

# ESTUDO DE CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TALUDE EM SOLO SITUADO NA REGIÃO MEIO OESTE DE SANTA CATARINA COM O USO DE SOFTWARE

Bruno Zambiazzi<sup>1</sup>  
Fabiano Alexandre Nienov<sup>2</sup>

## Resumo

Os estudos referentes a estabilidade de taludes são de extrema importância para diversas áreas da construção civil, uma vez que as consequências causadas pelas rupturas desses maciços são por muitas vezes inestimáveis. O risco de acidentes nessa área precisa ser minimizado ao máximo usufruindo de todos os meios possíveis para encontrar-se as melhores soluções para cada caso. Perante isso, o presente estudo avalia diversas condições de estabilidade destes maciços via *software*, analisando primordialmente as características dos métodos dos autores Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Jambu e Fellenius, identificando qual é mais econômico, qual é mais dispendioso e qual deles se encaixa melhor nas posteriores análises. Com as verificações realizadas e adotando o método de Morgenstern-Price como base, sucedeu-se na avaliação de um talude com a adição de poropressão no seu interior, obtendo uma diferença no ângulo de  $23,55^\circ$  se comparado a uma situação de solo seco. Para todas as análises o *software* solicita a inserção dos parâmetros ao cisalhamento do solo: peso específico, ângulo de atrito e coesão, estes têm uma influência direta nos resultados dos cálculos destas encostas. Com o aumento destes parâmetros, também ocorre um aumento no fator de segurança, deste modo, foi realizado uma análise específica para observar o comportamento deles em um talude, obtendo valores de FS (fator de segurança) que variaram de 0,897 a 1,942 em encostas sem a adição de poropressão. Outro estudo realizado, foi o de altura máxima para um talude de  $45^\circ$  de inclinação, encontrando valores de 33 metros para solos sem poropressão e 9 metros para solos com poropressão. Por fim, foi elaborada uma comparação entre o fator de segurança de norma e um talude em iminente ruptura, observando um aumento de 224% no volume de solo movimentado pelo fator de segurança de norma em uma hipotética construção desses dois casos. Em vista disso, a utilização de *softwares* na análise de taludes traz inúmeros benefícios ao projetista, como precisão, agilidade, comodidade e uma vasta gama de soluções. Palavras-chave: Análise; *Software*; Talude.

## 1 INTRODUÇÃO

O solo está presente em quase todos os trabalhos de engenharia civil, seja na fundação de um edifício, terraplenagem de loteamento ou corte e aterro de estradas, o estudo dos solos é parte integrante de qualquer trabalho a ser feito. Não é diferente para as encostas

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, e-mail: bruzambi@yahoo.com.br.

<sup>2</sup> Professor Doutor, Universidade do Oeste de Santa Catarina, e-mail: fabiano.nienov@unoesc.edu.br.

e taludes projetados, onde o planejamento e a análise de estabilidade do solo devem ser realizados para evitar o risco de acidentes.

Devido a este fato, denota uma dificuldade em previsão de acidentes considerável, bem como a vasta gama de tipologias deste tipo de ocorrências, a possibilidade de ocorrerem em vários tipos de locais, o fato de serem facilmente influenciados e agravados pelas atividades antrópicas, e as graves consequências em termos de danos humanos, materiais, econômicos e ambientais, esse tipo de fenômeno aparece como um risco merecedores de atenção específica, a fim de prevenir e mitigar suas consequências (FONSECA, 2014).

Um caso muito comum em que é noticiado pela mídia constantemente é o rompimento das encostas onde tem-se construção de estradas. Esses acidentes acabam causando bloqueios e transtornos econômicos e sociais, principalmente na ligação de rodovias entre cidades, afetando seu abastecimento e, mais preocupantemente, vítimas mortais.

Para evitar este tipo de acidente é preciso ter preocupação com a estabilidade dos taludes, independentemente do local onde estes maciços de solo estejam localizados. Para realização de estudos de estabilidade de taludes é preciso obter os parâmetros de resistência do solo bem como sua geometria. São cálculos que demandam muitas interações e para isso busca-se agilizar essas interações como uso de *softwares* específicos para esse fim. Existem cada vez mais programas computacionais que são utilizados para realizar as análises de estabilidade possibilitando inserir as medidas de campo, consequentemente obtendo uma correta noção do risco de ocorrer um movimento de massa ou não.

A análise de estabilidade realizada por estes *softwares* nada mais é que o uso do método de equilíbrio limite ou uso de elementos finitos. Nas simulações é verificado o fator de segurança do talude, utilizando como dados as propriedades de cisalhamento, pressão de poro, descontinuidades entre outros. As análises são realizadas para verificar se existe uma resistência satisfatória no maciço para enfrentar as tensões de cisalhamento, causadoras de falhas ou deslizamentos.

O presente trabalho tem por objetivo analisar para diferentes alturas e inclinações o comportamento de um solo típico da região do meio oeste do estado de Santa Catarina, além disso serão comparados os resultados entre os métodos de equilíbrio limite usados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de taludes é um tema muito abordado na Engenharia Civil e na Geotecnia, sendo eles naturais ou taludes artificiais de corte e aterro. Por este motivo, a avaliação da segurança é necessária, servindo de base para os projetos feitos na área. Normalmente sob a forma de um coeficiente de segurança mínimo ou de uma probabilidade de ruptura da encosta, o projetista irá fundamentar as dimensões do talude no local,

diminuindo ao máximo as frequentes ocorrências recentes de fenômenos de movimentação de massa (GERSCOVICH, 2012).

Os taludes executados são provenientes de cortes em encostas, de escavações ou de lançamentos de aterros. Os taludes formados por uma construção em aterro, demonstram menor instabilidade, pois as características do solo utilizado para tal é determinada pelo executante, geralmente possuindo alta resistência. Já para a parte de cortes, é necessária uma maior cautela para que sejam executados de maneira a garantir altura e inclinação adequada a fim de manter a estabilidade do mesmo (GERSCOVICH, 2012).

Outro fator de grande importância para melhor entendimento do conceito de estabilidade de taludes, é determinar as maneiras que ocorrem as movimentações do solo, a geometria, as forças atuantes e a velocidade que acontecem as movimentações (TAVARES, 2019).

Para Machado e Machado (1997 apud TAVARES, 2019), as encostas ficam expostas à gravidade e à infiltração de água, desestabilizando o maciço, quando sua resistência não é suficiente para conter esses efeitos, o solo tende a romper. Os principais métodos de movimentação de talude serão apresentados em seguida, eles podem ser classificados conforme a velocidade do solo da seguinte maneira:

- a) Rastejos: São movimentações muito lentas e constantes que acontecem na superfície do maciço sem necessariamente romper. A causa do é geralmente uma combinação de gravidade e fatores de temperatura e umidade. O movimento habitualmente apresenta a ordem de milímetros por ano.
- b) Escorregamentos: O movimento pode ser rápido ou lento. Isso se deve ao deslocamento do terreno em forma de cunha, que apresenta uma superfície de fratura bem definida.
- c) Desmoronamento: Acontece devido à gravidade que separa a massa de solo do maciço e seu movimento é rápido. Pode ocorrer em blocos de rocha, e a intrusão de água em rachaduras que produzem empuxo hidrostático pode ser uma das causas da destruição nesta situação.

## 2.2 MÉTODOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

A maioria dos métodos é baseada na teoria do equilíbrio limite, que calcula a estabilidade de uma massa de solo que se decompõe para formar uma superfície plana, circular, poligonal ou mista. O fator de segurança pode ser determinado a partir do equilíbrio de forças, equilíbrio de momentos e equilíbrio de limites de cisalhamento (SILVA, 2011).

A maior parte dos métodos de equilíbrio limite separa a região de solo demarcada pela superfície de ruptura em diversas fatias verticais e aplica as equações de equilíbrio para cada fatia isoladamente. A separação do solo em fatias possibilita que a análise da estabilidade seja realizada em taludes irregulares e não homogêneos, uma vez que, não há necessidade

de elas possuírem mesma espessura, o que permite separá-las de forma que a base de cada uma permaneça em um tipo de solo (CHOWDHURY, 1978 apud TONUS, 2009).

O Quadro 1 mostra resumidamente os métodos das fatias que serão tratados nesse trabalho, bem como suas características quanto à forma da superfície de ruptura e quanto às equações de equilíbrio estático satisfeitas.

Quadro 1 - Características dos métodos de equilíbrio limite

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS
Fellenius (1927)	Superfície de ruptura circular
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
Bishop Simplificado (1955)	Superfície de ruptura circular
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Janbu Simplificado (1968)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais
Morgenstern e Price (1965)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais
Spencer (1967)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais

Fonte: Tonus (2009).

## 2.3 PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DE ESTABILIDADE

Vários parâmetros podem ser utilizados e encontrados quando são feitos os estudos para estabilização um talude, como por exemplo a poropressão. Essa por sua vez é a pressão da água que preenche os espaços vazios entre as partículas sólidas. Além dessa constituinte presente no solo, existem outros parâmetros com definições mais complexas, são eles: fator de segurança (FS), a coesão do solo ( $c'$ ), o ângulo de atrito interno ( $\phi'$ ).

### 2.3.1 Fator de Segurança

O FS é a resultante de uma divisão contendo a resistência ao cisalhamento como dividendo e a tensão cisalhante como divisor, representada na Equação 1 (DAS, 2013; GERSCOVICH, 2012).

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_d} \quad (1)$$

onde, FS = fator de segurança

$\tau_d$  = tensão de cisalhamento

$\tau_r$  = resistência ao cisalhamento

Com o resultado do FS, é possível determinar a presença ou ausência de instabilidade do talude analisado. Nesse sentido, um valor de FS igual a 1 corresponde ao rompimento do mesmo, um valor maior que 1 indica um gradiente estável e um valor menor que 1 não tem significado físico (GERSCOVICH, 2012).

Segundo Dell'Avanzi e Sayão (1998), o fator de segurança admissível (FS<sub>adm</sub>) de um projeto corresponde a um valor mínimo a ser atingido, ele vai variar de acordo com o entendimento do projetista para aquele caso. Assim, os fatores envolvidos contemplam a função da obra, vida útil, das consequências de uma eventual ruptura em termos de perdas humanas e/ou econômicas.

A Norma Brasileira Regulamentadora 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) estabelece que dependendo dos riscos envolvidos, deve-se classificar o projeto de acordo com as figuras apresentadas abaixo, a partir da possibilidade de perdas humanas (Quadro 2) e danos materiais (Quadro 3).

Quadro 2 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: Norma Brasileira Regulamentadora 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Quadro 3 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Fonte: Norma Brasileira Regulamentadora 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

Por fim os valores de FS podem ser encontrados na Tabela 1, esta refere-se as análises de estabilidade interna e externa do maciço. Vale ressaltar que para casos com grande variabilidade nos resultados dos ensaios geotécnicos, deve-se majorar o FS em 10%.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

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

Fonte: Norma Brasileira Regulamentadora 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

### 2.3.2 Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo

Dentre as várias características que um solo possui, existe uma que é essencial para conservar sua estabilidade e suportar cargas, a resistência ao cisalhamento. Assim, quando uma força consegue se sobrepor a essa resistência, a massa de solo irá se romper (CAPUTO, 2003; PINTO, 2006).

Para encontrar a resistência de cisalhamento do solo, existem dois parâmetros principais: a coesão e o atrito entre as partículas.

#### 2.3.2.1 Coesão

Segundo Vargas (1977), coesão é uma característica que os solos argilosos possuem de se manterem coesos, ou seja, unidos, tendo a possibilidade de fracioná-los sem que se desmembrem, mantendo seu formato original. Por sua vez os solos não coesivos, ou seja, que não possuem coesão, como as areias puras e pedregulhos, desmancham-se ao serem desmembrados, pois estes apresentam uma coesão apenas aparente.

A coesão aparente é o resultado da capilaridade da água contida no solo e que age semelhante a uma pressão vinda de fora, ocorrendo em solos parcialmente saturados, devido à sucção que atrai as partículas. No momento em que o solo se tornar saturado, ou totalmente seco, a sua coesão tende a zero, enquanto, que a coesão real é devida as forças eletroquímicas de atração das partículas de argila, ou seja, é uma característica do próprio solo (CAPUTO, 2003).

#### 2.3.2.2 Ângulo de atrito interno

Segundo Gerscovich (2012) e Pinto (2006), a resistência entre as partículas do solo pode ser comparada e assimilada à resistência de um objeto ao deslizar sobre um plano.

Para fazer um corpo deslizar, a força horizontal aplicada deve ser maior que a força normal e, portanto, seu coeficiente de atrito, dessa forma, pode-se escrever a Equação 2:

$$T_h = N_v * tg\phi \quad (2)$$

onde,  $T_h$  = força horizontal

$N_v$  = força vertical

$\phi$  = ângulo de atrito

Deste modo, "existe uma proporção entre a força tangencial e a força normal, sendo o  $\phi$ , o ângulo formado pelas resultantes das duas forças com a força normal" (FRITSCHER, 2016, p.27).

Porém, Pinto (2006) mostra que existe uma diferença entre a força de atrito entre dois corpos e a força de atrito que existe no solo, de modo que no solo as partículas podem deslizar entre elas, ou rolar uma sobre as outras, adequando-se nos espaços vazios existentes.

O autor também relata referente a dessemelhança das forças transmitidas nos contatos entre grãos de argila e areia, por conta de que as primeiras possuem grãos menores e em maiores quantidades, fazendo com que a força propagada de grão a grão seja menor, não gerando a expulsão de água existente no meio, que são responsáveis pela propagação das forças, já na areia, o contato ocorre frequentemente entre dois minerais, onde as forças transmitidas são importantes para empurrar a água para fora do meio (FRITSCHER, 2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

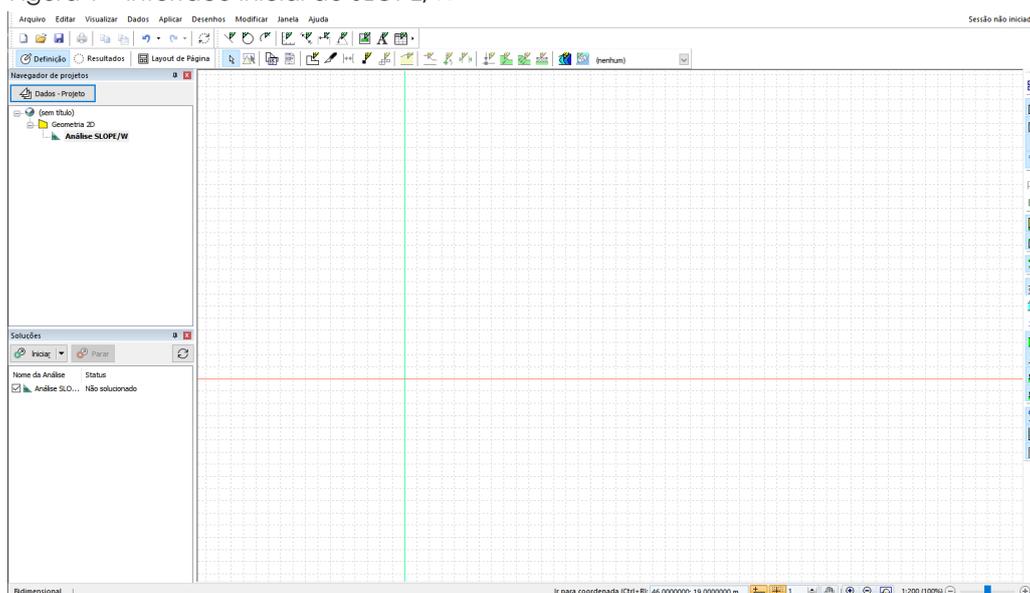
#### 3.1 PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Para todas as análises feitas neste artigo, foi utilizado o *software* SLOPE/W (versão 2021.4), sendo ele um dos programas constituintes do pacote da *GEOSLOPE International Ltd.*, marca conhecida mundialmente com sua atuação na área da geotecnia. Pelo fato da necessidade de uma assinatura para utilização completa dos *softwares*, foi utilizado uma versão estudantil nas análises realizadas.

Este *software* permite ao usuário calcular o fator de segurança (FS) com diferentes metodologias que utilizam a teoria de equilíbrio limite como base, sendo capaz de examinar um talude heterogêneo, com geometria complexa, exibindo diversas superfícies de ruptura e formatos para poropressão. Aliado a isso, também é disponibilizado a análise com diferentes autores, possibilitando uma comparação de teorias no talude investigado (GEOSLOPE, 2022).

Inicialmente o *software* exibe a interface onde será desenhada ou importada a geometria do talude. As opções encontradas na parte superior do *software* possibilitam inserir e desenhar os materiais integrantes do mesmo, assim como a linha piezométrica (Figura 1).

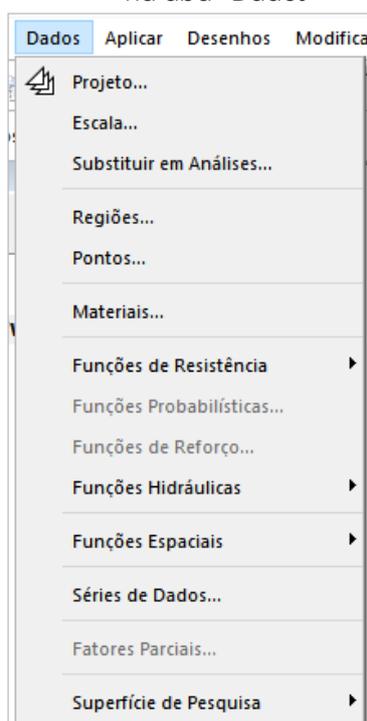
Figura 1 – Interface inicial do SLOPE/W



Fonte: os autores.

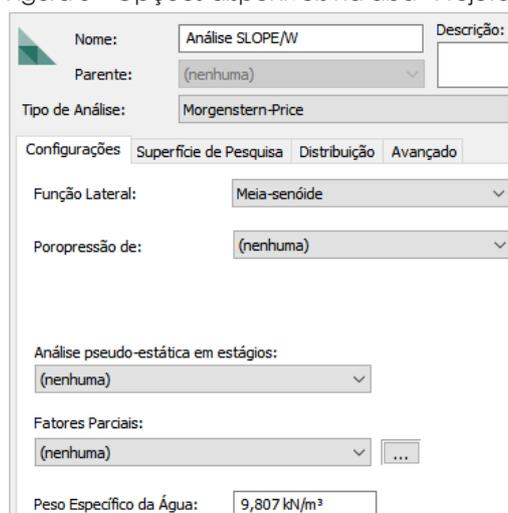
Na aba “Dados” (Figura 2) é possível inserir todos os materiais e suas respectivas características resistentes, inserir os pontos, regiões do talude e a superfície deslizante. Outra função presente na mesma aba, é a de “Projeto” (Figura 3), em que é possível modificar o tipo de análise, se o FS será probabilístico ou determinístico e o número de iterações que o *software* deve realizar para encontrar o valor de FS.

Figura 2 – Opções disponíveis na aba “Dados”



Fonte: os autores.

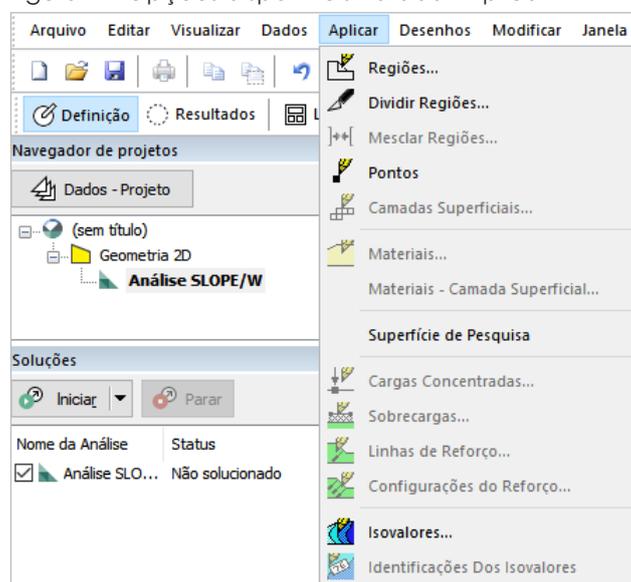
Figura 3 – Opções disponíveis na aba “Projeto”



Fonte: os autores.

Para a confecção do talude e suas regiões, utiliza-se a aba “Aplicar” (Figura 4), onde será desenvolvido o contorno da área do solo para locar cada material em sua devida região. Feito isso, pressiona-se o ícone “iniciar” que fará a análise do talude a apresentará na tela o FS encontrado. É possível então, gerar um documento em Word com as especificações dos resultados de cada fatia em que o talude foi analisado.

Figura 4 – Opções disponíveis na aba “Aplicar”



Fonte: os autores.

Com a introdução dos dados de geometria, parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e suposições do nível da água, o talude é finalizado. Foram inseridas no programa as características como coesão, ângulo de atrito interno e peso específico natural, obtidas em revisões bibliográficas referentes ao tema, a fim de determinar os parâmetros desejados para cada análise.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentado os resultados obtidos pelas análises paramétricas feitas em *software*.

### 4.1 DADOS BÁSICOS PARA ANÁLISE

Os parâmetros adotados nas análises apresentadas neste capítulo foram obtidos através de correlações empíricas apresentados a seguir.

#### 4.1.1 Peso específico do solo

O peso específico natural do solo ( $\gamma$ ) para todas as análises, foi adotado como sendo igual 16 kN/m<sup>3</sup>, valor este encontrado através de estudos prévios conduzidos pela universidade Unoesc e apresentados em artigo por Luvizão *et al.* (2019).

#### 4.1.2 Ângulo de atrito e Coesão do solo

O ângulo de atrito ( $\phi'$ ) e a coesão ( $c'$ ) do solo utilizados como base para o início das análises foram adotados como sendo  $\phi' = 32,9^\circ$  e  $c' = 11$  kPa, fundamentando-se nos valores apresentados por Luvizão *et al.* (2019), parâmetros característicos da região de Joaçaba-SC.

Os demais dados utilizados nas análises serão expostos e fundamentados nos itens exibidos na sequência.

### 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS MÉTODOS APLICADOS

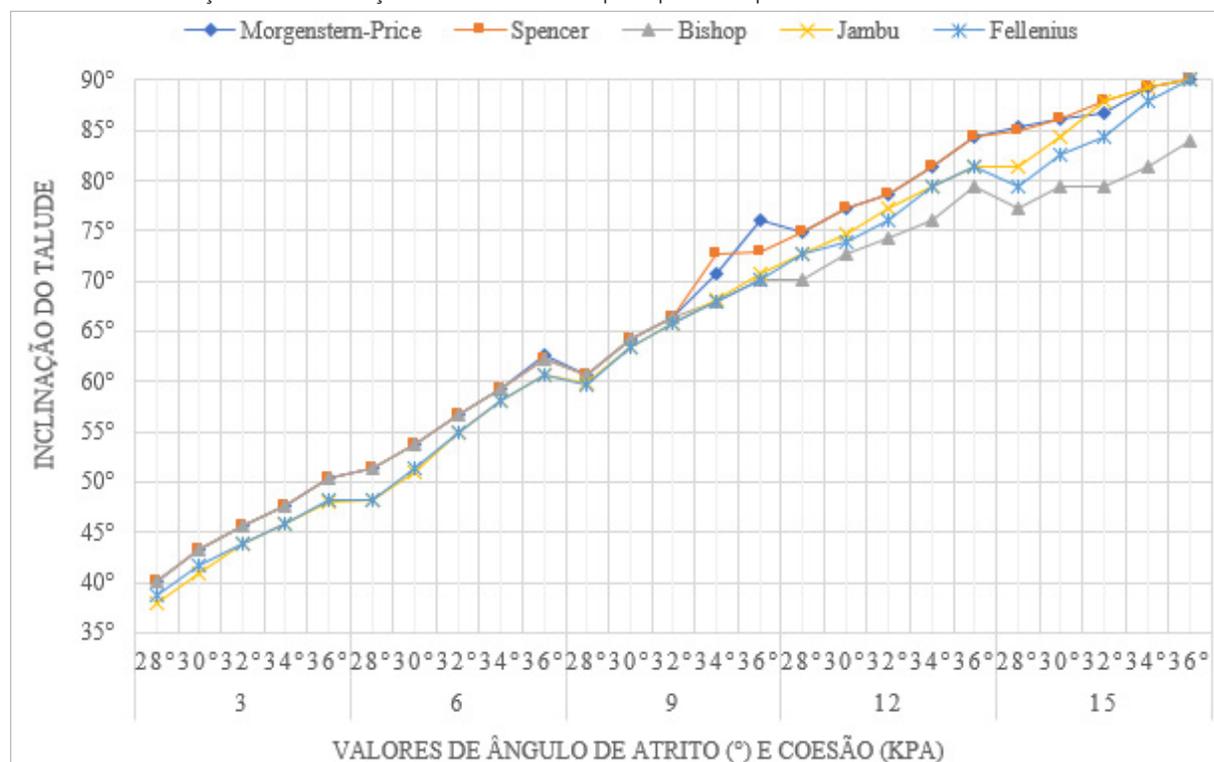
Para esta análise, a altura do talude foi fixada em 8 metros, dimensão máxima recomendada pelo DNIT (2015) para taludes sem berma. Saindo de uma premissa que os solos da região podem variar dependendo do local abordado, os valores de coesão e ângulo de atrito foram divididos em 5 possibilidades próximas aos parâmetros de  $\phi' = 32,9^\circ$  e  $c' = 11$  kPa. Deste modo, o ângulo de atrito variou de 28° a 36° acrescentando-se 2° em cada análise.

Para coesão, através de testes realizados anteriormente aos resultados encontrados, verificou-se que valores acima de 15 kPa demonstravam-se muito desconexos a uma situação real, por conta da extrema inclinação encontrada nos taludes nesses casos. Por este motivo, os valores de coesão variaram de 3 kPa a 15 kPa, acrescentando 3 kPa para cada avaliação.

Com o intuito de descobrir a inclinação máxima de cada método sem a adição de poropressão, o FS procurado deveria se aproximar ao máximo do valor de 1, significando a iminente ruptura do maciço. Compreendendo isso, as 25 possibilidades de parâmetros de

cisalhamento foram aplicadas nos métodos dos autores Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Jambu e Fellenius através do *software*, assim obtendo os seguintes resultados (Gráfico 1):

Gráfico 1 - Variação da inclinação do talude sem poropressão para FS=1



Fonte: os autores.

Diante dos resultados encontrados para esta análise, verifica-se uma dispersão de valores a partir de 65°, além de extrema semelhança nos valores entre Morgenstern-Price e Spencer, com suas curvas se sobrepondo em grande parte da extensão do gráfico. Outro fator importante de se abordar, é o fato de que apenas Bishop não apresentou um ângulo de 90° na última avaliação, este que por sua vez, foi o que demonstrou maior diferença entre os autores.

Deste modo, tira-se a conclusão de que o método mais econômico seria o de Morgenstern-Price acompanhado de perto por Spencer, por apresentar as maiores inclinações. Bishop por sua vez, seria o método mais dispendioso ou com maior coeficiente de segurança, por exibir as menores inclinações, acarretando um maior gasto com solo em uma hipotética terraplenagem.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DO TALUDE COM ADIÇÃO DE POROPRESSÃO

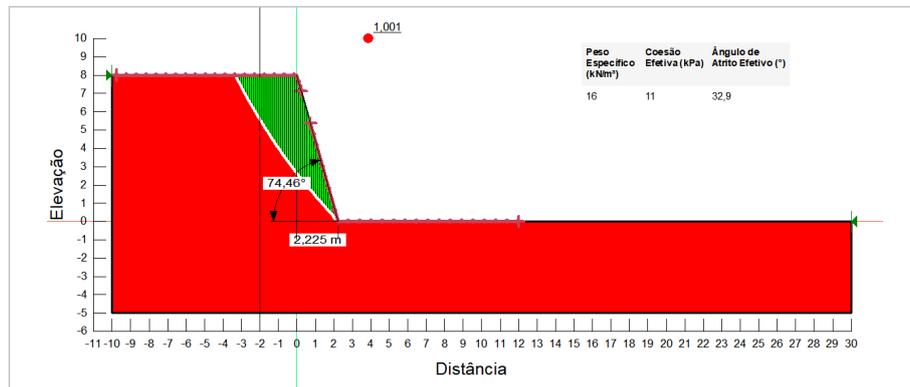
Nesta análise teve-se como objetivo, observar o comportamento de um talude com a adição progressiva de poropressão. Novamente a altura do maciço foi fixada em 8 metros.

Com o conhecimento da literatura e com a experiência da última comparação, o método mais conveniente para esta avaliação foi o de Morgenstern-Price. Além de fornecer valores mais detalhados para pequenas alterações em dados aplicados no *software*, o

método abrange uma maior variedade de situações em relação aos cálculos, por conta de cumprir melhor as condições de equilíbrio, tornando seus resultados mais precisos em confronto aos demais métodos.

Primordialmente, foi feita a simulação do talude sem a adição da poropressão para os parâmetros de cisalhamento base da pesquisa (Gráfico 2). Este tinha como objetivo verificar qual a inclinação máxima que poderia ser obtida com os valores aplicados.

Gráfico 2 - Análise de um talude sem a adição de poropressão

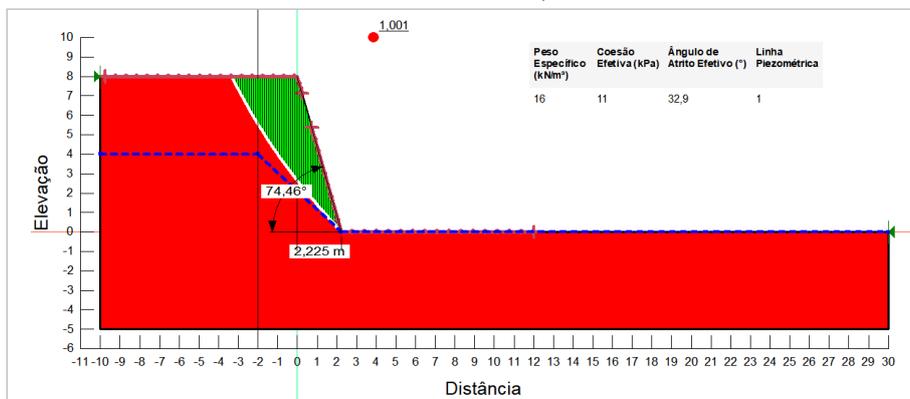


Fonte: os autores.

Realizado esta simulação, obteve-se um talude de 74,46° de inclinação. Posteriormente, foi adicionado progressivamente a linha piezométrica a cada 1m, esta tinha um declínio na elevação fixado a -2 metros ou 2 metros antes do início da inclinação do talude, que pode ser garantida através de drenos, formando uma diagonal continua até o pé do mesmo.

Alcançando os primeiros resultados, verificou-se que o FS só apresentava alteração a partir do momento que a linha piezométrica atingia a porção crítica do talude, deste modo valores inferiores a 4,25 metros não obtiveram mudanças em seu FS (Gráfico 3).

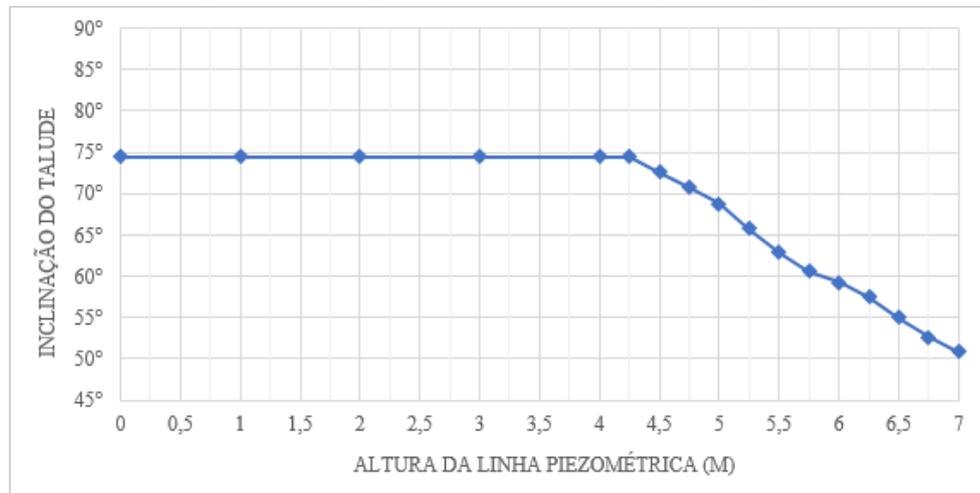
Gráfico 3 - Análise de um talude com a linha piezométrica em 4 metros



Fonte: os autores.

Baseado nestas observações, decidiu-se por variar a altura da linha piezométrica a cada 0,25 metros a partir do momento em que o FS fosse afetado. Dessa maneira, obteve-se as seguintes inclinações (Gráfico 4):

Gráfico 4 - Variação da inclinação do talude com Poropressão para FS = 1



Fonte: os autores.

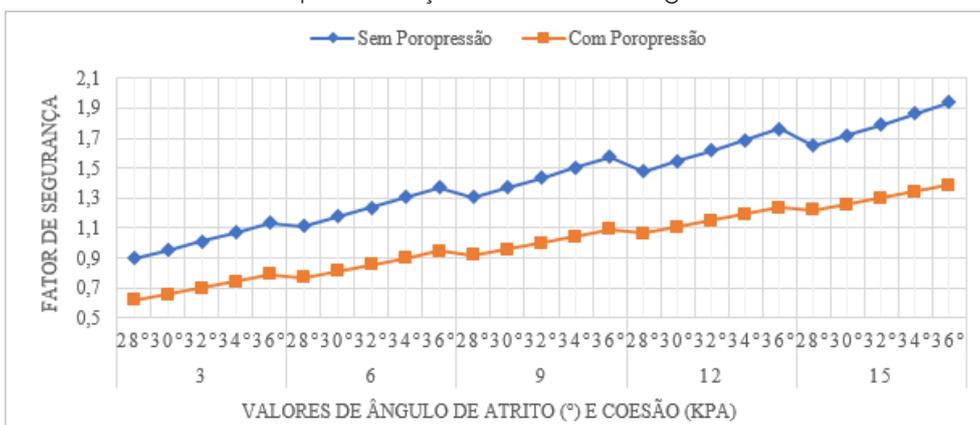
Perante o exposto, a inclinação deteve um comportamento praticamente retilíneo quando observado em gráfico, ou seja, a partir do momento em que a linha piezométrica atingiu a porção crítica do talude, seu ângulo decaiu próximo da uniformidade. A diferença na inclinação de um talude de 8 metros de altura sem a adição de poropressão, e com a adição dele nos 7 metros, ficou em 23,55° ou 46% menor.

#### 4.4 VALORES DE FS PARA VARIAÇÃO DE COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO

Para esta análise, a geometria do talude necessitava de uma padronização. Deste modo, a altura do maciço adotada foi de 8m e a inclinação de 45°. Esta inclinação teve como base o ângulo formado pelos taludes naturais da região do meio-oeste catarinense, onde na sua grande maioria se consolidam com esse aclave.

A variação de coesão e ângulo de atrito foi adotada com o mesmo conceito do item 4.2 deste artigo, assim como o método utilizado de Morgenstern-Price para o item 4.3.

Gráfico 5 - Valores de FS para variação de coesão e ângulo de atrito



Fonte: os autores.

Expostos os resultados, observa-se notoriamente a distinção de valores que a poropressão causa para o mesmo talude, aumentando a discrepância conforme a coesão e o ângulo de atrito progridem, partindo de uma diferença de 0,281 no FS do primeiro resultado para uma diferença de 0,556 no último.

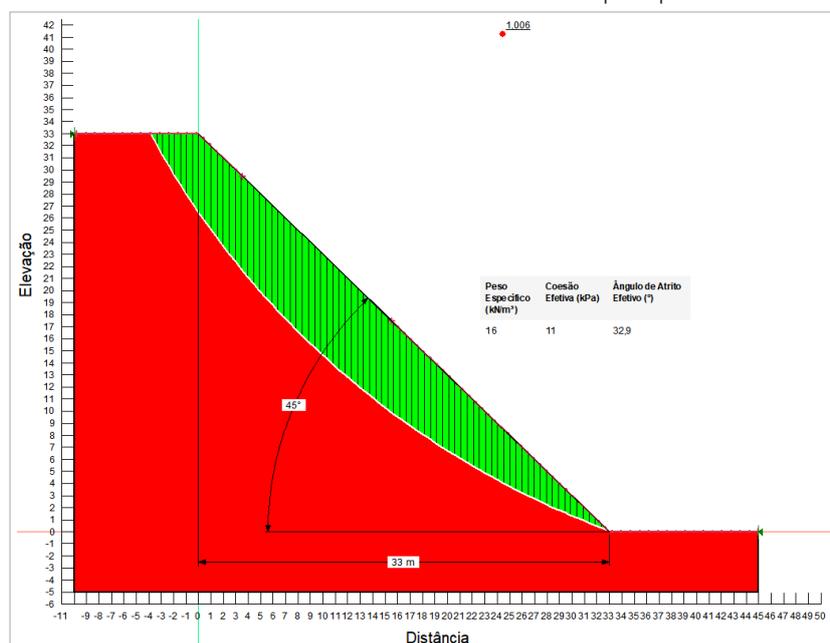
Assim como era de se esperar, com o aumento dos parâmetros de cisalhamento também ocorre um aumento no fator de segurança, iniciando com valores de 0,897 e 0,616 para sem e com poropressão respectivamente, chegando a resultados de 1,942 e 1,386 nesta mesma ordem.

#### 4.5 ALTURA MÁXIMA PARA TALUDES DE 45°

Nesta análise apenas a altura do talude foi variável, os outros dados inseridos no *software* se basearam nas premissas já abordadas anteriormente. São elas: peso específico do solo - = 16 kN/m<sup>3</sup>, ângulo de atrito -  $\phi' = 32,9^\circ$ , coesão -  $c' = 11$  kPa e inclinação do talude a 45°.

Desta maneira, alcançou-se uma altura máxima de 33 metros com o FS crítico de 1, sem a incorporação de poropressão no talude (Gráfico 6).

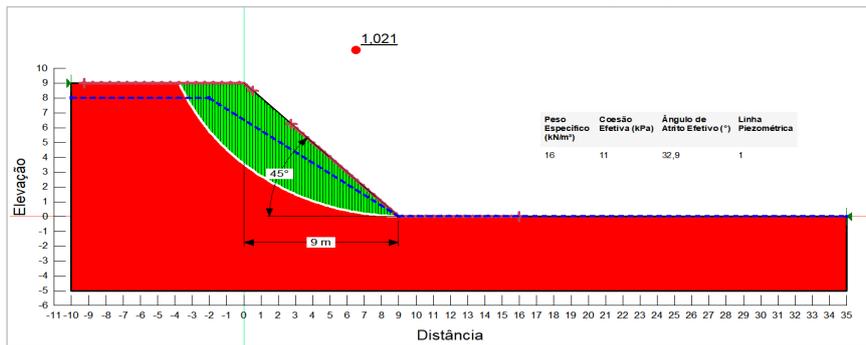
Gráfico 6 - Altura máxima de um talude a 45° sem poropressão



Fonte: os autores.

Do mesmo modo, foi feita uma análise com a adição de poropressão no talude com o intuito de comparação entre os dois resultados. A linha piezométrica foi alocada 1 metro abaixo da face superior do maciço, com um declínio começando a -2 metros, garantidos através de drenos, assim como executado na análise do item 4.3. A partir disto, alcançou-se uma altura de 9 metros com o FS crítico próximo a 1 (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Altura máxima de um talude a 45° com poropressão



Fonte: os autores.

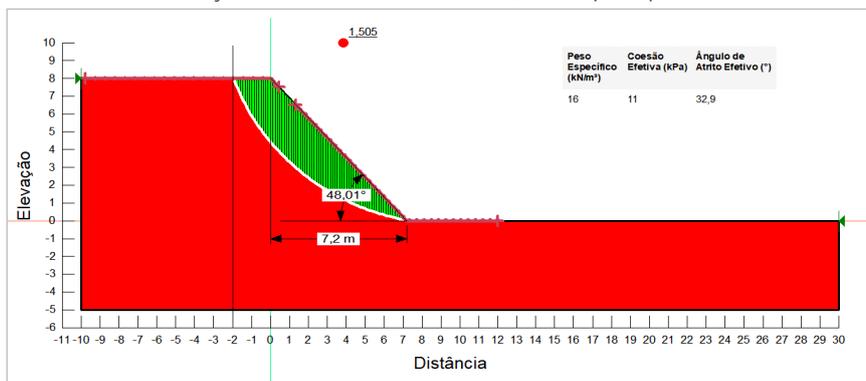
Expressos os resultados, nota-se a imensa diferença de altura alcançada pelas duas pesquisas, sendo a primeira mais que 3 vezes maior que a segunda, mostrando a grande influência da água no dimensionamento dos taludes.

#### 4.6 INCLINAÇÃO PARA FATOR DE SEGURANÇA DE NORMA

Assim como visto na tabela 4 do item 2.3.1 deste artigo, a NBR 11682 (ABNT, 2019) estabelece que para casos de risco alto de danos ambientais, materiais e risco de vida, o fator de segurança precisa ser de no mínimo 1,5. Indo de acordo com a norma, foi feita a análise de 4 situações e comparadas entre elas para fins de expor a influência do FS no dimensionamento de taludes.

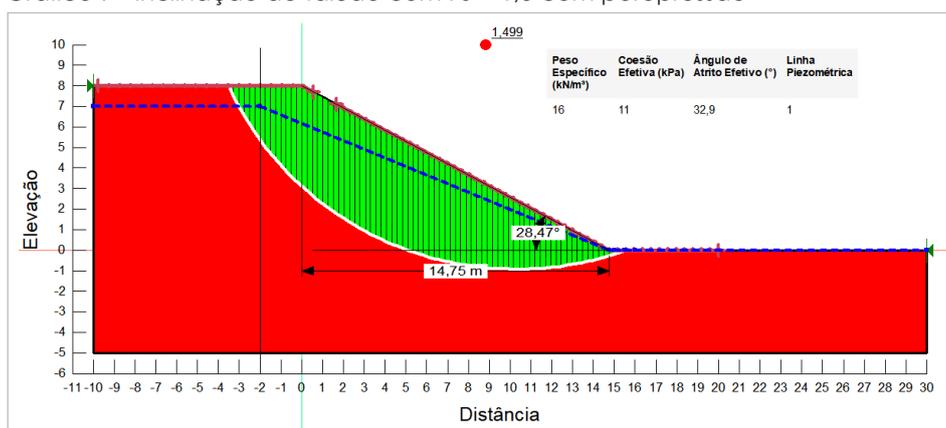
Os parâmetros inseridos no *software* foram os mesmos que no item 4.5, apenas havendo alteração na altura do talude, esta que por sinal foi adotada como sendo 8 metros, pelos mesmos motivos das análises anteriores. No primeiro momento, foram feitas as pesquisas para FS = 1, alcançando valores de inclinação iguais a 74,46° para solos sem poropressão e 50,91° para solos com poropressão. Encontrado estas informações, iniciou-se a análise dos mesmos parâmetros para FS = 1,5. Deste modo, obtiveram-se valores de 48,01° para solos sem poropressão (Gráfico 8) e 28,47° para solos com poropressão (Gráfico 9).

Gráfico 8 - Inclinação do talude com FS = 1,5 sem poropressão



Fonte: os autores.

Gráfico 9 - Inclinação do talude com FS = 1,5 com poropressão



Fonte: os autores.

Como esperado, a inclinação dos taludes diminuiu consideravelmente. Para os taludes sem poropressão a inclinação reduziu cerca de 26,45°, do mesmo modo, para os maciços com poropressão a inclinação reduziu cerca de 20,44°, ou seja, trazendo estes valores para uma situação de campo e utilizando como base a altura de 8 metros, um hipotético comprimento de talude de 10 metros e as inclinações encontradas, a movimentação de solo que iria ocorrer seria 224% maior para um talude sem poropressão e 127% maior para um talude com poropressão.

## 5 CONCLUSÃO

Através de uma pesquisa bibliográfica, é prontamente verificável uma ligação direta entre ruptura de taludes com um aumento na perda de vidas, dito isso, o correto dimensionamento de aterros e cortes executados em rodovias é de suma importância, assim como uma verificação em encostas naturais onde se encontra ocupações de civis, com o objetivo de comunicá-los dos perigos que estão se expondo, em situações que a realização de uma obra de contenção é necessária.

Para uma análise de taludes ser feita da forma mais correta possível, todos os parâmetros que serão utilizados devem ser estudados e comparados com extrema cautela e atenção. A utilização de métodos sem o devido estudo prévio, não trará uma verificação de fatores como economia, segurança e por muitas vezes velocidade de execução, deixando o projetista exposto a situações que poderiam ser evitadas. Desta maneira, a comparação entre métodos de aplicação para taludes não só informa com valores como também através da escrita, qual é a melhor escolha para cada caso. Para as análises feitas no presente trabalho, optou-se no uso de Morgenstern-Price, visto todas as qualidades descobertas com os confrontamentos realizados.

Através das análises paramétricas feitas, juntamente da verificação dos resultados obtidos, percebe-se o grande impacto que pequenas adições de valores podem desenvolver em uma encosta.

A adição de poropressão em um talude desenvolveu uma significativa diminuição na inclinação dos maciços em virtude da passagem deste elemento em fatias críticas no caso estudado. Pode-se observar, um declínio de  $23,55^\circ$  no ângulo encontrado, um valor consideravelmente alto, sendo imprescindível a consideração de uma suposta poropressão nos cálculos de talude.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) foram necessários durante toda investigação dos resultados, tornando explícita a necessidade de uma determinação mais acurada destes dados para uma correta análise. Como observado nas verificações, o aumento nos valores destes parâmetros influenciou diretamente nos taludes estudados, ampliando sua capacidade de se autossustentar, aumentando o ângulo necessário para uma iminente ruptura.

A altura máxima de um talude vem de encontro a já comentada segurança nas encostas naturais, que em sua grande maioria encontra-se próxima a  $45^\circ$  de inclinação na região do meio oeste catarinense. Foi verificado que, em casos em que a poropressão não se aplica, a sua elevação pode alcançar 33 metros antes de uma iminente ruptura. Todavia, o acréscimo desta indispensável variável faz com que essa altura diminua para 9 metros, demonstrando a grande influência da água nos taludes.

A leitura de normas e artigos é indispensável para o emparelhamento de economia e segurança. Sem este fato, não seria possível a análise da diferença de volumes entre um talude com iminente ruptura e outro com suas dimensões de acordo com a norma, obtendo valores até 224% maiores na iminência de garantir sua estabilidade e segurança.

Contudo, fica explícita a necessidade de ensaios de campo para aferição dos reais parâmetros, além de uma pesquisa aprofundada para cada item comentado anteriormente, sendo de extrema utilidade o uso dos *softwares* a fim de elevar a eficácia e a produtividade. Promovendo uma atenuação de possíveis erros humanos, facilitando a conclusão de tarefas, a organização dos procedimentos e o controle de atividades.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 11682 — Solo — Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2019.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed., rev. ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DELL'AVANZI, Eduardo; SAYÃO, Alberto S. F. J. Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes. *In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG*, volume I, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – **ISF-211: Projeto de terraplenagem**. 1ª Edição. Rio de Janeiro, 2015.

FONSECA, Andrés. C.F. **Riscos associados à instabilidade de Taludes**. Proposta de metodologia de abordagem a partir da análise comparada de diversos PDMs. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2014, Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/75463>. Acesso em: 20 abr. 2022.

FRITSCHER, Ester Cristina. **Análise de estabilidade de talude**: estudo de caso no município de Teutônia/RS. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/1410>. Acesso em: 03 maio 2022.

GEOSLOPE INTERNATIONAL LTD. Descrição do site. Disponível em: <https://www.geoslope.com/products/slopew/features>. Acesso em: 03 maio 2022.

GERSCOVICH, Denise. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2012. Notas de Aulas - Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

LUVIZÃO, Gislaine. *et al.* **Mapeamento Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Tigre Localizada no Município de Joaçaba/SC**. Joinville: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 2019. Disponível em: <https://conferencias.ufsc.br/index.php/geosul2019/2019geosul/paper/view/344/439>. Acesso em: 03 maio 2022.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVA, João Paulo Moreira da. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.

TAVARES, Gustavo dos Santos. **Análise da estabilidade de taludes da voçoroca do Parque Cesamar, Palmas – TO**. 55 f. Monografia (Graduação) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11612/2161>. Acesso em: 03 maio 2022.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes**: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense. 2009. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.