apresentado na região de estudo de Botero (2018), de onde foram selecionados quatro valores (15°, 20°, 35°, 45°), a partir dos quais calculando a média e encontrando o valor aproximado de 29° como o quinto valor. Assim, tendo como declividade os seguintes valores: 15°, 20°, 29°, 35°, 45°.

Quanto às propriedades geotécnicas do solo, foram consideradas as informações da carta geológica do município de Barbosa para a determinação. Dentre as categorias geológicas existentes na área de estudo, escolheu-se o solo associado à classe do Batolito Antioqueno (KcdA), que é formado por rochas do Batolito. Estas rochas são do tipo granítico, classificadas entre granodiorita e quartzodiorita. Os minerais constituintes incluem plagioclase, anfíbol, biótica e quartzo. Este solo está associado a dois tipos de horizontes: um amarelo e um vermelho, ambos de textura argilo-siltosa. Também há a presença de depósitos de deslizamentos (Qdr) no município de Barbosa, os quais são depósitos de deslizamentos relacionados a movimentos em massa, comuns no perfil de meteorização do Batolito Antioqueno. Esta classe não foi utilizada para a definição dos parâmetros, pois pressupõe-se que o material rompido apresenta parâmetros de resistência ao cisalhamento residuais.

Os parâmetros geotécnicos são fundamentais para a efetivação da avaliação da estabilidade de taludes, pois representam as propriedades do solo que influenciam diretamente no seu comportamento de resistência ao cisalhamento. É importante ressaltar que esses parâmetros não são uniformes no espaço e podem variar significativamente de acordo com fatores como a origem da formação do solo, além dos níveis de tensões aos quais está sujeito. Usando-se, então, os parâmetros estabelecidos na pesquisa de Botero (2018), tem-se os seguintes intervalos de valores:

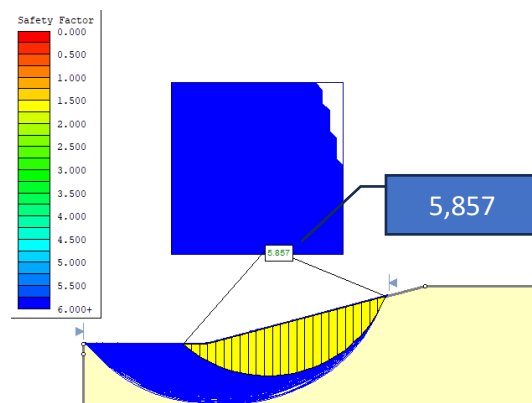
- Coesão (c): varia entre 9 kPa e 17 kPa na formação KcdA;
- Ângulo de atrito ( $\phi$ ): para solo da classe KcdA, varia entre 16° e 24°;
- Peso específico do saturado ( $\gamma_{sat}$ ): varia entre 18 kN/m<sup>3</sup> e 18,8 kN/m<sup>3</sup>.

O procedimento metodológico correspondeu ao desenvolvimento das análises de estabilidade para diferentes combinações dos parâmetros geotécnicos e de geometria do talude. Em termos das combinações dos parâmetros, considerou-se, inicialmente, os valores médios dos intervalos acima apresentados para cada valor de inclinação. De forma adicional, realizou-se uma análise de sensibilidade, tomando-se as combinações dos valores limites referentes aos intervalos de cada variável, tanto em relação à configuração de menor estabilidade (menor coesão, menor ângulo de atrito e maior peso específico), quanto aquela relacionada a maior estabilidade (maior coesão, maior ângulo de atrito e menor peso específico). Foram analisados também os casos em que se mantém duas variáveis fixas, enquanto se altera um dos parâmetros. As configurações analisadas, em termos de parâmetros, encontram-se na Tabela 1. Para cada uma das declividades, foram realizadas as análises com todas as combinações dos parâmetros geotécnicos.

**Tabela 1 – Combinação dos parâmetros para as declividades de 15°, 20°, 29°, 35° e 45°.**

Configuração da combinação	c(kPa)	$\phi$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Média	13	20	18,4
Mínima Coesão	9	20	18,4
Máxima Coesão	17	20	18,4
Mínimo Ângulo de Atrito	13	16	18,4
Máximo Ângulo de Atrito	13	24	18,4
Mínimo Peso Específico	13	20	18,0
Máximo Peso Específico	13	20	18,8
Mínima Estabilidade	9	16	18,8
Máxima Estabilidade	17	24	18,0

Com base nos valores dos fatores de segurança alcançados, foi possível verificar o comportamento de estabilidade em função da variação de um dos parâmetros envolvidos e das situações particulares propostas. Para realizar as análises geotécnicas, utilizou-se o software Slide2 (versão 6.02). Este programa computacional é reconhecido como uma ferramenta voltada para cálculos de estabilidade de taludes bidimensionais amplamente utilizado na engenharia geotécnica, projetado para avaliar o fator de segurança ou probabilidade de falha de superfícies de falha circulares e não circulares em solo ou rochas. O programa oferece uma interface intuitiva que facilita a criação e análise de modelos complexos de taludes. Na Figura 4 mostra-se a representação do talude simulado no programa Slide para a inclinação de 15°.



**Figura 4 – Simulação do talude com declividade de 15°.**



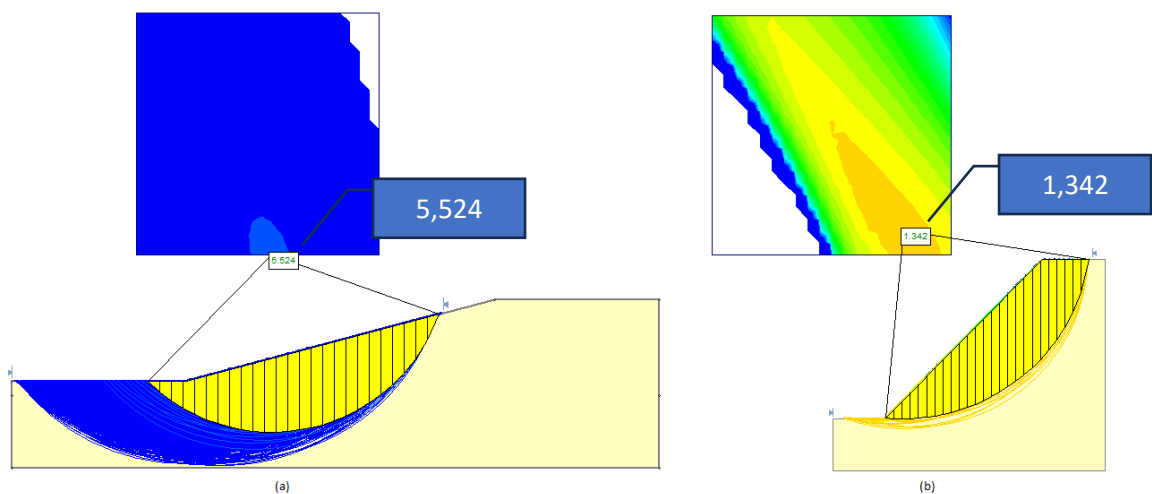
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão mostrados os resultados de fator de segurança obtidos em relação a cada combinação aplicada aos parâmetros geotécnicos, tendo como base os modelos de estabilidade de taludes de Fellenius e Bishop simplificado empregados na pesquisa. Inicialmente, apresenta-se os fatores de segurança alcançados, para cada declividade, pelo emprego dos valores médios contidos nos intervalos dos parâmetros geotécnicos (Tabela 2).

**Tabela 2 – Valores de fatores de segurança para os valores médios de coesão (13 kPa), ângulo de atrito (20°) e peso específico (18,4 kN/m<sup>3</sup>).**

Inclinação	FS - Fellenius	FS - Bishop Simplificado
15°	5,52	5,85
20°	3,61	3,83
29°	2,59	2,71
35°	1,85	1,94
45°	1,34	1,38

A partir dos resultados encontrados, pôde-se quantificar a influência da declividade na estabilidade das encostas. Houve uma redução do fator de segurança de 75,72% e 76,41% para Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente, à medida que a declividade aumentava de 15° à 45°. Quando se compara os resultados conseguidos pelos métodos distintos é possível afirmar que a diferença existente para a declividade de 15° para ambos os métodos é 5,64%, já ao observar os FS para inclinação 45° tem como resultado 2,90% de diferença. Na Figura 5 encontram-se as superfícies de rupturas para inclinações de 15° e 45°, respectivamente.

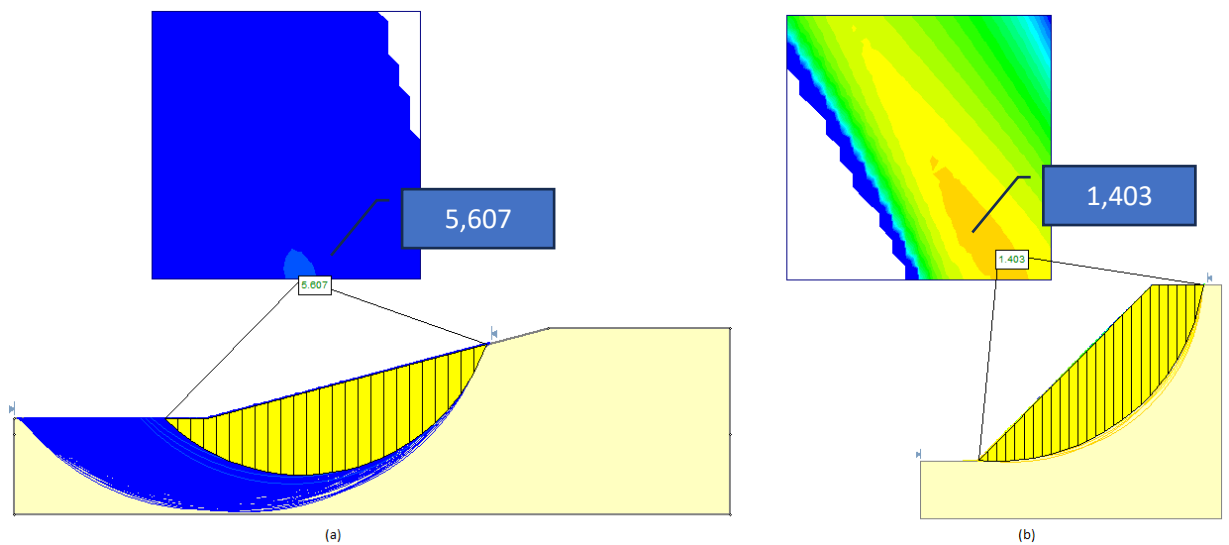


**Figura 5 – FS para Fellenius com valores médios: (a) declividade de 15°, (b) declividade de 45°.**

Com relação ao peso específico, a Tabela 3 mostra os resultados determinados pelas análises por declividade. Na Figuras 6 encontram-se as simulações de superfícies de ruptura obtidas para as inclinações de 15° e 45°, respectivamente.

**Tabela 3 – Fatores de segurança em função da variação do peso específico mantendo os parâmetros fixados no ângulo de atrito e coesão nos valores médios.**

Inclinação	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	FS Fellenius	FS Bishop Simplificado
15°	18	5,60	5,94
15°	18,8	5,44	5,77
20°	18	3,66	3,88
20°	18,8	3,56	3,78
29°	18	2,62	2,75
29°	18,8	2,55	2,67
35°	18	1,87	1,96
35°	18,8	1,83	1,91
45°	18	1,36	1,40
45°	18,8	1,32	1,37



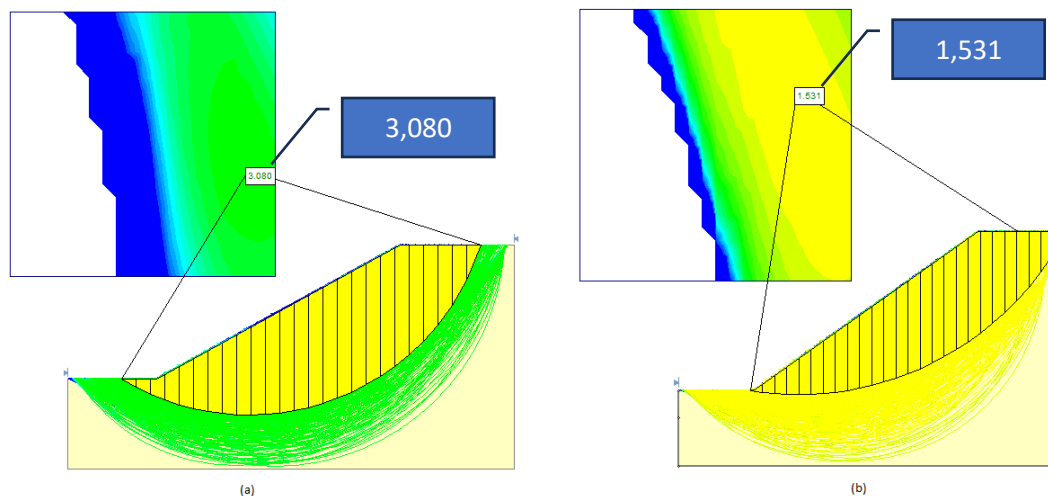
**Figura 6 – FS para Bishop Simplificado e peso específico mínimo: (a) inclinação de 15°, (b) inclinação de 45°.**

Verifica-se que há uma redução nos fatores de segurança de 75,71% e 76,43% para Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente, quando se analisa a variação do peso específico mínimo em função da declividade de 15° e 45°. De forma análoga, encontra-se valores próximos de redução quando analisados os resultados máximos do peso específico tendo 75,74% e 76,26% para os métodos, respectivamente. Ao se comparar os valores de FS para os métodos distintos na inclinação de 15° e pesos específicos mínimos, chega-se ao valor de 5,72% de variação, e para inclinação de 45° tem-se uma variação de 2,86%. Quando avalia-se a variação de fator de segurança para a mesma geometria de talude, inclinação de 15°, entre o valor mínimo de peso específico e máximo de peso específico, os resultados de 2,86% para ambos os métodos. Já para geometria de 45°, chega-se aos valores de 2,94% para método de Fellenius e 2,14% para Bishop Simplificado.

Com relação a coesão, a Tabela 4 mostra os resultados determinados pelas análises por declividade

**Tabela 4 – Fatores de segurança em função da variação coesão mantendo os parâmetros fixados no ângulo de atrito e peso específico nos valores médios.**

Inclinação	Coesão(kPa)	FS Fellenius	FS Bishop Simplificado
15°	9	4,37	4,66
15°	17	6,67	7,02
20°	9	2,92	3,11
20°	17	4,28	4,52
29°	9	2,08	2,19
29°	17	3,08	3,21
35°	9	1,53	1,60
35°	17	2,16	2,26
45°	9	1,09	1,13
45°	17	1,58	1,61



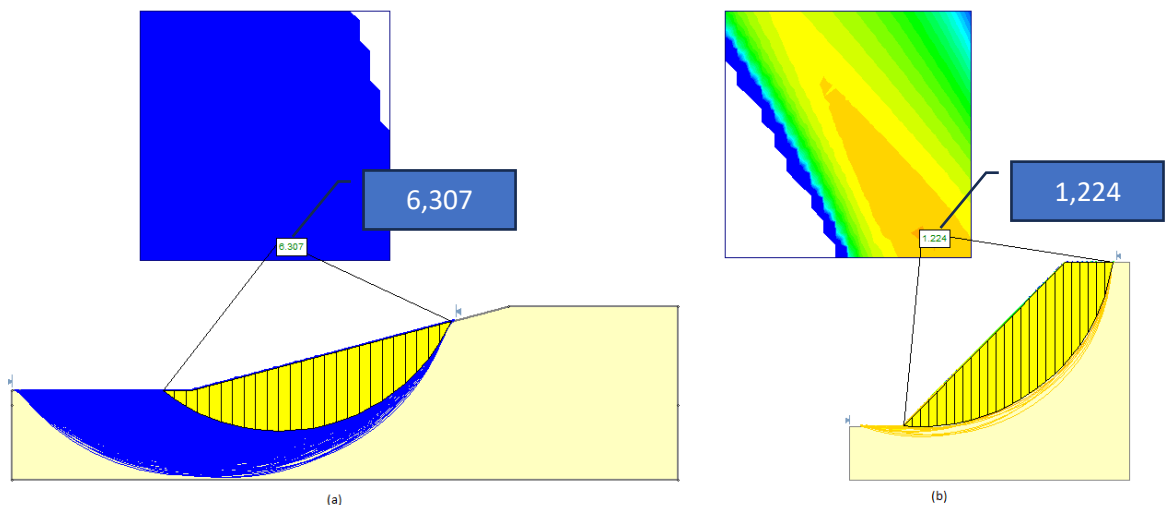
**Figura 7 – FS para Fellenius: (a) coesão máxima e declividade de 29°, (b) coesão mínima e declividade de 35°.**

Verifica-se que há uma redução nos fatores de segurança de 75,06% e 75,75% para Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente, quando se analisa a variação da coesão mínima em função da declividade de 15° e 45°. De forma análoga, encontra-se valores próximos de redução quando analisados os resultados máximos da coesão tendo 76,31% e 77,07% para os métodos respectivamente. Ao se comparar os FS para os métodos distintos na inclinação de 15° e coesão máxima, chega-se ao valor de 4,99% de variação, e para inclinação de 45° tem-se uma variação de 1,86%. Quando avalia-se a variação de fator de segurança para a mesma geometria de talude, inclinação de 15°, entre o valor mínimo de coesão e máximo de coesão, tem-se os resultados de 34,48% para Fellenius e 33,62% para Bishop Simplificado. Já para geometria de 45°, chega-se aos valores de 31,01% para método de Fellenius e 29,81% para Bishop Simplificado.

Com relação ao ângulo de atrito, a Tabela 5 mostra os resultados determinados pelas análises por declividade.

**Tabela 5 – Fatores de segurança em função da variação ângulo de atrito mantendo os parâmetros fixados na coesão e peso específico nos valores médios.**

Inclinação	Ângulo de atrito(°)	FS Fellenius	FS Bishop Simplificado
15°	16°	5,14	5,42
15°	24°	5,92	6,30
20°	16°	3,30	3,49
20°	24°	3,92	4,17
29°	16°	2,37	2,48
29°	24°	2,80	2,94
35°	16°	1,67	1,75
35°	24°	2,03	2,12
45°	16°	1,22	1,25
45°	24°	1,46	1,51



**Figura 8 – FS para Bishop Simplificado: (a) ângulo de atrito mínimo e declividade de 15°, (b) ângulo de atrito máximo e declividade de 45°.**

Verifica-se que há uma redução nos fatores de segurança de 76,26% e 76,94% para Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente, quando se analisa a variação ângulo de atrito mínimo em função da declividade de 15° e 45°. De forma análoga, encontra-se valores próximos de redução quando analisados os valores máximos para o ângulo de atrito tendo 75,34% e 76,03% entre os métodos, respectivamente. Ao comparar os valores de FS na inclinação de 15° e ângulo de atrito mínimo entre os dois métodos, chega-se a uma variação de 5,17% de redução do maior valor encontrado (FS = 5,42 - Bishop Simplificado) para o menor (FS = 5,14 – Fellenius). Para a inclinação de 45° tem-se uma variação de 2,40% crescente em favor do Método de Bishop Simplificado. Quando se avalia a variação de fator de segurança para a mesma geometria de talude, inclinação de 15°, entre o valor mínimo de ângulo de atrito e máximo de ângulo de atrito, tem-se os resultados crescentes de 13,18% para Fellenius e 13,97% para Bishop Simplificado. Já para geometria de 45°, chega-se aos valores de 16,44% para método de Fellenius e 17,22% para Bishop Simplificado, também crescentes do ângulo de atrito mínimo para o valor máximo.

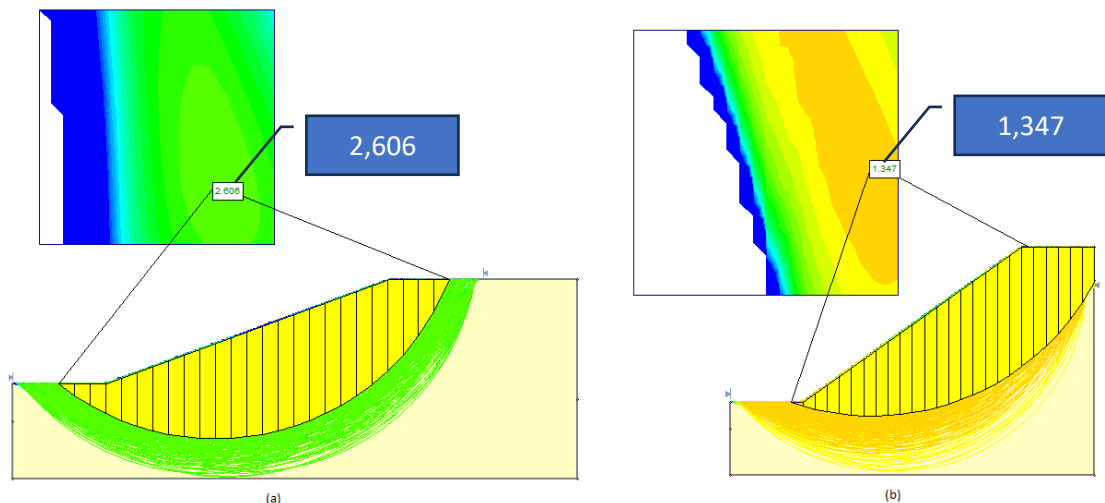
Assim, quando se avalia qual destes parâmetros teve maior impacto nos resultados de fator de segurança as maiores variações, chega-se a coesão. Devido a sua influência nas forças que mantêm as partículas coesas. As análises feitas para as simulações intermediárias tiveram como resultados aceitáveis até que à medida que a declividade se acentuava, levando a uma diminuição no fator de segurança. Dentre os valores alcançados, foi possível também analisar qual dos três parâmetros estudados alcançou o maior FS simulado, tendo como titular a Coesão (FS igual a 7,02) e o parâmetro com o pior desempenho alcançado, a Coesão (FS igual a 1,09).

A Tabela 6 mostra aos resultados da simulação com as configurações de taludes de menores estabilidades (menor coesão, menor ângulo de atrito e maior peso específico).

**Tabela 6 – Valores de fatores de segurança para configuração de menor estabilidade com coesão igual a 9 kPa, ângulo de atrito igual a 16° e peso específico igual a 18,8 kN/m<sup>3</sup>.**

Inclinação	FS Fellenius	FS Bishop Simplificado
15°	4,05	4,30
20°	2,60	2,76
29°	1,86	1,95
35°	1,34	1,40
45°	0,97	1,00

Assim, encontra-se, nas Figuras 9, as superfícies de ruptura simuladas para configuração de menor estabilidade.



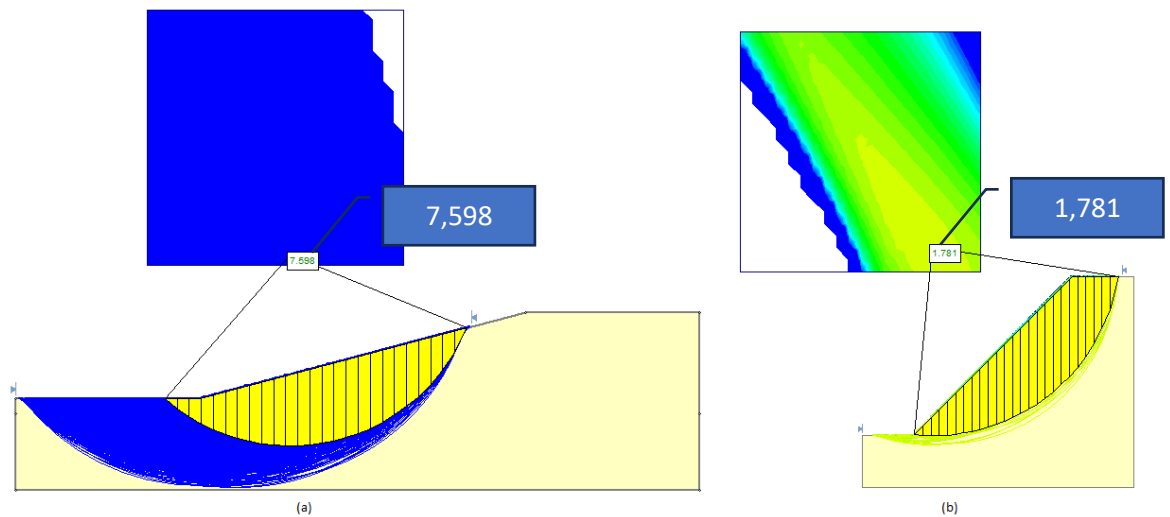
**Figura 9 – Método de Fellenius para menor estabilidade: (a) declividade de 20°, (b) declividade de 35°.**

Observando-se os valores alcançados de FS para menor estabilidade apresentado na Tabela 6 e comparando-os com os valores encontrados na Tabela 2 referentes aos fatores de segurança para os valores médios (para declividade de 15°, FS = 5,52 para Fellenius e FS = 5,85 para Bishop Simplificado), é notório uma variação negativa de 26,63% e 26,50% para os métodos de Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente. Usando o mesmo raciocínio para comparação entre os dados para declividade de 45° (valores médios, FS = 1,34 para Fellenius e FS = 1,38 para Bishop Simplificado), encontra-se os resultados de variação negativa, 27,61% e 27,57% respectivamente. Essa análise demonstra que, apesar da redução dos valores em taludes com inclinação de 15°, a superfície de ruptura ainda manteve em uma margem de estabilidade segura. Quando se avalia o aumento da inclinação, nota-se a queda desses índices, chegando a serem menores que os valores críticos de ruptura. Isso indica que os taludes analisados possuem uma margem de segurança considerável com inclinações menos íngremes, mesmo no cenário de menor estabilidade. Em contrapartida, com o aumento da inclinação estes fatores de segurança chegam a ser inferiores a unidade, resultados que demonstram ruptura na superfície analisada.

A tabela 7 a seguir mostra resultados de uma simulação das configurações de taludes de maiores estabilidades (maior coesão, maior ângulo de atrito e menor peso específico) com valores de coesão (17,00 kPa), ângulo de atrito (24°) e peso específico (18,00 kN/m<sup>3</sup>).

**Tabela 7 – Valores de fatores de segurança para configuração de maior estabilidade coesão igual a 17 kPa, ângulo de atrito igual a 24° e peso específico igual a 18 kN/m<sup>3</sup>.**

Inclinação	FS Fellenius	FS Bishop Simplificado
15°	7,18	7,59
20°	4,67	4,94
29°	3,35	3,51
35°	2,38	2,49
45°	1,73	1,78



**Figura 10 – FS para Bishop Simplificado para maior estabilidade: (a) declividade de 15°, (b) declividade de 45°.**

Ao comparar os valores de FS para maior estabilidade apresentados na Tabela 7 (para declividade de 15°, FS = 7,18 para Fellenius e FS = 7,59 para Bishop Simplificado), com os valores da Tabela 2 para FS médios, observa-se um aumento significativo de 23,12% e 22,92% nos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente. Essa tendência também se reflete na inclinação de 45° (FS = 1,73 para Fellenius e FS = 1,78 para Bishop Simplificado), onde os aumentos são de 22,54% e 22,47%, respectivamente.

Assim, ao confrontar os resultados atingidos para diferentes inclinações, observa-se que, para a inclinação de 15°, as variações nos fatores de segurança foram de 43,59% e 43,35% para os métodos de Fellenius e Bishop Simplificado, respectivamente. Já para a geometria de 20°, os valores foram de 42,33% e 43,13%; para 29°, que apresentou as maiores variações, foram de 44,48% e 44,44%. A inclinação de 35° forneceu resultados que chegaram a 43,70% para Fellenius e 43,78% para Bishop Simplificado. Por fim, para uma inclinação de 45°, as variações foram de 43,93% e 43,82%, respectivamente.

#### 4. CONCLUSÕES

De maneira geral, o fator de segurança determinístico é dado pela divisão do momento oriundo da resistência ao cisalhamento do solo e o momento solicitante que tende a provocar deslizamentos. Desta forma, valores de FS iguais a um, mostram que aquela configuração está no seu limite de

equilíbrio, enquanto valores superiores a unidade é mais estável e segura. Segundo a NBR 11.682 (ABNT, 2009) que trata sobre estabilidade de encostas, esta define que, para casos de instabilidades de encostas que gerem grandes danos ambientais e materiais ao local, como também se este deslizamento afetará áreas movimentadas e povoadas, este movimento receberá a classificação do nível de segurança “Alto”, e sendo assim tendo que chegar a fatores de segurança que sejam superiores a 1,5. Nota-se que houve grandes variações nas maiorias dos casos apresentados, entretanto, os fatores de segurança obtidos não foram críticos, com exceção ao cenário de menor estabilidade, com o maior peso específico (18,8 kN/m<sup>3</sup>), o menor ângulo de atrito (16°) e o menor índice de coesão (9 kPa).

Ao se fazer uma comparação geral de dados, foi possível mapear qual parâmetro teve maior variação de resultados em relação aos valores de fatores de segurança médios. Esta comparação foi feita entre as declividades de 15° e 45° de cada resultado obtido. Assim tem-se a variação percentual do peso específico foi de + 1,43% e - 1,45% para valor mínimo e máximo, respectivamente. Os valores de + 1,47% e -1,49%, para valor mínimo e máximo na declividade de 45°. Em seguida, para o ângulo de atrito, encontra-se os valores de - 6,88% e +6,76% para valores mínimo e máximos, respectivamente, na declividade de 15°. Para 45°, obtém-se -8,96% para seu valor mínimo e +8,22% para o máximo. No quesito coesão, na declividade de 15° chegam a valores de variação correspondentes a -20,83% e +17,24% com seus valores mínimo e máximos, respectivamente. Para a declividade de 45°, foram alcançadas as variações de -18,66% e +15,19% em relação aos valores mínimos e máximos, respectivamente. Diante disso, o parâmetro que mais teve alteração percentual com relação ao valor médio, foi a coesão, tal variação justificada devido à natureza do parâmetro em ser mais suscetível a variabilidade. Sendo assim, ao analisar a estabilidade de taludes e projetar medidas contra riscos, é importante considerar a interação desses parâmetros e como esses elementos afetam as forças de resistência ao cisalhamento das encostas.

## REFERÊNCIAS

- Alcántara-Ayala I (2002) Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2–4), 107–124. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)
- Alcántara-Ayala (2019) Time in a bottle: challenges to disaster studies in Latin America and the Caribbean. *Disasters*, 43(1). <https://doi.org/10.1111/disa.12325>
- Andersen, P., da Silva, A. P. F., Haque, U., Blum, P., Chalov, S. R., Pilz, J., Andres, N., Auflič, M. J., Malet, J., Wenyi, Z., Lamas, P., Poyiadji, E., Kurt, T., Pétursson, H. G., Peshevski, I., López-Davalillo, J. C. G., Dobrev, N., Gaprindashvili, G., Ferri, S., Halkia, M., Keellings, D., & Engström, J. (2016). Fatal landslides in Europe. *Landslide*, 13, 1545–1554. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0689-3>
- Anderson, S. A., & Sitar, N. (1995). Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), 544–552. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:7(544))
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *NBR 11682: Estabilidade de encostas*. ABNT.
- Azarafza, M., Azarafza, M., Akgün, H., Atkinson, P. M., & Derakhshani, R. (2021) Deep learning-based landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 11, 24112. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03585-1>.
- Azevedo, G. F., Carvajal, H. E. M., & Souza, N. M. (2018). Análise de ameaça de deslizamentos pelo uso de abordagem probabilística aplicada a um modelo de estabilidade de taludes tridimensional. *Geociências*, 37(3). <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i3.11798>
- Bastos, M., Bandeira, R., & Campos, V. (2015) Operações de resposta a desastres: proposta de um modelo de gestão e de um protótipo de banco de dados. *Produção Online* 15(2), 482. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i2.1813>
- Botero, E. M. (2013). *Modelo de alerta de escorregamentos deflagrados por chuvas usando redes neurais artificiais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

- Botero, E. M. (2018). *Metodologia para aplicação de redes neurais artificiais para sistemas de alerta de escorregamentos deflagrados por chuvas em regiões montanhosas*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- Burton, I., Kates, R. W. (1963) The perception of natural hazards in resource management. *Natural Resources Journal* 3(3), 412.
- Carvalho, J. C. de., Gitirana Jr., G., e Carvalho, E. T. L. (2012). *Tópicos sobre infiltração: Teoria e prática aplicada a solos tropicais*. UnB.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitolakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209–263. <https://doi.org/DOI 10.1007/s10064-013-0538-8>
- Crozier, M. J., & Glade, T. (2005). *Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470012659.ch1>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslides: Investigation and mitigation*. National Academic Press.
- Cruz, A. M. A., Ferreira, D. V., Azevedo, G. F., Bazán, F. A. V., Bezerra, A. H. L., & Queiroz, P. C. O. (2023). Uso de métodos probabilísticos na análise de estabilidade de taludes. *EIA*, 20. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1623>
- Dias, M. C. A., Saito, S. M., Álvala, R.C., Stenner, C., Pinho, G., Nobre, C. A., Fonseca, M. R. S., Santos, C., Amadeu, P., Silva, D., Lima, C. O., Ribeiro, J., Nascimento, F., & Corrêa, C. O. (2018) Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 449–459. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.002>
- Fabício, J. V. F. (2006). *Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Halmenschlager, V. (2019). *Ensaio sobre impactos socioeconômicos de desastres naturais no Brasil*, Dissertação de Doutorado, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil. <https://doi.org/10.11606/T.11.2019.tde-18072019-094555>.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook: A guide to understanding landslides. *U.S. Geological Survey Circular*.
- Huang, F., Haowen, X., Yao, C., & Catani, F. (2021). Uncertainties of landslide susceptibility prediction considering different landslide types. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(3). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.03.001>
- Kahn, M. E. (2005) The death toll from natural disasters: the role of income, geography, and institutions. *Review of Economics and Statistics*, 87(2), 271–284.
- Kobiyama, M., Michel, G., Engster, E., & Paixão, M. (2015). Historical analyses of debris flow disaster occurrences and of their scientific investigation in Brazil. *Labor e Engenho*, 9(4), 76–89. <https://doi.org/10.20396/lobore.v9i4.8639477>
- Machado, S. L., & Machado, M. de F. (1997). *Mecânica dos solos 2: Conceitos introdutórios*. Universidade Federal da Bahia.
- Marangon, M. (2004). *Tópicos em geotecnia e obras de terra*. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Massad, F. (2010). *Obras de terra: Curso básico de geotecnia*. Oficina de Textos, 2.
- Parizoto, D. G. V., Sanchez, G. M., Machado, M. A., Martins, M. M., Oliveira, O. M. de, Higashi, R. A. dos Reis, Sbroglia, R. M., Dutra, R. de C. Goerl, R. F. & Bim, R. (2013). *Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991–2012*. Volume Amazonas.
- Riffel, E.S.; Guasselli, L. A., Bressani, L.A. (2016). Desastres associados a movimento de massa: Uma revisão de Literatura. *Boletim Goiano de Geografia*, 36(2), 285-305, <https://doi.org/10.5216/bgg.v36i2.42796>
- Shroder, J. F., Ellis, J. T., e Sherman, D. J. (2015). *Coastal and marine hazards, risks, and disasters*. (Hazards and Disasters Series). Elsevier.



- Simonato, T.C. (2017). *Projeção dos impactos econômicos regionais do desastre de Mariana-MG*. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brasil.
- Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). *Landslides Investigation and Mitigation*. National Academy Press.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (18), 61-77.