



ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTA NATURAL A PARTIR DO MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE

Felipe Dalazuana Ososki
José Henrique Ferronato Preto

Resumo

Garantir a segurança de um talude é essencial para evitar desastres, principalmente quando localizados na beira de rodovias ou locais com construções habitadas. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise de estabilidade de um talude natural situado no estado de São Paulo utilizando o método de equilíbrio limite, a fim de verificar qual o nível de segurança em que o mesmo se encontra. Para realizar esta análise foi utilizado o pacote SLOPE/W, do software Geostudio (2018), que permite serem determinados os fatores de segurança (FS) através dos métodos de equilíbrio limite a partir da definição da seção de análise do talude e dos parâmetros dos solos. Por fim, o valor do FS obtido foi avaliado segundo o que preconiza a norma ABNT NBR 11682 (2009) e definiu-se que o talude está com níveis de segurança acima dos limites estabelecidos pela norma, portanto, em segurança.

Palavras-chave: Encostas naturais; Análise de estabilidade; Fator de segurança.

Abstract

Ensure the safety of a slope is essential to avoid disasters, especially when located at the edge of highways or buildings inhabited places. In this sense, this work has as its main objective to conduct a stability analysis of a natural slope located in the State of Sao Paulo using the limit equilibrium method, in order to verify the level of security in that it is. To perform this analysis was used the SLOPE/W package, Geostudio software (2018), which allows you to be certain the safety factors (FS) limit equilibrium methods from the definition of slope and analysis section of the parameters of the soils. Finally, the value of the FS obtained was evaluated according to advocates the standard ABNT NBR 11682 (2009) and defined that the slope is with security levels above the limits set by the standard, being in safety.

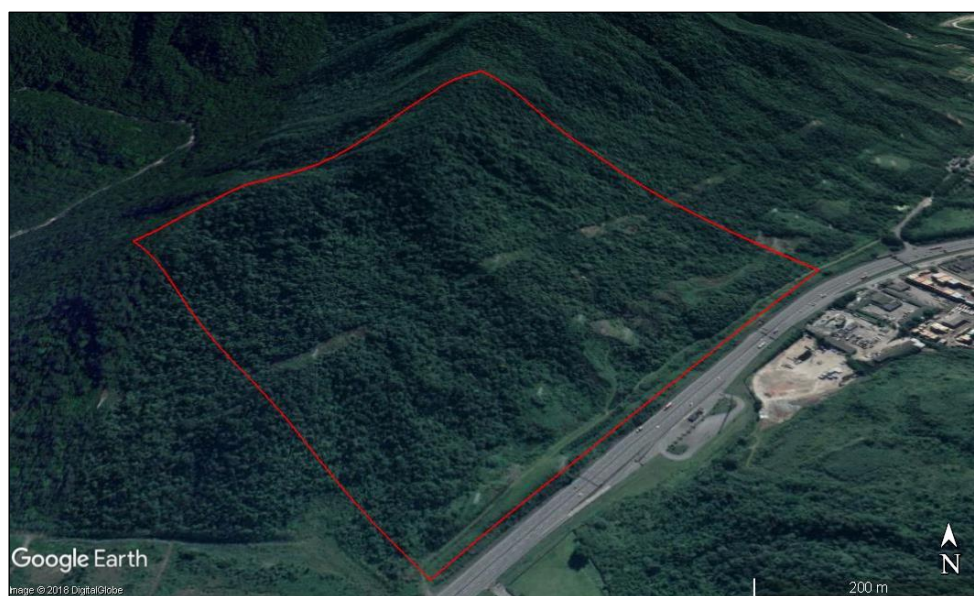
Keywords: Natural slopes; Stability analysis; Security factor.

INTRODUÇÃO

A análise e o estudo da estabilidade do solo são de suma importância para a criação e desenvolvimento de projetos em quase todas as áreas da engenharia. Com base no método de Equilíbrio Limite, este artigo apresenta um estudo de caso e análise de estabilidade de um talude natural localizado na cidade de Cubatão/SP a fim de serem determinados os fatores de segurança (FS) e avaliado se os mesmos estão dentro do que preconiza a norma ABNT NBR 11682 (2009). A

Figura 1 apresenta um mapa extraído do Google Earth (2018) do talude natural analisado.

Figura 1 Talude natural analisado



Fonte: Google Earth, 2018.

O talude analisado está localizado no contexto geológico da Serra do Mar, a qual é definida por um sistema de montanhas com mais de 1000 km de extensão e que abrange desde o Estado do Rio de Janeiro até o litoral norte do Estado de Santa Catarina (ALMEIDA & CARNEIRO, 1998). Devido a sua formação, as regiões da Serra do Mar tem um grande histórico de rupturas, como os casos citados por Tonus (2009) na BR-376, onde ocorreu uma movimentação de massas em 1995 devido a escavações na base do talude e

em 1997, devido a fortes chuvas no local que desencadearam diversas rupturas e gerando trincas pela encosta. Outros casos que podemos observar são os que Bertuol *et al.* (2017) cita em sua pesquisa, também na BR-376 onde em 2008 teve 37 pontos de ruptura e em 2011 mais algumas rupturas que chegaram a interditar o tráfego na rodovia.

REVISÃO DE LITERATURA

A seguir, serão apresentados os diversos métodos de análise de estabilidade pelo método de equilíbrio limite utilizado nas análises do talude natural, bem como os parâmetros necessários para a realização das análises.

O método do equilíbrio limite de Fellenius (1936) foi o primeiro método apresentado na literatura de equilíbrio limite. Sendo o mais simplificado, divide o talude em fatias, mas utilizando somente as forças atuantes na própria fatia, onde o peso da lamela é calculado paralelo e perpendicular à base e o fator de segurança (FS) é a resistência ao cisalhamento total na superfície de deslizamento pela força gravitacional atuante. Desconhecendo a linha de ruptura, calcula-se a resistência do talude em vários pontos formando diferentes superfícies de ruptura, a fim de determinar o menor fator possível. Fellenius leva em conta que as forças entre as fatias são iguais, normalmente utilizados em superfícies mais planas (GUIDICINE & NIEBLE, 1984; GEO-SLOPE, 2012).

Bishop (1950) desenvolveu um método que utiliza a força normal entre as fatias, mas ignora a de cisalhamento, elaborando uma equação para a força normal na base da fatia, transformando-a em uma função com o fator de segurança dos dois lados, sendo então necessário adotar um FS inicial e realizar iterações para chegar a um FS final. O método de Janbu (1954) é similar ao de Bishop, porém utiliza todos os equilíbrios de forças horizontais ignorando todos os equilíbrios de momentos (GEO-SLOPE, 2012).

Já o método de Spencer (1967) tem duas equações diferentes para o FS, uma utilizando o equilíbrio dos momentos e outra com o equilíbrio das forças horizontais utilizando iterações até os dois FS se igualarem. O método

de Morgenstern-Price (1965), parecido com o de Spencer, opera todas as equações de equilíbrio e, dissemelhante dos outros métodos, pode assumir diferentes superfícies de ruptura (circular, não circular ou composta), onde se adota uma função para a superfície de ruptura. Se a função adotada for uma constante, o método se assemelha ao de Spencer e, se for igual a zero, o método se assemelha ao de Bishop (GERSCOVICH, 2012; GEO-SLOPE, 2012).

Para realizar os cálculos do FS pelo software é necessário ter o valor do intercepto coesivo, ângulo de atrito interno e peso específico natural do solo, dados obtidos a partir do ensaio triaxial adensado rápido (CIU) que, segundo Das & Sobhan (2014), consiste em aplicar uma pressão de fluido na amostra de solo dentro de uma câmara confinante (σ_3). Essa pressão, por sua vez, resulta no adensamento do corpo de prova ou redução do índice de vazios devido à expulsão da água da amostra. Após a etapa de adensamento, é realizada a etapa de cisalhamento onde são obtidas as tensões desviadoras ($\Delta\sigma_d$) e o excesso de poropressão gerado pelo cisalhamento (Δu_d).

Realizado o ensaio, chegamos às tensões σ_1 , σ_3 , Δu_d e $\Delta\sigma_d$. A tensão principal maior na ruptura total é dada pela Equação 1, a tensão principal maior na ruptura efetiva é dada pela Equação 2, a tensão principal menor na ruptura total é igual a σ_3 e a tensão principal menor na ruptura efetiva é dada pela Equação 3, sendo $(\Delta u_d)_f$ a poropressão no momento da ruptura.

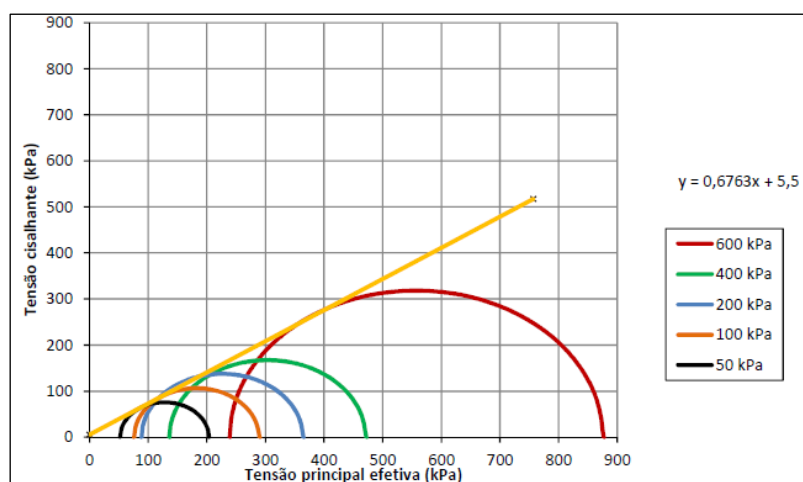
$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f \quad (1)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f \quad (2)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f \quad (3)$$

Montando graficamente os resultados no círculo de Mohr, define-se uma reta tangente aos círculos, conforme a Figura 2. Sendo o intercepto coesivo o valor do eixo Y que a reta tangente corta e o ângulo de atrito interno sendo o ângulo que a reta tangente forma com o eixo x.

Figura 2 – Resultado ensaio triaxial



Fonte: O autor, 2018.

Segundo a ABNT NBR 11682:2009, o fator de segurança é a razão da tensão de cisalhamento máximo que o solo resiste e a tensão de cisalhamento atuante no solo. O valor mínimo, segundo a norma, varia de 1,2 até 1,5, dependendo do nível de segurança almejado.

MATERIAL E MÉTODO

Para realização das análises de estabilidade do talude foi utilizado o pacote SLOPE/W, do software Geostudio (2018), o qual permite analisar o fator de segurança (FS) a partir de diversos métodos de equilíbrio limite, podendo ser citados: Fellenius; Morgenstern-Price; Janbu; Spencer e Bishop (GUIDICINE & NIEBLE, 1984; GEO-SLOPE, 2012; GERSCOVICH, 2016; DAS & SOBHAN, 2014).

O software permite a definição do perfil e a divisão de cada camada de solo obtida a partir de ensaios de campo. Neste estudo de caso foram realizados dois ensaios simples de reconhecimento (SPT) para definição do perfil geológico-geotécnico e determinação do nível d'água. Após definidas cada uma das camadas de solo, são determinados os parâmetros físicos (peso específico natural) e mecânicos (resistência ao cisalhamento).

Para determinação dos pesos específicos naturais dos solos, foram realizados ensaios de massa específica pelo método do anel metálico. Já para a determinação dos parâmetros de resistência (intercepto coesivo e ângulo de

atrito interno), foram realizados ensaios triaxiais (CIU). Ambos no laboratório do Lactec. Os valores obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros físicos e mecânicos

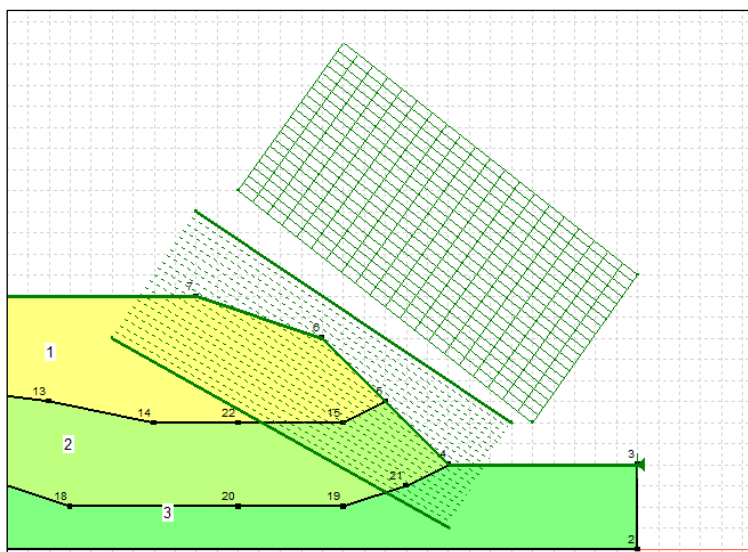
Solo	Peso específico natural (kN/m³)	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito interno (°)
Silte argiloso	18,97	5,5	35,0
Silte arenoso	18,03	0	35,6

Fonte: O autor, 2018.

Utilizando os dados obtidos nos ensaios de laboratório e definido o perfil a ser analisado pela topografia e pelas investigações de campo, o perfil foi analisado pelos diferentes métodos do equilíbrio limite comparando os resultados e verificando a segurança do talude.

Por definição da análise, optou-se pelo uso do método *Grid and Radius*, padrão do software. Este método possibilita a definição do local de análise aplicando uma “grade” sobre o talude onde pode ocorrer a ruptura e outra “grade” no provável centro do raio da ruptura, como podemos observar na Figura 3, onde a grade inferior tracejada é o local onde pode ocorrer a ruptura e a grade superior é a localização do raio de ruptura.

Figura 3 - Exemplo do método Grid and Radius



Fonte: O autor, 2018.

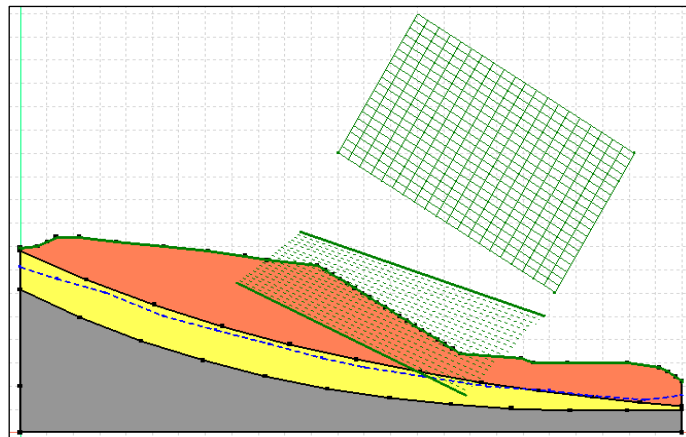
Por fim, compara-se o valor do FS obtido com o valor mínimo exigido pela ABNT NBR 11682:2009, sendo 1,2 para o talude analisado, que se encaixa na classificação de risco baixo nos critérios de Danos materiais e Danos ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o ensaio SPT, foram determinadas duas camadas de solo com importância para a análise, sendo a primeira silte argiloso e a segunda silte arenoso. Abaixo dessas camadas foi definido um material de maior resistência à penetração e a investigação de campo foi paralisada. Ainda pela investigação de campo, foi determinado o nível de água no topo e na base do talude, sendo 4 metros e 3 metros respectivamente.

No software Geostudio foi desenhado o perfil do talude definindo as regiões dos solos e nível de água e aplicando como condição de contorno a condição *bedrock* (padrão do software), que interpreta como impenetrável ou rocha sã. Por último foram definidas as regiões do *Grid and Radius* e o modelo ficou estabelecido conforme é apresentado na Figura 4.

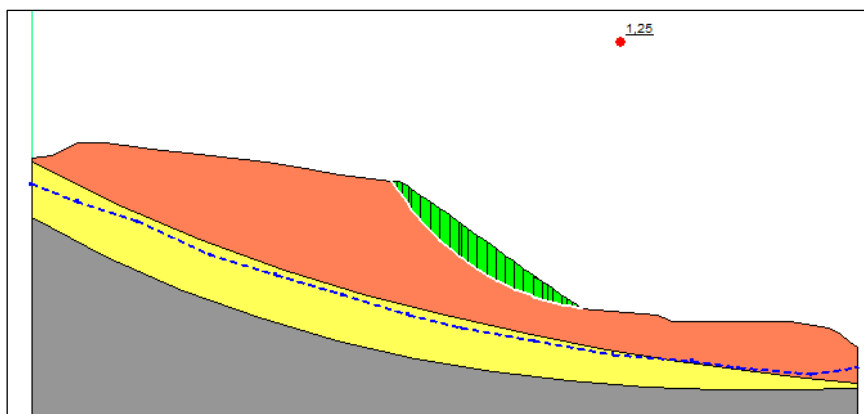
Figura 4 - Definição do Grid and Radius para análise



Fonte: O autor, 2018.

Na Figura 5 é apresentado o resultado em que foi obtido o menor FS, e na abela 2 são apresentados todos os valores de FS obtidos para os diferentes métodos.

Figura 5 – FS pelo método de Janbu



Fonte: O autor, 2018.

abela 2 – Valores do FS calculados

Método	Resultado FS
--------	--------------

Spencer	1,32
Bishop	1,32
Janbu	1,25
Fellenius	1,26
Morgenstern Price	1,32

Fonte: O autor, 2018.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os métodos de equilíbrio limite analisados para se estabelecer o FS, foi determinado o método de Morgenstern-Price, o qual considera mais esforços para realizar os cálculos e que permite calcular diversos tipos de superfícies de ruptura utilizando funções, sendo o mais próximo da realidade. Sendo assim, o FS do talude natural é de 1,32, acima do limite mínimo estipulado pela norma de 1,2 para taludes de risco baixo tanto a danos ambientais quando a danos materiais.

Para aprofundamento da análise e como próximo passo será realizar a análise do fluxo de água no talude, utilizando o pacote SEEP/W do software Geostudio (2018), que permite calcular o nível de água exato por toda a extensão do talude e o fluxo de água a fim de determinar se é necessário um projeto de drenagem para se manter o nível de segurança.

Referências

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques & CARNEIRO, Celso Dal Ré. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, volume 28, 2, 135-150, Junho, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, **NBR 11682: Estabilidade de encostas**. Comitê Brasileiro de Construção Civil.

BERTUOL, Fábio; BRESSANI, Luiz Antonio; MEZZOMO, Samuel Maggioni & HASENACK, Heinrich. Mapeamento Geotécnico de Suscetibilidade de deslizamentos de taludes e encostas: Estudo de caso BR 376 – Paraná. **Anais do VII conferência brasileira sobre estabilidade de encostas**, Florianópolis, 2017.

DAS, Braja M., & SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de Engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

GERSCOVICH, Denise M S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GEO-SLOPE, International. **Stability Modeling with SLOPE/W**. Calgary – Canada, 2012.

GUIDICINE, Guido & NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de Taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Blucher, 1983.

TONUS, Bianca Penteadó de Almeida. **Estabilidade de taludes**: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar paranaense. 2009. Dissertação – Geotecnia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.