

Análise de Estabilidade por Equilíbrio Limite em um Talude na Região Metropolitana do Recife

Antonio Fernandes Guedes Costa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, Brasil,
guedes.engenharia@hotmail.com

Inaldo José Minervino da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, Brasil,
inaldo.jose@recife.ifpe.edu.br

RESUMO: O objetivo principal do estudo de caso foi calcular os fatores de segurança e verificar a real necessidade da execução de uma estrutura de contenção em um talude. O maciço localiza-se num empreendimento, na região metropolitana do Recife. Para isso, foram utilizados softwares para analisar o comportamento mecânico de diversas seções do talude natural, ou seja, desconsiderando o reforço já executado. Para a análise, primeiramente foram coletados os dados da geometria do talude natural, através de levantamentos topográficos e dos projetos do dimensionamento do reforço executado. Posteriormente, foi realizada a coleta das amostras de solo, para a obtenção dos parâmetros geotécnicos. Os parâmetros obtidos serviram de *inputs* aos softwares de análise de estabilidade de taludes. As formulações matemáticas utilizadas foram a de Fellenius e a de Bishop Simplificado, e os softwares utilizados foram o Slope/w da Geostudio, o Macstars 2000 da Maccaferri e o Microsoft Office Excel da Microsoft. Com os fatores de segurança obtidos, foi concluído que o talude natural, de acordo com a NBR 11682, já era um maciço com o grau de segurança alto, antes da execução da obra de contenção, pois todas as seções analisadas apresentaram fatores de segurança bem maiores que 1,5. Antes da execução da obra de contenção no talude, já era almejada a construção de uma pequena estação elevatória de esgoto, na região acima do maciço. Isso foi um dos fatores que influenciou na execução do reforço, no entanto para uma das seções, foi simulada uma carga distribuída de 525 KPa e o talude continuou com um alto grau de segurança, pois a seção apresentou o $FS_{mín}$ de 1,501. Este trabalho vem colaborar, portanto, para que as análises computacionais sejam sempre realizadas, pois os softwares são instrumentos de fundamental importância se utilizados adequadamente, podendo assim, assistir o projetista numa melhor decisão técnico-econômica. Para este talude, bastaria por exemplo, revesti-lo com uma gramínea para a estabilização de erosões, prescindindo assim, de um muro de arrimo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Equilíbrio limite, Fator de segurança, Softwares.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de caso foi realizado em um talude, situado na região metropolitana do Recife, no qual foi executada uma estrutura de contenção, composta por geogrelhas, associadas aos elementos de face pré-moldados, como mostrado na figura 1.



Figura 1. Estrutura de contenção em execução.

Para essa estrutura, não foram realizados os estudos computacionais prévios, os quais possibilitariam ao projetista uma maior precisão no estudo de viabilidade técnico-econômica do projeto.

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a real necessidade da estrutura de contenção, que foi executada no talude do empreendimento. O talude tem 71,20 m de comprimento e seções que variam entre 8 e 9 m de altura.

O estudo do talude, foi baseado em parâmetros laboratoriais, obtidos através de ensaios realizados no laboratório de geotecnia da Universidade Federal de Pernambuco.

2 METODOLOGIA

2.1 Obtenção dos parâmetros

O primeiro passo foi levantar as características geométricas do talude, esse levantamento foi realizado topograficamente, antes da realização do reforço.

O segundo passo pode ser observado na figura 2, que evidencia a coleta de amostras do solo do talude. A coleta foi realizada em dois pontos, um próximo à crista do talude e outro, próximo à base, almejando a análise computacional das camadas superior e inferior do talude.



Figura 2. Coleta das amostras para a realização dos ensaios.

Com essas amostras, foram realizados os ensaios de caracterização e de cisalhamento direto. Após realização dos ensaios foram executados os cálculos para obtenção da caracterização e dos parâmetros de resistência dos solos.

2.2 Formulações matemáticas

As formulações matemáticas utilizadas foram os métodos de Fellenius (Equação 1) e o de Bishop Simplificado (Equação 2).

De acordo com essas formulações, para calcular os fatores de segurança das seções de um talude, considera-se a superfície de ruptura, aproximadamente circular e que a massa de solo instável fragmenta-se em lamelas, como mostra a figura 3.

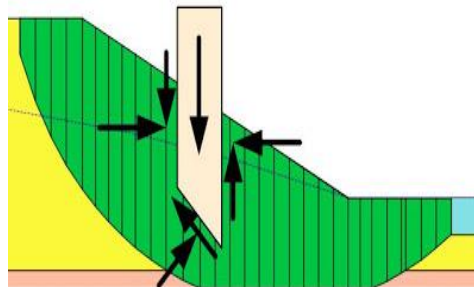


Figura 3. Superfície sueca de ruptura de taludes.

Segundo Massad (2010), a formulação de Fellenius pode ser definida como:

$$F = \frac{\sum [c' \cdot l + (P \cdot \cos \theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec \theta) \cdot \tan \phi']}{\sum (P \cdot \sin \theta)} \quad (1)$$

Onde: F = fator de segurança; c' = coesão; l = largura da base da lamela; P = Peso específico da lamela; θ = inclinação da base da lamela; ϕ' = ângulo de atrito interno do solo e u = poro pressão. Já a formulação de Bishop simplificado pode ser descrita como:

$$F_{i+1} = \frac{\sum \left[c' \cdot l + \frac{P - u \cdot \Delta x - c' \cdot \Delta x \cdot \tan \theta / F_i}{\cos \theta + \tan \phi' \cdot \sin \theta / F_i} \cdot \tan \phi' \right]}{\sum (P \cdot \sin \theta)} \quad (2)$$

Onde: F_i = fator de segurança inicial da iteração; F_{i+1} = fator de segurança final da iteração; c' = coesão; l = largura da base da lamela; P = Peso específico da lamela; θ = inclinação da base da lamela; ϕ' = ângulo de atrito interno do solo e u = poro pressão.

2.3 Aplicação computacional

A aplicação computacional necessita, previamente, que as seções sejam desenhadas no software Autocad, da empresa Autodesk, para que se obtenham as coordenadas da geometria do talude.

Após a obtenção dos parâmetros de resistência, das geometrias das camadas e coordenadas, utilizou-se o software Slope/w da empresa Geostudio.

Posteriormente, aplicou-se os mesmos *inputs* no software Microsoft excel e também, acrescentou-se a mesma superfície de ruptura determinada pelo Slope/w.

Para que houvesse uma aproximação considerável entre o resultados dos fatores de segurança, obtidos no Slope/w e no Excel, as superfícies de ruptura, das seções analisadas, foram divididas em vinte lamelas (número de lamelas configurado no Slope/w). Essas lamelas tiveram suas bases e alturas médias cotadas, para serem inseridas nas planilhas.

Essa aplicação teve a finalidade de verificar a estabilidade das seções originais do talude.

O talude foi dividido em seis seções, e cada seção foi analisada tanto pelo método de Fellenius quanto pelo de Bishop Simplificado.

A aplicação computacional foi prosseguida com a aplicação de uma carga distribuída em uma das seções do talude, para verificação do fator de segurança mínimo. Para a inserção da carga distribuída foi utilizado o software Macstar 2000.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios de caracterização

A preparação das amostras e a determinação do teor de umidade para os ensaios de caracterização foi feita de acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 6457. Os resultados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Teor de umidade das amostras do talude

Localização do solo	Umidade média (%)
Camada superior	3,18
Camada inferior	6,38

A determinação da massa específica dos grãos foi feita seguindo os critérios da NBR 6508 e pode-se observar os resultados obtidos na Tabela 2.

Tabela 2. Massa específica dos grãos para as duas camadas do talude.

Localização do solo	Massa específica (g/cm ³)
Camada superior do talude	2,642
Camada inferior do talude	2,621

A determinação dos limites de consistência seguiu as diretrizes das NBRs 6459 e 7180 e pode-se observar os resultados obtidos na Tabela 3.

Tabela 3. Limites de consistência das camadas.

Camadas	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
Camada superior	45,72	30,20	15,52
Camada inferior	51,01	28,21	22,80

A obtenção da curva granulométrica obedeceu aos critérios da NBR 7181. As curvas granulométricas são evidenciadas nas figuras 4 e 5, assim como os percentuais granulométricos descritos nas tabelas 4 e 5.

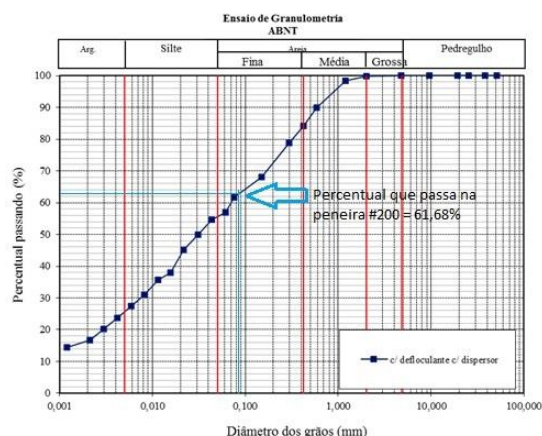


Figura 4. Curva granulométrica da camada superior do talude.

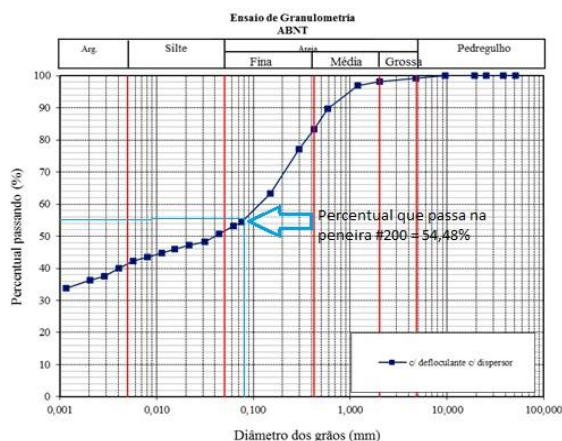


Figura 5. Curva granulométrica da camada inferior do talude.

Tabela 4. Frações granulométricas da camada superior.

Materiais da camada superior do talude	Percentual granulométrico referente (%)
Pregulho	0,0
Areia grossa	0,22
Areia média	15,68
Areia fina	29,55
Silte	27,19
Argila	27,35

Tabela 5. Frações granulométricas da camada inferior.

Materiais da camada superior do talude	Percentual granulométrico referente (%)
Pregulho	0,88
Areia grossa	0,99
Areia média	14,75
Areia fina	32,62
Silte	8,43
Argila	42,33

Utilizando o USCS (*Unified Soil Classification System*), que é o Sistema de classificação unificada dos solos, que obedece aos critérios da ASTM D2487-11, identificou-se que as duas camadas do talude são formadas por solos finos, pois os percentuais que passam na peneira #200 (0,075mm) são maiores que 50%. A camada superior é formada por um silte areno-argiloso e a camada inferior é formada por uma argila arenosa pouco siltosa.

3.2 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto obedeceu aos critérios da ASTM D3080-98, e permitiu a determinação de parâmetros como coesão e ângulo de atrito interno, que são estritamente

necessários para a análise da estabilidade de um maciço de solo.

As amostras foram coletadas através de cravação *in loco*, como mostrado na figura 6, e, logo após a coleta, as mesmas foram envolvidas em papel filme, como podemos ver na figura 7. Todo esse procedimento foi realizado para que as características naturais de umidade e resistência do solo fossem mantidas. No total, foram coletadas 8 amostras, quatro de cada ponto do talude.



Figura 6. Escavação para obtenção de amostragem indeformada.



Figura 7. Amostras envolvidas em papel filme.

O ensaio consiste basicamente na aplicação de uma força vertical N e uma força tangencial T até que se provoque o rompimento do corpo de prova.

Após realizadas as leituras das forças de rompimento, calcula-se as tensões de ruptura, através do quociente da força aplicada no instante do rompimento pela área da seção transversal do corpo de prova.

As tensões iniciais foram 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 Kg/cm^2 , ou seja, para cada camada do talude utilizou-se 4 tensões iniciais diferentes.

Durante o ensaio com as amostras da camada superior do talude, um dos corpos de prova não rompeu com a tensão inicial de 2,0 Kg/cm^2 , o que gerou um gráfico da reta de ruptura com um

ponto a menos em relação a camada inferior. É possível observar esse detalhe, comparando as figuras 8 e 9.

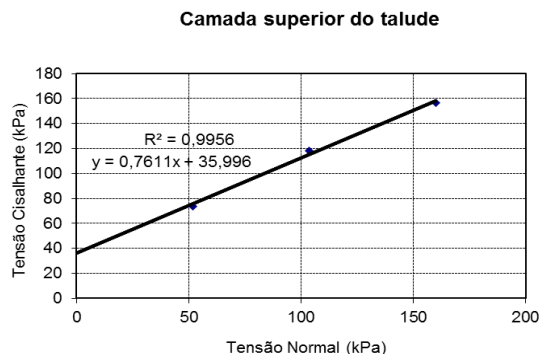


Figura 8. Reta limite para ruptura da camada superior.

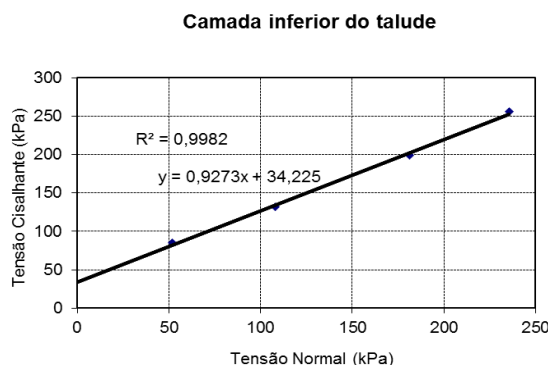


Figura 9. Reta limite para ruptura da camada inferior.

As tensões de ruptura e os parâmetros de resistência dos solos em estudo são apresentados nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Tensões de ruptura das camadas do talude.

Camada superior		Camada inferior	
Tensão Normal (KPa)	Tensão Cisalhante (KPa)	Tensão Normal (KPa)	Tensão Cisalhante (KPa)
0		0	
51,89	73,83	51,91	84,96
103,58	118	108,09	132,02
160,03	156,27	181,14	199,16
		235,46	255,47

Tabela 7. Parâmetros de resistência das camadas.

Camada superior		Camada inferior	
Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)
36,00	36,93	34,22	43,22

3.3 Análises computacionais

As figuras 10 e 11 mostram a utilização do software Slope/w, onde, em cada seção do talude, foram realizadas duas aplicações para a determinação dos fatores de segurança. Uma das aplicações usou o método de Fellenius e a outra usou o método e Bishop Simplificado.

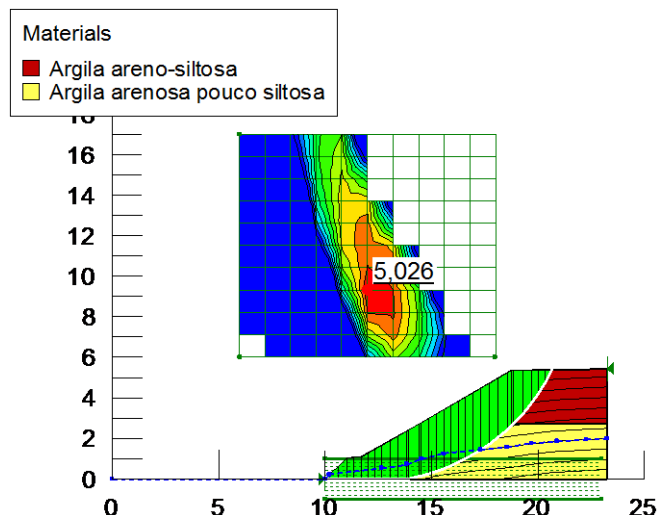


Figura 10. Simulação da seção 01 - Fellenius.

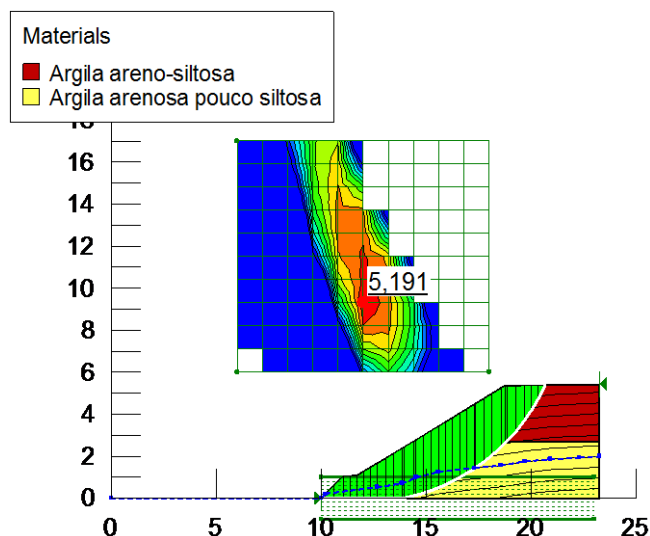


Figura 11. Simulação da seção 01 - Bishop simplificado.

O Slope/w foi utilizado não somente na seção 1, mas também nas seções 2, 3, 4, 5 e 6.

Como dito anteriormente, as simulações foram feitas também, em planilhas com as mesmas formulações matemáticas.

Para a facilidade da análise, todos os fatores de segurança obtidos, foram resumidos na tabela 8.

Tabela 8. Fatores de segurança mínimos obtidos.

Seção	Modelo Matemático	Slope/w	Planilha Excel
01	Fellenius	5,026	5,0559
	Bishop s.	5,191	5,4883
02	Fellenius	4,577	4,7017
	Bishop s.	4,835	5,1016
03	Fellenius	4,707	4,6211
	Bishop s.	4,887	4,8718
04	Fellenius	4,614	4,5263
	Bishop s.	4,818	4,8278
05	Fellenius	4,703	4,5723
	Bishop s.	4,903	4,8766
06	Fellenius	4,962	4,9252
	Bishop s.	5,206	5,3722

Com os fatores de segurança obtidos, identificou-se que o talude original, de acordo com a NBR 11682, já era uma estrutura com o grau de segurança alto, antes mesmo da execução da obra de contenção, pois todas as seções analisadas apresentaram fatores de segurança bem maiores que 1,5.

Antes da execução da obra de contenção no talude, já era almejada a construção de uma pequena estação elevatória de esgoto na região acima do maciço. Isso foi um dos fatores que influenciou na execução do reforço.

Entretanto, para a seção 04 do talude, foi simulada, através do software Macstar 2000, uma carga distribuída de 525 KPa e o talude continuou com um alto grau de segurança, pois apresentou o FS_{mín} de 1,501 como mostra na figura 12.

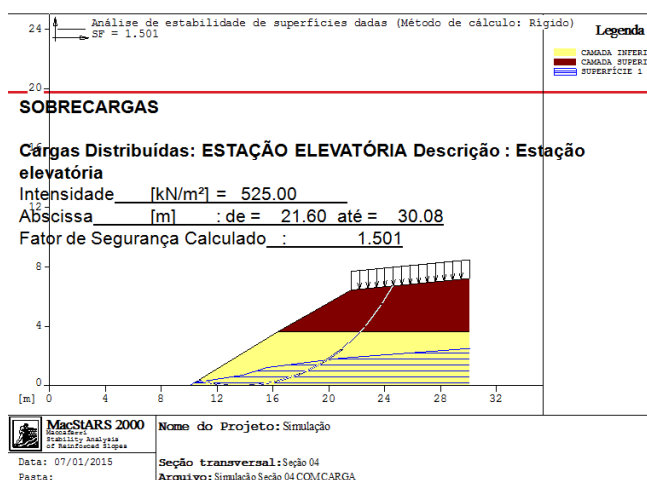


Figura 12. Simulação da seção 04 - Bishop simplificado.

O método de cálculo de Fellenius é mais conservador, pois não leva em consideração as reações entre as lamelas vizinhas. Esse detalhe

pode ser observado nos fatores de segurança obtidos pelo Slope/w e pela planilha.

Segundo Massad (2010), a análise dada pelo método de Fellenius às pressões neutras pode levar facilmente ao cálculo de estruturas de contenção superdimensionadas, principalmente, se o talude apresentar uma poro-pressão elevada.

Deduz-se, portanto, que, quanto maior for a poro-pressão, maior será a diferença entre o método de Fellenius e os métodos mais rigorosos.

4 CONCLUSÃO

Pela classificação unificada, as duas camadas do talude analisado, resultaram em uma argila e um silte. No entanto, as duas camadas apresentaram uma quantidade bastante considerável de areia, e isso justifica os elevados ângulos de atrito, obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

Com os resultados também é possível observar o conservadorismo do método de Fellenius. Esse método considera que as forças entre as lamelas são paralelas às bases e, além disso, o método ignora as forças resultantes das pressões neutras, que atuam nas faces entre as lamelas.

A diferença entre os valores dos fatores de segurança de Fellenius e Bishop tem o aumento diretamente proporcional à poro-pressão.

Todas as seções analisadas do talude original obtiveram fatores de segurança bem maiores que 1,5. Portanto, de acordo com a NBR 11682, a estrutura já era bastante estável, antes mesmo da execução das geogrelhas.

Na seção 04, foi simulada uma carga de 525 KPa, e o fator de segurança reduziu para 1,501, ou seja, aquela seção do talude ainda suportaria uma carga de 525 KPa com um alto grau de segurança.

O projeto de estabilização do talude, portanto, foi superdimensionado contra a ruptura. Para o mesmo, bastaria revesti-lo com uma gramínea para a estabilização de erosões, prescindindo assim, de um muro de arrimo.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Pensilvânia, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487 – 11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991.
- GEOSTUDIO Slope/w for Windows 8.1. Version 2012. Geostudio International Ltd, 2012. Disponível em: <<http://www.geo-slope.com>> Acesso em 03 de Janeiro de 2014.
- MACCAFERRI Macstars 2000 for Windows 8.1. Version 2015. Maccaferri do Brasil LTDA, 2000. Guia para elaboração de projetos. Disponível em: <<http://www.maccaferri.com.br>>. Acesso em 15 de janeiro de 2014.
- Massad, F. (2010) *Obras de Terra. Curso básico de geotecnia*. 6.ed., Oficina de textos, São Paulo, BRASIL, vol. Único.