

NOVAS SIMULAÇÕES DE ESTABILIDADE DE TALUDE A PARTIR DE ESTUDO GEOTÉCNICO PREEEXISTENTE EM GASPAR - SC

NEW SLOPE STABILITY SIMULATIONS BASED ON PRE-EXISTING GEOTECHNICAL STUDY IN GASPAR - SC

Celso da Silva Mafra Junior ¹

Vitor Hugo Schlindwein ²

Alexandre Maines³

RESUMO: Deslizamentos de terra são um dos principais tipos de desastres naturais e causam danos ambientais e sociais à população próxima dessas áreas. Geralmente ocasionados pela inadequada ocupação dessas encostas, e em muitos casos, a execução desses taludes não considera estudos e ensaios técnicos para a verificação dessa estabilidade. O município de Gaspar-SC apresenta um longo histórico de deslizamentos de terra, principalmente em épocas do ano em que há grande acúmulo de chuvas contínuas. O objetivo foi realizar novas simulações de estabilidade de talude com base em um estudo geotécnico preeexistente, situado no imóvel onde se planeja executar um loteamento residencial. Foi inserido o nível d'água nas simulações já realizadas no estudo preeexistente, para análise e comparação dos valores obtidos, e estudada uma nova simulação com a geometria recomendada na bibliografia. Como resultado, as simulações evidenciam boa sensibilidade em relação à presença do nível d'água, reduzindo o valor do fator de segurança. Além disso, foi possível verificar a instabilidade que o talude pode apresentar, apenas seguindo os parâmetros recomendados pela bibliografia.

Palavras-chave: deslizamentos de terra; simulações; estabilidade de talude.

ABSTRACT: *Landslides are one of the primary types of natural disasters, causing significant environmental and social damage to populations living in these areas. Improper use or development of slopes typically causes them. In many cases, the construction of these slopes does not take into account studies and technical tests to verify their stability. The municipality of Gaspar, SC, has a long history of landslides, particularly during periods of heavy and continuous rainfall. The aim was to conduct new simulations of slope stability based on an existing geotechnical study for the property designated for a residential subdivision. We inserted the water level into the simulations already performed in the pre-existing research for analysis and comparison of the values obtained and studied a new simulation with the geometry recommended in the bibliography. The simulations demonstrated a notable sensitivity to the presence of the water level, resulting in a decrease in the safety factor. Furthermore, it was possible to confirm the potential instability of the slope by adhering to the parameters outlined in the bibliography. In addition, it was possible to verify the instability that the slope may present simply by following the parameters recommended in the bibliography.*

¹ Mestre em Geotecnia. UNIFEBE. E-mail: celso.mafra@unifebe.edu.br

² Engenheiro Civil. UNIFEBE. E-mail: vitor.schlindwein@unifebe.edu.br

³ Doutor. UNIFEBE. E-mail: alexandre.maines@unifebe.edu.br

Keywords: *landslides; simulations; slope stability.*

1 INTRODUÇÃO

O município de Gaspar localiza-se no estado de Santa Catarina, sendo uma das cidades que compõem a mesorregião do Vale do Itajaí, na qual possui grande existência de taludes naturais. Apresenta um longo histórico de deslizamentos de terra, principalmente em épocas do ano em que há grande acúmulo de chuvas contínuas.

Esses deslizamentos de terra são geralmente ocasionados pela inadequada ocupação dessas encostas e, em muitos casos, a execução desses taludes não considera estudos e ensaios técnicos para a verificação dessa estabilidade, colocando as pessoas que residem próximas em risco.

Nesse contexto, durante este trabalho, verifica-se, por meio de simulações no software MacStars 2000, o estudo dos fatores de segurança resultantes, referente à resistência do solo definido no estudo preexistente, considerando taludes com diferentes características estabelecidas.

Para tanto, o objetivo geral é realizar simulações de estabilidade de talude com base em um estudo geotécnico preexistente, situado no imóvel onde se planeja executar um loteamento residencial. Dessa forma, é preciso que elas estejam localizadas em uma área segura, sem riscos de deslizamento.

Quanto aos objetivos específicos, foram delimitados como: (i) estudar os dados apresentados no estudo geotécnico preexistente; (ii) propor novos estudos de estabilidade do talude; (iii) simular em software as novas propostas; e, (iv) analisar criticamente os resultados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Gerscovich (2016), talude é o nome que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Quando construído pelo homem, são chamados de aterros e cortes, ou sendo natural é denominada como encosta. A altura e inclinação adequadas devem ser respeitadas durante a execução dos cortes ou aterros, seguindo conforme proposto em projeto para garantir a estabilidade da obra. Já na elaboração do projeto, depende-se das propriedades geomecânicas dos materiais e das condições de fluxo.

Com o mesmo raciocínio, Fiori (2015) afirma que qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos é considerada talude. Pode ser natural, na qual se definem as encostas ou vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, sendo os cortes e aterros. Na Figura 1 é possível verificar a terminologia normalmente utilizada para taludes.

Figura 1 - Terminologia normalmente utilizada para taludes



Fonte: Fiori (2015).

Na teoria, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. Deve-se levar em conta o equilíbrio entre essas forças para o estudo da estabilidade de taludes, uma vez que as duas primeiras se somam e tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto a última atua como um freio a essa movimentação. Além disso, para se projetar corretamente as medidas preventivas a escorregamentos, é muito importante compreender o mecanismo de atuação de cada força (Fiori, 2015).

Conforme a NBR 11.682 (ABNT, 1991), o talude para ser estável não pode apresentar trincas, sulcos, erosão, cicatrizes, abatimentos, surgências anormais de água, rastejo, ranhuras em obras locais, por serem considerados sintomas de instabilidade. A resistência ao cisalhamento, sendo a função do atrito e coesão do material, é de fundamental importância para manter a estabilidade de um talude em solo. Estando sua estrutura intimamente ligada ao histórico de tensões sofridas: erosão, tectonismo, intemperismo etc.

Deslizamento de encosta é o movimento de massa em declive de vários tipos de solo, rocha ou detritos sobre terrenos inclinados devido à gravidade. Muitas vezes podem ser observados onde as atividades humanas alteraram as características naturais do terreno, modificando as condições de equilíbrio existentes em um determinado momento e local, ou gerando novas formas em encostas cuja geometria é menos estável do que as condições originais. Portanto, deslizamentos de terra podem afetar não apenas encostas naturais, mas também encostas artificiais (Vedovello; Macedo, 2007).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2010), a inclinação do talude é determinada na elaboração do projeto, antes de o início do serviço. Nos cortes, o talude é resultante da escavação realizadas em terreno natural. Já nos aterros, a colocação dos materiais, provenientes dos cortes e/ou empréstimos, em camadas sucessivas compactadas, obtêm-se os taludes. A natureza do solo, e a altura destes, determina a inclinação tanto nos cortes como nos aterros. Tendo-se sempre presente que cada tipo de solo merece um estudo específico. DNIT (2010) ainda recomenda para os cortes, um talude máximo de 1:1 (V:H) e, para os aterros compactados, a inclinação máxima de 2:3 (V:H).

A NBR 11.682 (ABNT, 2009) apresenta uma tabela onde demonstra fatores de segurança mínimos para deslizamentos, para cada finalidade proposta que envolva o talude, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimo para deslizamento

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas: Alto	Nível de segurança contra danos a vidas humanas: Médio	Nível de segurança contra danos a vidas humanas: Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: Adaptado de NBR 11.682 (ABNT, 2009).

2.2 RESISTÊNCIA DE CISALHAMENTO DO SOLO

Os solos podem resistir a esforços cisalhantes devido à resistência no contato entre grãos, e pela interferência que o arranjo estrutural impõe quando se promove um deslocamento relativo entre partículas. Assim, a resistência ao cisalhamento dos solos é função de duas componentes: resistência entre partículas e imbricamento. A resistência entre partículas depende do atrito entre grãos e da existência ou não de ligações físico-químicas entre partículas, a coesão. Por sua vez, a resistência adicional causada pelas diferenças nos arranjos entre partículas, refere-se ao imbricamento (Gerscovich, 2016).

Segundo Vargas (1977), todo problema de ruptura em mecânica dos solos pode acontecer devido à tensão cisalhante atingir o valor limite da resistência ao cisalhamento.

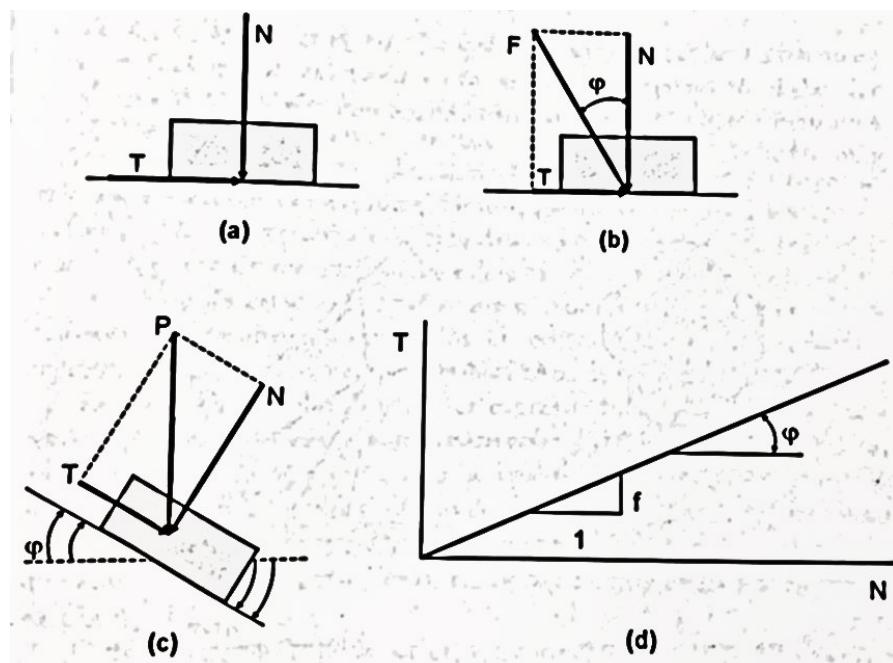
O cisalhamento é quase sempre um fenômeno que ocorre da ruptura dos solos. A máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo é denominada de resistência ao cisalhamento (Pinto, 2006).

O atrito e a coesão são as principais propriedades dos materiais ligadas à discussão de problemas de estabilidade e resistência dos solos, que também estão ligadas à resistência ao cisalhamento (Guidicini; Nieble, 1983).

2.2.1 Atrito

De acordo com Pinto (2006), atrito é a resistência entre partículas que estão em contato. A resistência devido ao atrito pode ser estudada como um problema de deslizamento de um corpo sobre uma superfície plana horizontal, de acordo com a Figura 2 (a).

Figura 2 - Esquemas do atrito entre dois corpos



Fonte: Pinto (2006).

Segundo Pinto (2006) a força horizontal necessária para fazer o corpo deslizar deve ser maior que $f * N$. Existe proporcionalidade entre a força tangencial e a força normal. Essa relação também se escreve da seguinte forma: $T = N * \tan \varphi$, onde:

N – Força vertical transmitida pelo corpo;

T – Força horizontal;

f – Coeficiente de atrito entre os dois materiais;

φ – Ângulo de atrito, o ângulo formado pela resultante das duas forças com a força normal.

Atingindo o ângulo de atrito, a componente tangencial é maior do que a resistência ao deslizamento, que depende da componente normal, e o ângulo de atrito é o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento (Pinto, 2006). Conforme se mostra na Figura 2 (b).

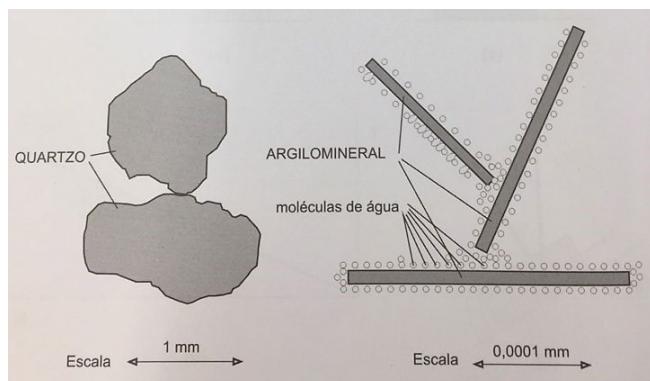
A inclinação do plano de contato também pode ser a causa do deslizamento, que altera os componentes normal e tangencial ao plano do peso próprio, atingindo na situação-limite, a relação expressa pela equação $T = N * \operatorname{tg}\varphi$ (Pinto, 2006). De acordo com a Figura 2 (c).

Experiências realizadas com corpos sólidos definem que o coeficiente de atrito independe da área de contato e da força normal aplicada. A resistência ao deslizamento é diretamente proporcional à tensão normal e pode ser representada por uma linha reta (Pinto, 2006). Conforme mostra a Figura 2 (d).

2.2.2 Coesão

Segundo Pinto (2006), o atrito entre as partículas está ligado especialmente à resistência ao cisalhamento dos solos. No entanto atrações químicas entre as partículas podem resultar em uma resistência independente da tensão normal atuante no plano, e constitui uma coesão real. Como se uma cola estivesse sido aplicada entre os dois corpos ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Transmissão de forças entre partículas



Fonte: Pinto (2006).

De acordo com Vargas (1977), a coesão é a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pelo qual ele se torna capaz de se manter coeso em forma de torrões ou blocos. Os solos que têm essa propriedade, chamam-se coesivos. Já os solos não coesivos são as areias puras e pedregulhos, esfarelam-se facilmente ao serem cortados ou escavados.

A parcela de coesão em solos sedimentares é relativamente pequena se relacionada à resistência por causa do atrito entre os grãos. Encontram-se solos naturalmente cimentados por diversos agentes, entre os quais solos evoluídos pedologicamente, que apresentam parcelas de coesão real de significativos valores (Pinto, 2006).

Outra analogia de acordo com Caputo (1988) é que a coesão se distingue em coesão aparente e coesão real, a primeira, resulta da pressão capilar da água contida no solo, e comporta-se como se fosse uma pressão externa, já a segunda, é devido às forças eletroquímicas de atração das partículas de argila.

2.2.3 Critérios de ruptura

Critérios de ruptura são formulações que buscam refletir as circunstâncias em que resulta na ruptura dos materiais. Existem critérios que determinam máximas tensões de compressão, tração ou cisalhamento. Um critério é satisfatório à medida que resulta no comportamento do material em questão (Pinto, 2006).

O estudo da resistência ao cisalhamento dos solos é a análise estado de tensões que provoca a ruptura (Pinto, 2006). Segundo o autor, os critérios que representam o comportamento dos solos da melhor forma são os de Coulomb e de Mohr.

Segundo Pinto (2006), o critério de Coulomb pode ser expresso da seguinte forma: não pode ocorrer ruptura se a tensão de cisalhamento não exceder um valor que é resultado da expressão $c+f^*\sigma$. Esses parâmetros estão representados na Figura 4 (a), sendo:

c – Coesão;

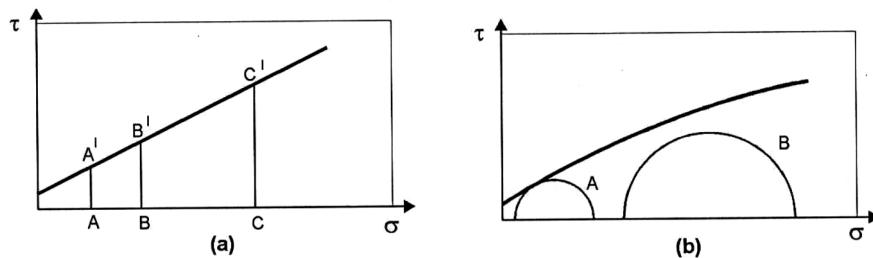
f – Coeficiente de atrito interno;

σ - Tensão normal existente no plano de cisalhamento.

Já o critério de Mohr pode ser expresso como: não ocorrerá ruptura sempre que o círculo representativo do estado de tensões estiver no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material (Pinto, 2006).

A Figura 4 (b) representa a envoltória de Mohr, e o círculo A representa a tangente, indicando um estado de tensão na ruptura e o círculo B retrata um estado de tensão em que não há ruptura (Pinto, 2006).

Figura 4 - Representação dos critérios de ruptura, sendo (a) de Coulomb e (b) de Mohr

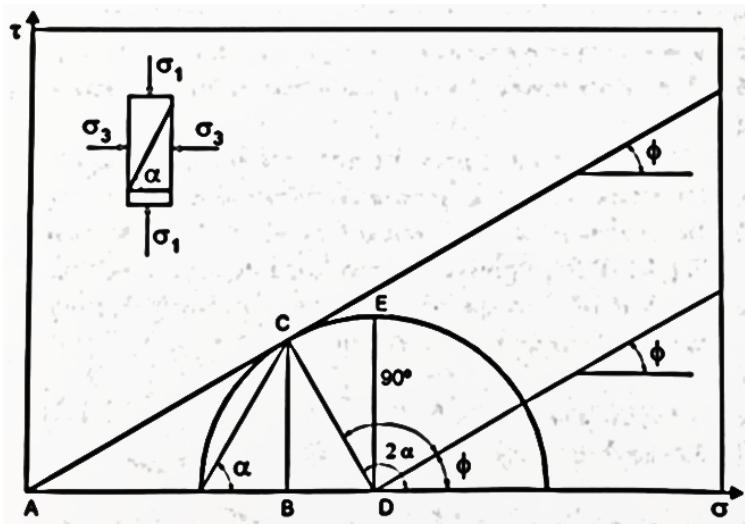


Fonte: Pinto (2006).

Ao se fazer uma reta como a envoltória de Mohr, seu critério de resistência fica análogo ao de Coulomb, ponderando a expressão critério de Mohr-Coulomb, empregada na Mecânica dos Solos.

Na Figura 5, um círculo de Mohr tangência a envoltória. Isso incide no plano em que ocorre a tensão normal indicada pelo segmento AB e a tensão cisalhante BC, que é menor do que a tensão cisalhante. A tensão normal AD proporciona uma resistência ao cisalhamento maior do que a tensão cisalhante atuante (Pinto, 2006).

Figura 5 - Análise do estado de tensões no plano de ruptura



Fonte: Pinto (2006).

2.3 INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA ESTABILIDADE DE TALUDES

Guidicini e Nieble (1983) afirmam que na realização de um ensaio de cisalhamento utilizando o mesmo material, considerado nas condições seca e saturada, é possível verificar que os resultados na situação saturada são sistematicamente inferiores, onde teor de umidade atua reduzindo principalmente sobre a coesão.

“A água no solo origina-se de muitas fontes e é um dos fatores que mais interferem na estabilidade de taludes. A pressão na água pode ser positiva ou negativa e variar conforme a existência ou não de movimentação” (Gerscovich, 2016, p. 96).

Gerscovich (2016) ainda afirma que mesmo após a estiagem das chuvas, o processo de fluxo interno da água no solo continua a acontecer. Devido a essas circunstâncias, é possível que o deslizamento ocorra algum tempo após o evento pluviométrico, em período sem chuva.

Muitos geólogos e engenheiros têm considerado que os deslizamentos de terra, ocorridos durante períodos de chuvas intensas, são causados pela diminuição da resistência ao cisalhamento por efeito lubrificante da água que se infiltrou no solo (Fiori, 2015).

Os deslizamentos, advindos em função da percolação d’água, ocorrem por dois fatores durante períodos de chuva, ou onde há a elevação do nível do lençol freático, ou simplesmente pela saturação que se cria entre as camadas superficiais do solo. Ambas contribuindo para a instabilidade do talude (Marangon, 2018).

Gerscovich (2016) menciona que quando existe a presença do nível d’água no solo, este pode ser dividido em três zonas: não saturada; saturada por capilaridade; e saturada abaixo do nível d’água, sendo positivas as pressões de água. As pressões negativas e denominadas succção ficam acima do nível d’água. Pressões positivas tendem a afastar as partículas sólidas, e as negativas contribuem como agentes de atração dessas partículas. Logo, na região não saturada, o solo ganha uma resistência adicional, cuja magnitude depende do valor da succção.

Do ponto de vista prático, a água pode ser considerada incompressível e sem nenhuma resistência ao cisalhamento, permitindo sob a ação de altas pressões, penetrar em microfissuras e poros, e exercer pressões elevadas que podem levar enormes maciços ao colapso (Marangon, 2018).

2.4 MÉTODOS E ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Avaliar a estabilidade de encostas, tornou-se um estudo constante na mecânica dos solos e das rochas. Existem diversos métodos para a verificação da estabilidade de taludes, mas dependendo do procedimento, pode haver algumas diferenças.

O problema de estabilidade, portanto, deve ser avaliado em função do tipo de ruptura que se espera para o material. Para métodos analíticos, de uma forma geral, o tipo de ruptura enfatizado na bibliografia referente ao assunto é a ruptura circular, com a superfície de ruptura curva ou em cunha, assemelhando-se a um círculo.

Neste trabalho, é utilizado o método de avaliação por ruptura circular. Assim, somente as metodologias abordadas se fazem presentes nesta revisão bibliográfica.

Os métodos se fundamentam na predeterminação de uma superfície de ruptura, na qual a massa de terreno passível é dividida em fatias e o somatório das forças resultantes de cada fatia determinará o fator de segurança do talude.

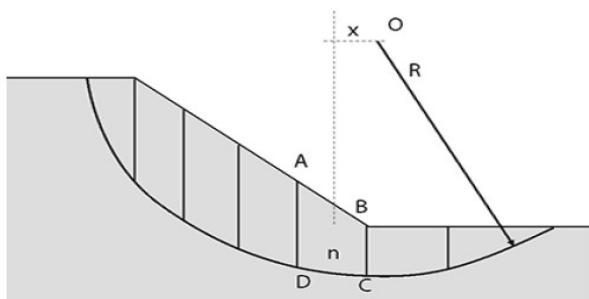
A análise de estabilidade abrange um conjunto de métodos visando à definição de um índice ou de uma grandeza que permita quantificar o quanto próximo um talude ou encosta se encontra de acontecer a ruptura (Augusto Filho; Virgili, 1998).

2.4.1 Equilíbrio limite

Segundo Gerscovich (2016), o método consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, a qual pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. O método expõe que a ruptura ocorre ao longo de uma superfície e que todos os elementos ao longo dessa superfície atingem simultaneamente a mesma condição de $FS = 1$. Assumem-se as seguintes premissas:

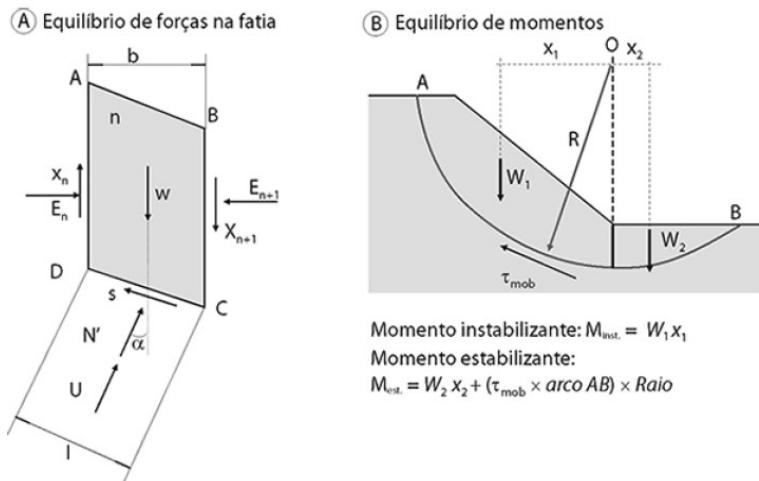
Postula-se um mecanismo de ruptura, isto é, atribui uma determinada região de potencial ruptura (circular, planar etc.). Então divide-se em fatias o solo acima da superfície, conforme Figura 6.

Figura 6 - Exemplos de divisão em fatias de uma superfície circular



Fonte: Gerscovich (2016).

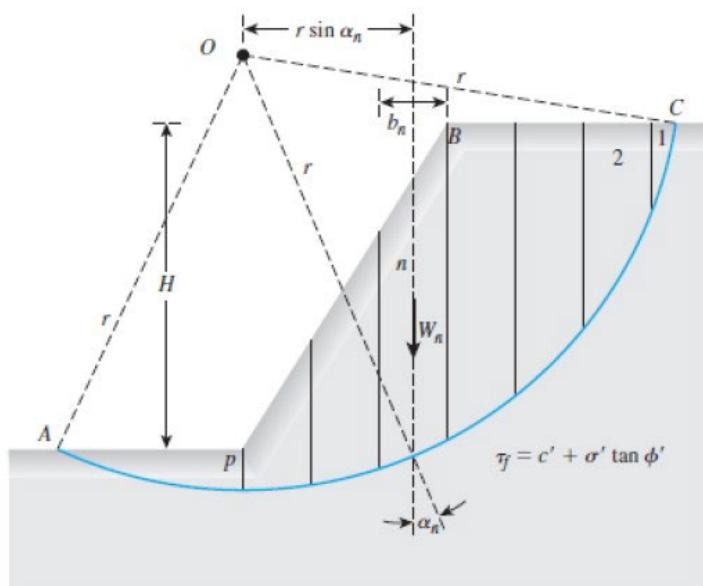
Por meio da equação da estática se determina o equilíbrio, conforme Figura 7. Esse equilíbrio de forças é feito pela análise do equilíbrio de cada fatia. O equilíbrio de momentos realiza-se comparando o somatório dos momentos estabilizantes e instabilizantes, e uma das incógnitas do problema é a tensão cisalhante mobilizada (τ_{mob}).

Figura 7 - Equações de equilíbrio


Fonte: Gerscovich (2016).

2.4.2 Método comum das fatias

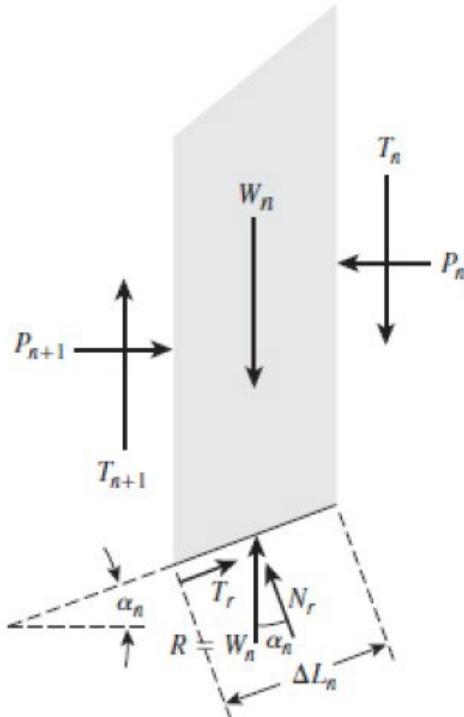
Em 1936, o engenheiro sueco Fellenius desenvolveu o método que é conhecido como sueco ou de fatias. Baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento de secção circular, divide-se então esse volume em fatias verticais, demonstrado na Figura 8, as quais são analisadas de maneira individual, como se fosse único bloco deslizando (Fiori, 2015). Conforme Figura 9.

Figura 8 - Esquema de divisão do talude em fatias verticais e indicação da superfície de potencial ruptura


Fonte: Das (2013).

A maioria dos *softwares* de computador utiliza o método de fatias, já que pode prontamente adaptar geometrias complexas dos taludes, condições variáveis do solo e a influência de cargas externas (Abramson *et al.*, 2002).

Figura 9 - Distribuição das forças atuantes sobre uma fatia

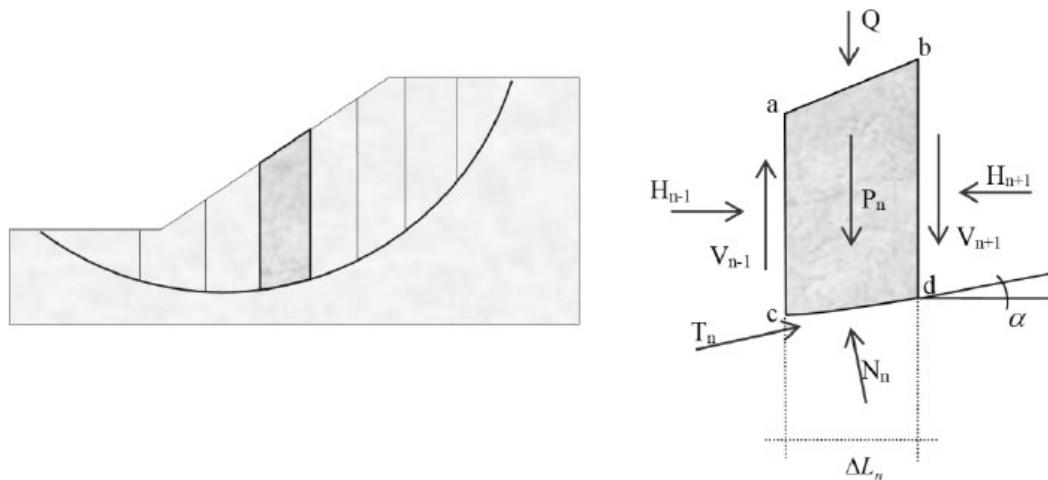


Fonte: Das (2013).

2.4.3 Ruptura circular: Método Bishop (1955)

De acordo com Fiori e Carmignani (2009), utilizando como base a divisão de camadas de escorregamento, o método de Bishop tem por objetivo analisar o equilíbrio. Bishop apresentou esse método em 1955, no qual considera a análise da estabilidade de um talude utilizando na divisão da cunha de escorregamento em diversas fatias. A Figura 10 mostra a distribuição do talude em fatias e as forças atuantes em uma delas.

Figura 10 - Análise por divisão em fatias



Fonte: Mafra Júnior (2003).

Sobre a fatia "n" existem forças a considerar, que são as seguintes:

P_n – Peso da fatia;

Q – Sobrecarga;

N_n – Reação normal ao longo da superfície de ruptura;

T_n – Reação tangencial normal ao longo da superfície de ruptura;

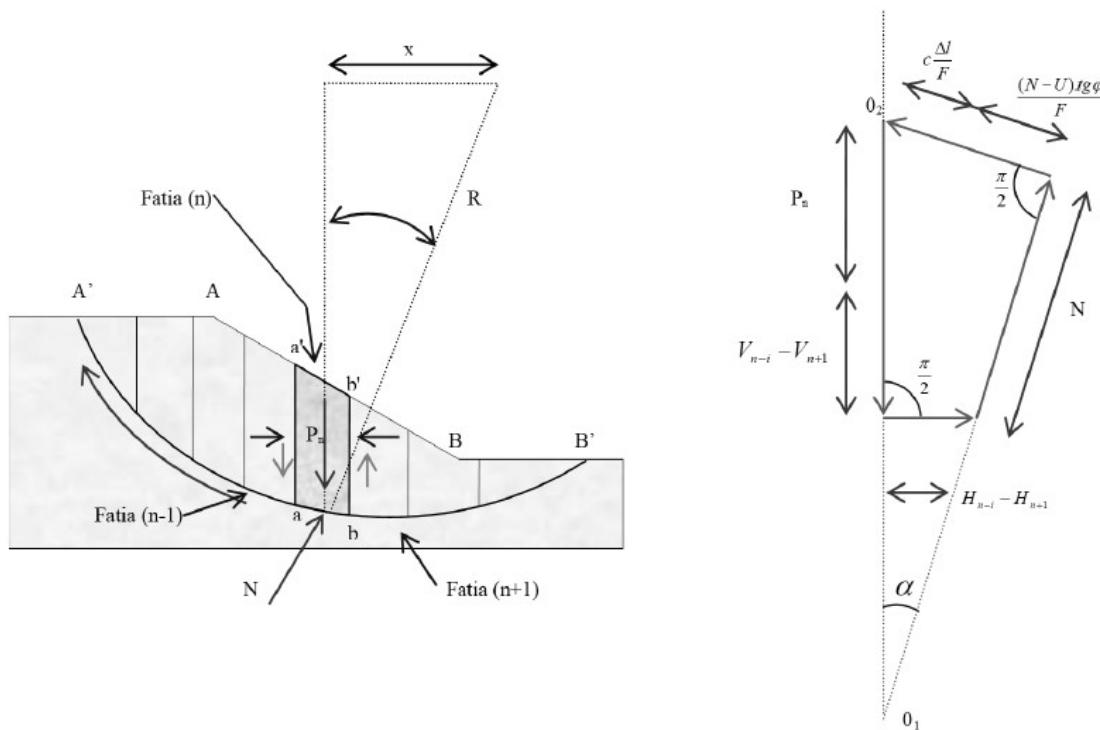
H_{n+1} e H_{n-1} – Componentes normais das reações das fatias vizinhas;

V_{n-1} e V_{n+1} – Componentes verticais das reações das fatias vizinhas;

R_{n-1} e R_{n+1} – Reações das fatias vizinhas.

Fellenius apresentou a proposta de divisão de cunhas em fatias no ano de 1936, sendo a análise de Bishop baseada nesse método. Apresenta-se, a seguir, a formulação implementada por Bishop, segundo Fiori e Carmignani (2009), a Figura 11, apresenta a distribuição de forças em uma fatia de solo "n", em uma vertente com deslizamento rotacional.

Figura 11 - Distribuição de forças em uma fatia de solo "n", em uma vertente com deslizamento rotacional



Fonte: Mafra Júnior (2003).

Do polígono de forças, indicado na Figura 11, obtém-se projetando as forças segundo a direção do peso 01 e 02, para um solo sem coesão.

$$P_n + V_{n-1} - V_{n+1} = N \cos \alpha + \frac{(N-U) \operatorname{tg} \varphi}{F} \operatorname{sen} \alpha + c \frac{\Delta l}{F} \operatorname{sen} \alpha \quad (1)$$

Onde U é a força neutra e F_s é o fator de segurança. Como $N = P_e + U$, tem-se:

$$P_n + V_{n-1} - V_{n+1} = N \cos \alpha + U \cos \alpha + \frac{P_e \operatorname{tg} \alpha}{F_s} + c \frac{\Delta l}{F_s} \operatorname{sen} \alpha \quad (2)$$

Por outro lado, a resistência ao cisalhamento "s" efetivamente mobilizada sobre o arco "ab" é igual a: $F_r = cl + (N-U) \operatorname{tg} \varphi$ onde cl é a força de resistência devida à coesão (c) do solo.

$$s = c \frac{\Delta l}{F} + \frac{(N-U) \operatorname{tg} \varphi}{F}, \text{ onde } c \text{ é a coesão e } \varphi \text{ o ângulo de atrito interno.} \quad (3)$$

Escrevendo-se a igualdade dos momentos em relação ao centro "0" do círculo de raio "R", obtém-se:

$$\sum P_n x = \sum sR = \frac{R}{F} \sum [c\Delta l + (N - Utg\varphi)] \quad (4)$$

Como $x = R\sin\alpha$, tem-se:

$$F_s = \frac{\sum [c\Delta l + (N - U)tg\phi]}{\sum P_n \sin\alpha} \quad (5)$$

Substituindo o valor de (N-U) anteriormente obtido, tem-se:

$$F = \frac{1}{\sum P_n \sin\alpha} \sum c\Delta l \left(\frac{[P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos\alpha]tg\phi + c\Delta l \cos\alpha}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{F_s} tg\phi} \right) \quad (6)$$

E finalmente, chega-se à equação geral de Bishop:

$$F = \frac{1}{\sum P_n \sin\alpha} \sum \frac{[P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos\alpha]tg\phi + c\Delta l \cos\alpha}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{F} tg\phi} \quad (7)$$

Na equação a diferença entre ($V_{n-1} - V_{n+1}$) pode ser igualada a zero, ou seja:

$\Sigma(V_{n-1} + V_{n+1})tg\phi = 0$, pois segundo o autor, o erro resultante dessa simplificação é da ordem apenas de 1%.

Partindo disso, um trabalho analítico leva à equação final do método simplificado de Bishop, que será descrito a seguir.

2.4.4 Método simplificado de Bishop

Partindo do método analítico da equação de Bishop, leva a uma equação simplificada do método, Fiori e Carmignani (2009) afirmam que se introduzido a simplificação, ou seja, fazendo $(V_{n-1} - V_{n+1}) = 0$, chega-se à expressão F_s conhecida como método simplificado de Bishop, muito usado no estudo de estabilidade de taludes na atualidade.

A partir daí um trabalho analítico leva à equação final do método simplificado de Bishop, descrita a seguir:

$$\text{Fazendo que } b = l \cos \alpha \text{ e } M_{(\alpha)} = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \varphi \tan \alpha}{F_s} \right) \quad (8)$$

Substituindo esses valores na equação acima, obtém-se a equação:

$$F = \frac{\sum (bc + P - \mu b) g \varphi \frac{1}{M_{(\alpha)}}}{\sum P \sin \alpha} \quad (9)$$

Como o F_s aparece em ambos os membros da equação simplificada de Bishop, é necessária uma interação, na qual se assume um valor para a variável no primeiro termo da equação, calculando-se a segunda, até que os valores coincidam.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

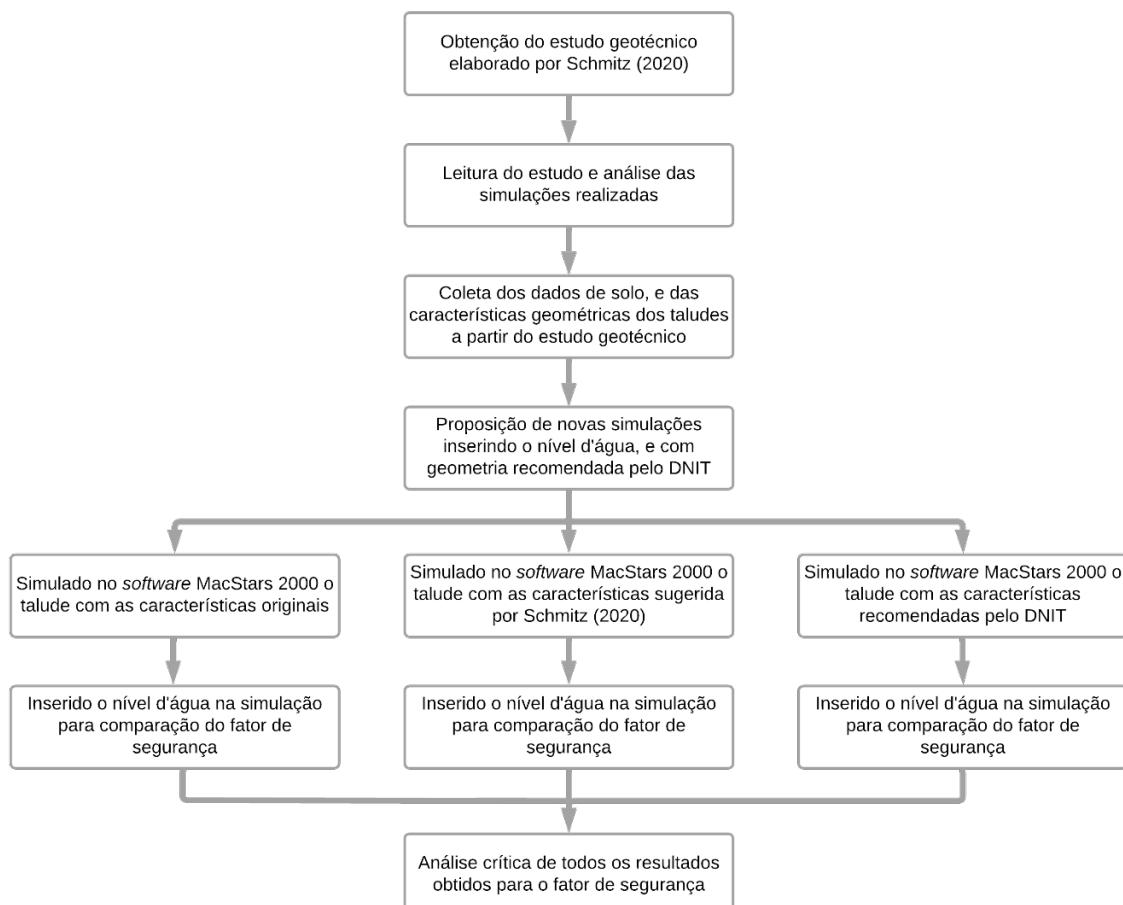
A presente pesquisa foi de natureza quantitativa, a qual Richardson (2008) caracteriza pela utilização da quantificação tanto na coleta como no tratamento de informações por meio de técnicas estatísticas, desde as mais simples até as mais complexas. Quanto ao objetivo se caracterizou como exploratória, já que tem por finalidade proporcionar maior familiaridade com o problema (Gil, 2022).

Em relação aos procedimentos técnicos consistiu em um estudo de caso, definido por Gil (2022) como um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos casos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, é uma investigação de um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto real. Além disso, classificou-se também como pesquisa documental, devido à utilização de dados já existentes elaborados para finalidades diversas. Esses dados são obtidos por meio de acervos internos à organização, não sendo obtidos em bibliotecas ou bases de dados (GIL, 2022).

Sendo essencial para qualquer estudo, é a relação entre população e amostra. A população é o conjunto de tudo que se pretende estudar, logo a população estudada neste trabalho são os taludes em solos, podendo ser encontrados diversos tipos, cada um com uma característica diferente, havendo alguns com solos mais resistentes,

com rochas, e outros com solos bem frágeis, alguns com uma inclinação bem acentuada, outros já com pouca inclinação. Já a amostra se refere ao talude existente na localidade do futuro loteamento, onde se coletou uma amostra para a realização do estudo geotécnico de avaliação de estabilidade de encostas por Schmitz (2020). A Figura 12 ilustra um fluxograma resumo da metodologia aplicada nesse trabalho para obtenção dos resultados de fator de segurança a serem comparados.

Figura 12 – Fluxograma resumo da metodologia aplicada

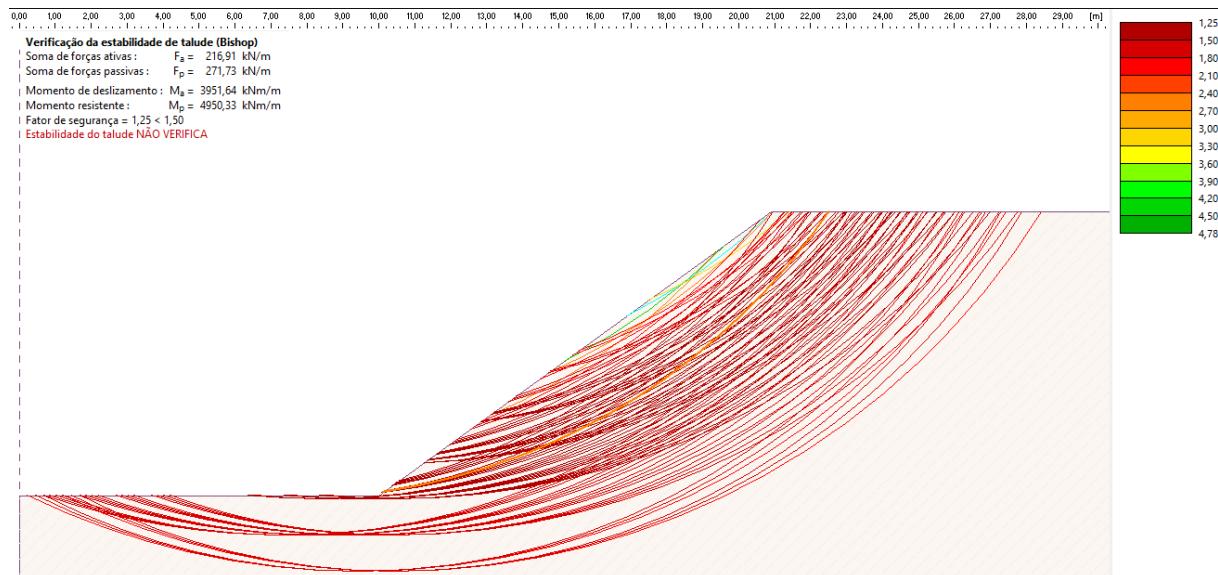


Fonte: elaborado pelos autores (2022).

Utilizou-se para coleta de dados deste trabalho o “Estudo geotécnico: avaliação de estabilidade de encostas”, realizado pelo engenheiro civil V. Schmitz, na data de 13 de julho de 2020. A partir dele retirou-se informações referentes aos dados da resistência do solo, à geometria do talude original sem modificações e à geometria do talude sugerido, que possuía fator de segurança acima de 1,50 proposto pela NBR 11.682 (ABNT, 2009) para a finalidade desejada. O estudo tinha como finalidade comprovar para a Defesa Civil do município de Gaspar-SC, se o talude original existente no imóvel, possuía segurança para não deslizar, haja vista a implantação futura de um loteamento no local.

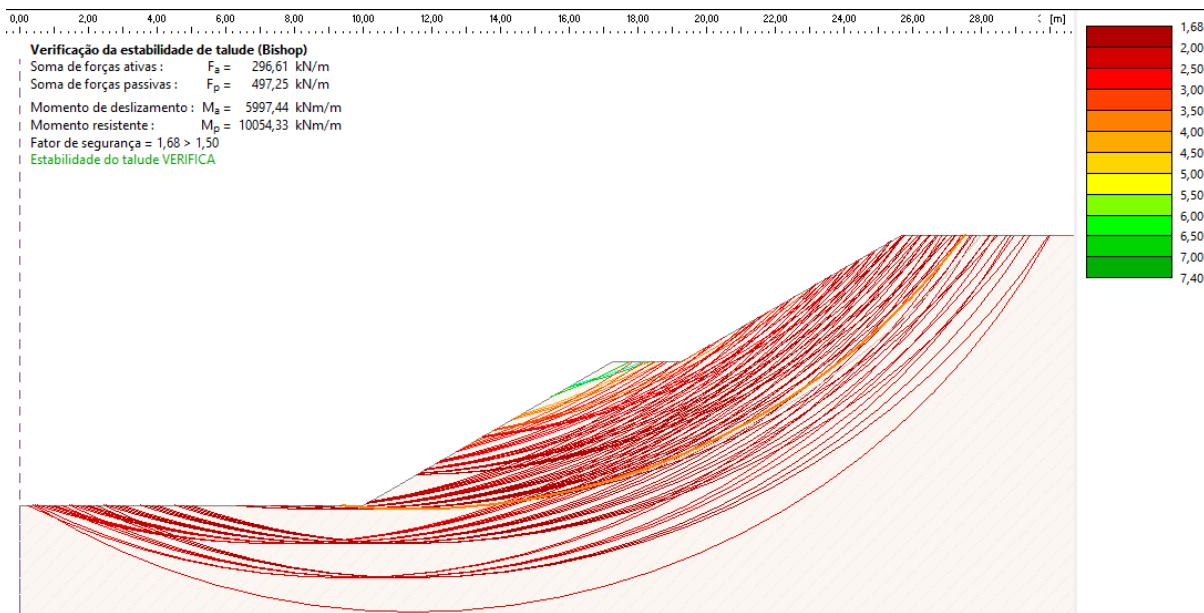
Segundo o estudo geotécnico, o talude original, sem nenhuma modificação, possui uma inclinação de 35° (0,7V: 1,0H), tendo seu ponto mais crítico com a altura de 7,88 metros a partir do pé do talude. E o solo estudado possui um peso específico aparente de 1,949 g/cm³, ângulo de atrito de 26,94° e a coesão de 5,90 KPa. Logo após simulado pelo software GEO 5, Schmitz (2020) identificou um fator de segurança de 1,25, ilustrado na Figura 13, sendo menor que o recomendado de 1,50.

Figura 13 - Simulação talude original sem modificações



Fonte: Schmitz (2020).

Schmitz (2020) sugere a readequação do talude com uma geometria de duas bancadas com inclinação de 30° (0,58V: 1,0H), tendo a primeira 4,19 metros de altura para o pé do talude, um patamar de 2,00 metros, e a segunda bancada com 3,69 metros de altura para a crista do talude. Nesse sentido, utilizou-se os mesmos dados de solo da simulação do talude original, na qual resultou em um fator de segurança de 1,68 conforme se demonstra a Figura 14, sendo superior ao recomendado de 1,50.

Figura 14 - Simulação talude sugerido


Fonte: Schmitz (2020).

Porém em nenhuma das simulações de Schmitz (2020) foi utilizado o nível d'água para as análises da estabilidade. Logo, apresentou-se neste trabalho, a mesma simulação do talude original sem nível d'água, para que se pudesse ter como base o mesmo valor do fator de segurança encontrado por Schmitz (2020), haja vista que todas as simulações deste trabalho foram realizadas no *software* MacStars 2000. Em sequência, inseriu-se o nível d'água na simulação, estando esse nível em uma faixa entre 1,50 metros e 2,00 metros de profundidade, para que fosse comparado e analisado a interferência do nível d'água nessa geometria.

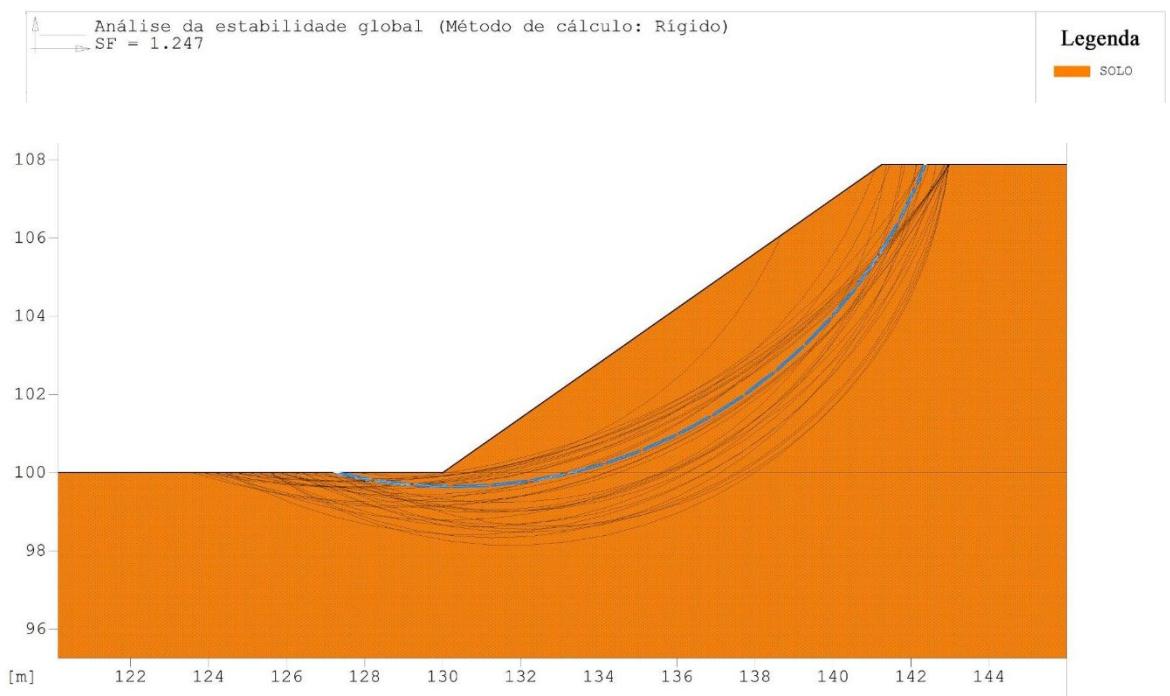
Em seguida, realizou-se a simulação do talude sugerido por Schmitz (2020), conforme se mostra na Figura 14, para verificar se o valor do fator de segurança seria similar. Em sequência, inseriu-se o nível d'água na simulação, estando esse nível em uma faixa entre 1,50 metros e 2,00 metros de profundidade, podendo, assim, também ser comparado e analisado a interferência do nível d'água nessa simulação.

Por fim, realizou-se uma nova simulação com os mesmos dados do solo fornecido no estudo. Utilizou-se a geometria sugerida pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, com características de 1,0V: 1,0H, ou seja, 45º, sendo esse parâmetro aceito para aprovações na maioria das cidades na elaboração de projetos de corte em taludes. Também se fez a simulação com e sem nível d'água, para comparar e analisar essa nova situação proposta. Vale ressaltar ainda que a simulação seguindo os parâmetros do manual do DNIT (2010), na presente pesquisa não contempla a criação de nenhum patamar no talude, já que segundo o manual, é recomendado apenas para taludes acima de 10,00 metros de altura, não sendo o caso nesta situação estudada.

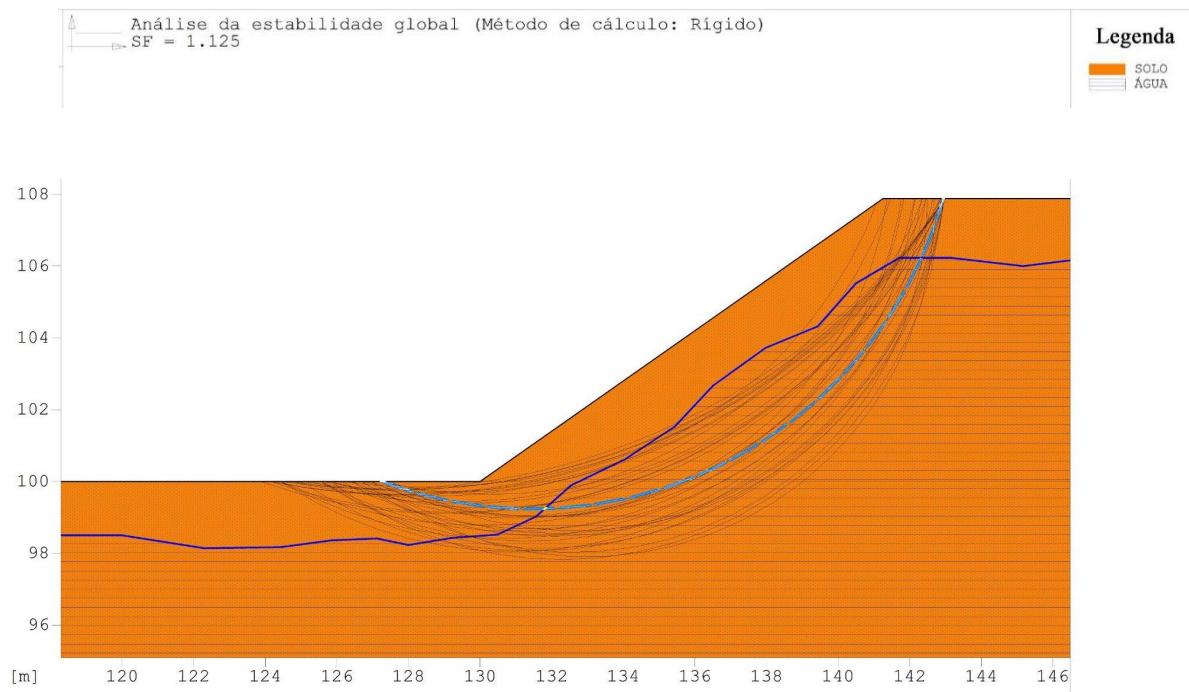
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na primeira simulação realizada, em que foi estudado o talude original sem nível d'água, o resultado obtido foi de 1,247 conforme Figura 15. Comparando com o resultado de 1,25 obtido por Schmitz (2020), em sua simulação, pode-se perceber que foi o mesmo. Além disso, as simulações teriam sido executadas em programas diferentes, podendo ocorrer diferenças no arredondamento de valores. Logo, foi possível dar seguimento no presente trabalho inserindo o nível d'água.

Figura 15 - Simulação talude original sem nível d'água

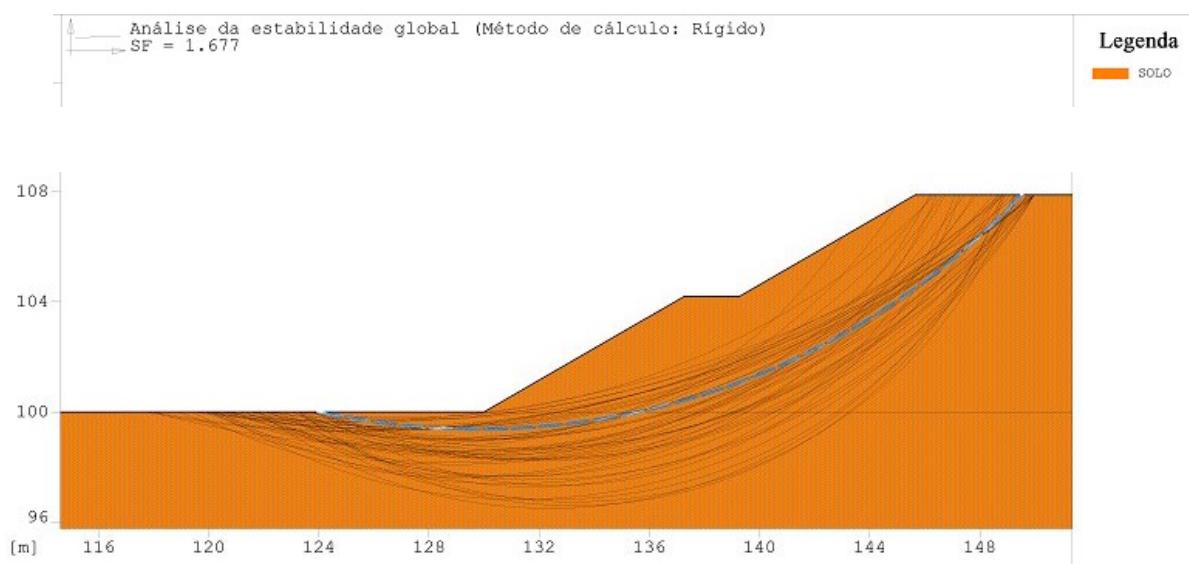


Na simulação do talude original considerando o nível d'água (Figura 16), o resultado obtido no fator de segurança foi de 1,125. Assim sendo, houve uma redução no fator de segurança de 9,75% entre a simulação sem e com nível d'água. Sendo significativa essa redução na simulação, confirma-se a hipótese de que há uma diminuição na estabilidade do talude quando submetido o nível d'água em sua simulação.

Figura 16 - Simulação talude original com nível d'água


Fonte: autores (2022).

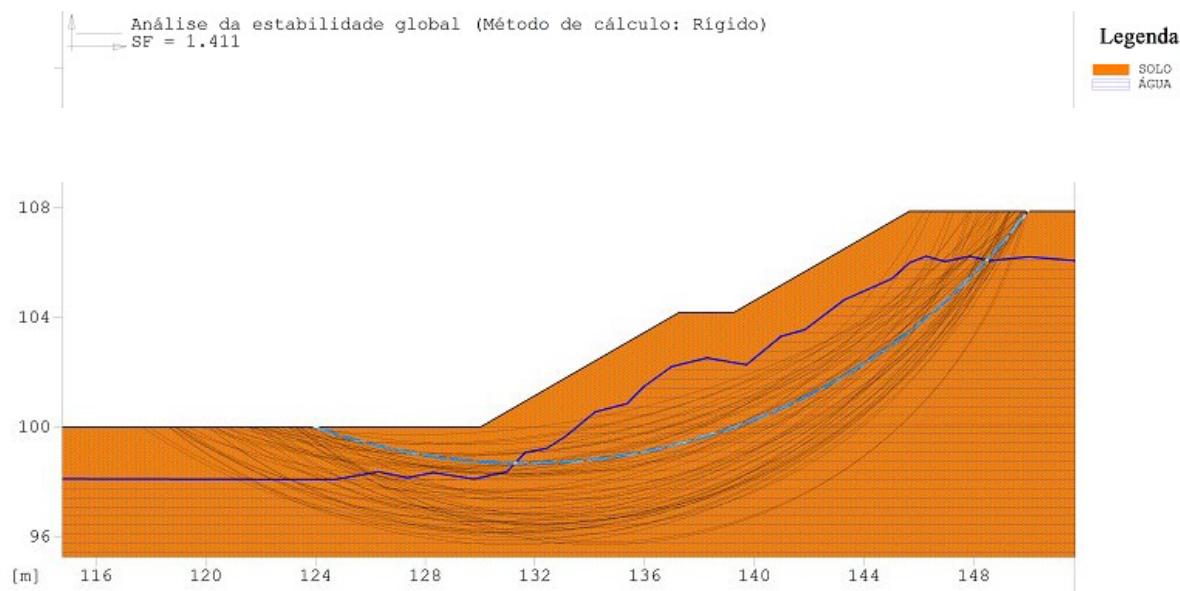
Na próxima simulação (Figura 17), adotou-se a geometria sugerida por Schmitz (2020), para que o talude tivesse o fator de segurança acima do mínimo recomendado. Também se elaborou a mesma simulação considerando sem o nível d'água, para primeiro se obter o resultado próximo ao de Schmitz (2020), e em seguida, poder ser inserido o nível d'água para comparação.

Figura 17 - Simulação talude sugerido sem nível d'água


Fonte: autores (2022).

Em seguida, realizou-se a simulação com a mesma geometria do talude anterior (Figura 16), porém inserindo o nível d'água na simulação (Figura 18) e tendo como resultado o fator de segurança de 1,411. Comparando com a simulação sem nível d'água houve uma redução de 15,86% nesse valor. Esse novo valor obtido foi abaixo do mínimo de 1,50 recomendado pela NBR 11.682 (ABNT, 2009) para a finalidade proposta. Dessa forma, essa geometria com a adição do nível d'água não estaria atendendo à norma para uma situação de grande acúmulo de chuva.

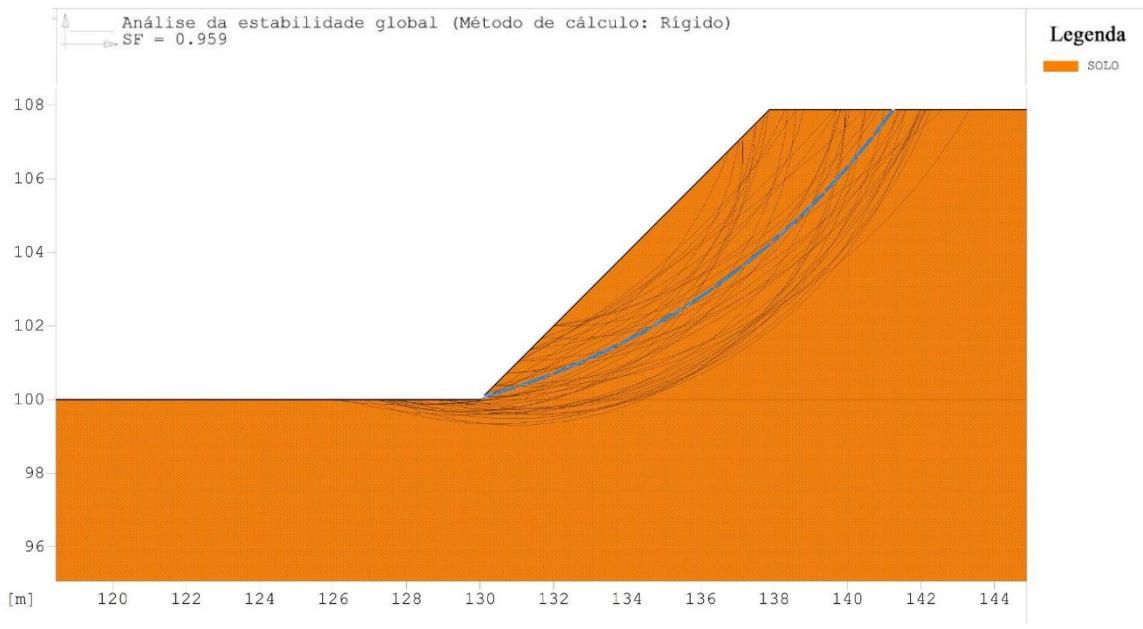
Figura 18 - Simulação talude sugerido com nível d'água



Fonte: autores (2022).

No último formato geométrico simulado, foram utilizadas as características definidas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Encontrou-se um fator de segurança de 0,959 para a simulação sem nível d'água (Figura 19). Esse valor foi 36,06% menor do que o mínimo proposto pela NBR 11.682 (ABNT, 2009) para a finalidade proposta. Percebe-se então o quanto perigoso pode ser a elaboração de um projeto de corte de talude, seguindo apenas a bibliografia existente sem o devido estudo do solo.

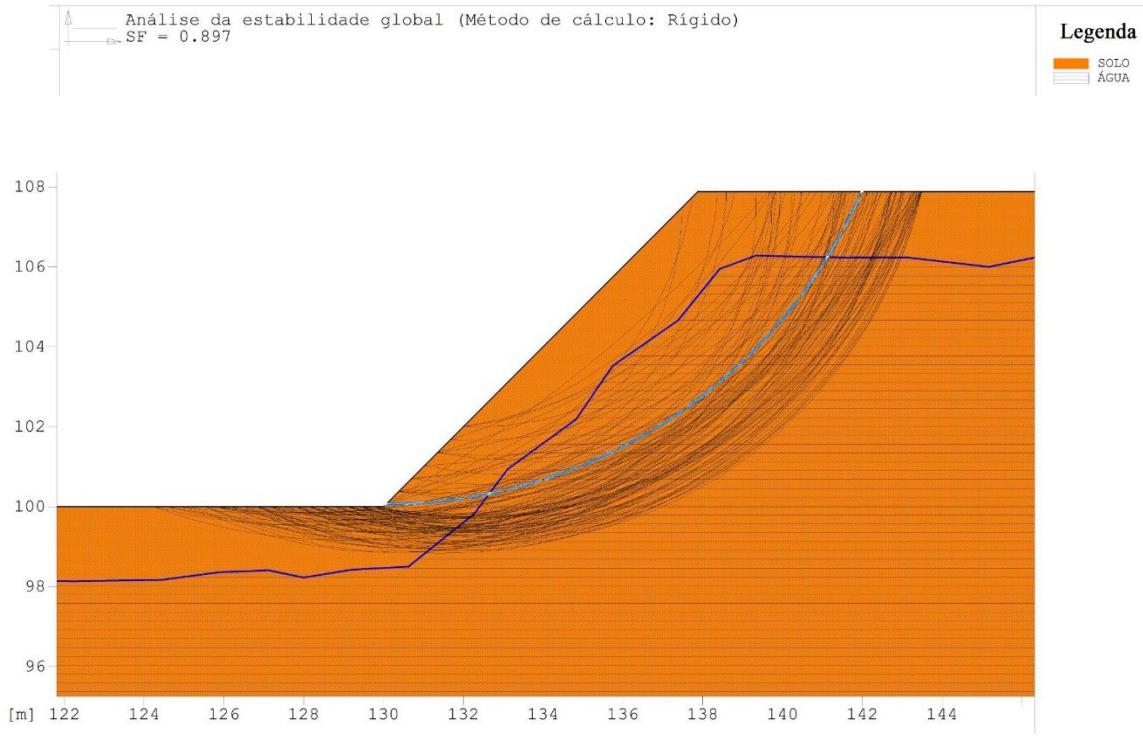
Figura 19 - Simulação com geometria sugerida pelo DNIT sem nível d'água



Fonte: autores (2022).

Inseriu-se o nível d'água, em que o resultado do fator de segurança foi de 0,897 (Figura 20), sendo 6,46% menor que o fator de segurança da simulação sem nível d'água (Figura 19). Além disso, foi 40,20% menor do que o mínimo proposto pela NBR 11.682 (ABNT, 2009) para a finalidade proposta.

Figura 20 - Simulação com geometria sugerida pelo DNIT com nível d'água



Fonte: autores (2022).

Após a realização de todas as simulações propostas, obteve-se valores conforme demonstrados na Tabela 2, sendo possível analisar que existe uma redução no fator de segurança de um talude quando inserido o nível d'água, sendo observado em todos os resultados essa situação. Constatou-se que mesmo um talude com geometria modificada e com fator de segurança acima do recomendado, ao ser simulado inserindo o nível d'água, esse talude pode deixar de possuir um fator de segurança que atenderia à norma técnica. Devido a esse acontecimento, pode-se sugerir que apenas aumentando o patamar para 3,00 metros na geometria proposta por Schmitz (2020), conforme visto na Figura 18, e simulado novamente considerando o nível d'água, seria obtido um fator de segurança de 1,572, a qual seria superior ao mínimo proposto pela norma técnica, deixando então o talude estudado com fator de segurança aceitável.

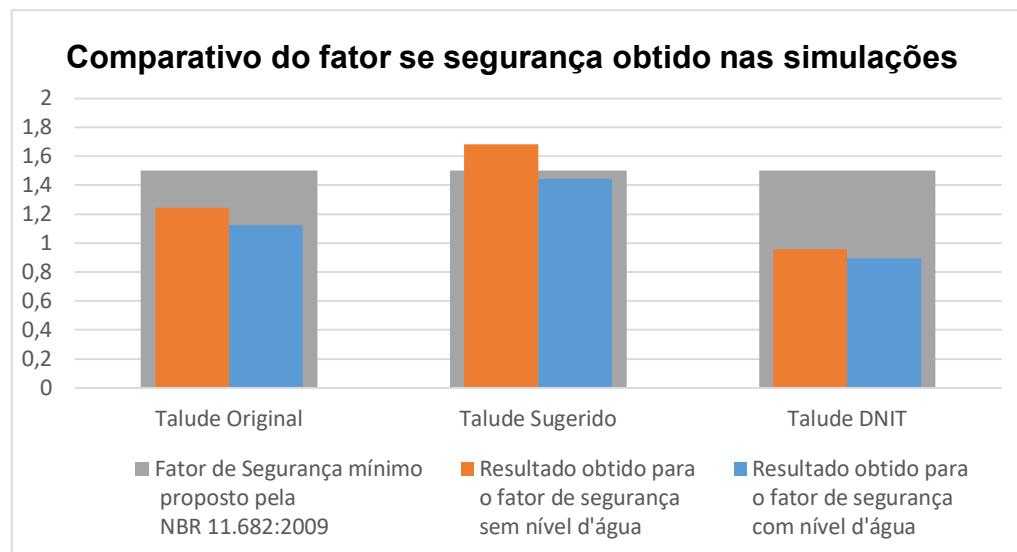
Tabela 2 – Resultados obtidos após realização das simulações

Nome Simulação	Resultado obtido para o fator de segurança	Atende a NBR 11.682:2009?
Talude Original (Schmitz) (Sem nível d'água)	1,250	Não
Talude Original (Sem nível d'água)	1,247	Não
Talude Original (Com nível d'água)	1,125	Não
Talude Sugerido (Schmitz) (Sem nível d'água)	1,680	Sim
Talude Sugerido (Sem nível d'água)	1,677	Sim
Talude Sugerido (Com nível d'água)	1,411	Não
Talude DNIT (Sem nível d'água)	0,959	Não
Talude DNIT (Com nível d'água)	0,897	Não

Fonte: autores (2022).

No Gráfico 1, está ilustrado o fator de segurança de todas as simulações realizadas, podendo ser comparado o que acontece ao ser inserido o nível d'água na simulação, e ainda comparando com o valor mínimo recomendado por norma técnica.

Gráfico 1 – Comparativo do fator de segurança obtido nas simulações



Fonte: Autores (2022).

Por fim, a partir da simulação realizada seguindo os parâmetros do DNIT, o mesmo que é utilizado pela maioria dos profissionais que elaboram projetos de terraplenagem, observou-se a insegurança que pode existir nessas situações. Assim sendo, nem todo tipo de solo ficará estável em determinada inclinação, por isso recomenda-se que todo projeto elaborado para criação de um talude, primeiro seja realizado o estudo de cisalhamento do solo, e então determinar com base nas informações, qual a inclinação específica o talude irá possuir um fator de segurança maior que o recomendado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das simulações realizadas, conclui-se que o assunto de estabilidade de talude possui grande relevância para a sociedade, visto que diz respeito à segurança de pessoas e das edificações que estas ocupam. Esse fato se torna mais evidente em regiões montanhosas e com vales encaixados devido à forte inclinação dos taludes.

Este artigo teve como objetivo realizar simulações de estabilidade de talude baseado no estudo geotécnico preexistente, situado no imóvel onde se planeja executar um loteamento residencial, podendo concluir que o objetivo foi alcançado, visto ser possível realizar as simulações propostas pelo autor do estudo preexistente, e ainda realizar novas simulações para comparação.

Após a realização de todas as simulações, percebeu-se a influência que o nível d'água pode ter para a resistência do solo e consequente estabilidade do talude, pois em todos os ensaios com nível d'água o fator de segurança deu menor

que sem o nível d'água. Verificou-se ainda a necessidade da elaboração de estudo de cisalhamento do solo em todo projeto de corte a ser elaborado, para que por meio dele seja possível determinar qual a melhor inclinação a se adotar, haja vista que apenas seguindo os parâmetros recomendados pela bibliografia podem não ser o suficiente para segurança dos taludes até nos dias mais críticos de chuva.

Recomenda-se para estudos futuros a realização de mais ensaios de cisalhamento do solo, o monitoramento do nível d'água em épocas que há grande acúmulo de chuvas contínuas, e a realização de simulações utilizando outros métodos de análise de estabilidade de talude.

REFERÊNCIAS

ABRAMSON, L.W.; LEE, T.S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. **Slope Stability and Stabilization Methods** by, John Wiley & Sons, Inc., New York. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.682**: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo; VIRGILI, José Carlos. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A, Ed(s). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 243-270.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de implantação básica de rodovia**. – 3. ed. - Rio de Janeiro, 2010. 617p. (IPR. Publ. 742).

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. volume 1: Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2013. xvii, p. 561.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FIORI, Alberto Pio, 1950. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicações na estabilidade de taludes / Alberto Pio Fiori, Luigi Carmignani**. 2. ed. rev. e ampl – Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1983.

MAFRA JÚNIOR, Celso da Silva. **Estudos em estabilidade de talude**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, [S.I.], 2003.

MARANGON, Márcio. **Hidráulica dos solos**. Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-2018-Cap%C3%ADtulo-01-Hidr%C3%A1ulica-dos-Solos-20181.pdf>. Acesso em: 29 set. 2022.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SANTOS, Angela Sikorski; NASCIMENTO, Carla Zenita do; LOPES, Claudemir Aparecido. **Manual de orientações metodológicas**. Brusque: Editora UNIFEBE, 2021, 68p.

SCHMITZ, V. **Estudo geotécnico: Avaliação de estabilidade de encostas**. Projeto geotécnico. 2020.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977.

VEDOVELLO, Ricardo; MACEDO, Eduardo Soares de. Deslizamento de Encostas. In. SANTOS, Rozely Ferreira dos. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007. p. 75-93.