



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO DOS SANTOS TAVARES

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES DA VOÇOROCA DO PARQUE
CESAMAR, PALMAS - TO**

**PALMAS - TO
2019**

GUSTAVO DOS SANTOS TAVARES

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES DA VOÇOROCA DO PARQUE
CESAMAR, PALMAS - TO**

Monografia apresentada à Universidade Federal do Tocantins - Campus Universitário de Palmas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza

**PALMAS - TO
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- T231a Tavares, Gustavo dos Santos.
ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES DA VOÇOROCA DO
PARQUE CESAMAR, PALMAS - TO. / Gustavo dos Santos Tavares. –
Palmas, TO, 2019.
52 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Civil, 2019.
Orientador: Marcus Vinicius Ribeiro e Souza

1. Estabilidade de Taludes. 2. Voçoroca. 3. Erosão. 4. Parque Cesamar. I.
Título

CDD 624

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

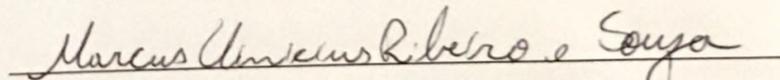
GUSTAVO DOS SANTOS TAVARES

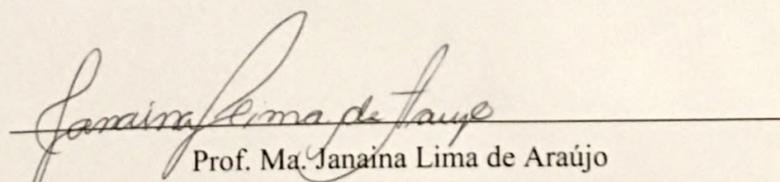
ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES DA VOÇOROCA DO
PARQUE CESAMAR, PALMAS – TO

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT –
Universidade Federal do Tocantins – Campus
Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Civil
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil e aprovada em sua forma final pelo Orientador e
pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 23 / 12 / 2019

Banca Examinadora


Prof. Dr. Marcus Vinicius Ribeiro e Souza
Orientador, UFT – Universidade Federal do Tocantins


Prof. M^a. Janaina Lima de Araujo
Examinadora, UFT – Universidade Federal do Tocantins

Bruno Carrilho de Castro
Prof. Dr. Bruno Carrilho de Castro
Examinador, UFT – Universidade Federal do Tocantins

Resumo

Os processos erosivos devem-se a fatores naturais aliados ao efeito do tempo, podendo também ser causados ou ter seu efeito agravado pela interferência humana. Esses processos podem acarretar deslizamento de maciços de solo, formando taludes que se não estabilizados podem inutilizar a área e trazer sérios riscos à segurança de obras de engenharia e da população, principalmente se inseridos em um cenário urbano. Tendo esse contexto como base, o trabalho realiza uma análise da estabilidade do talude da voçoroca do parque Cesamar, localizada em um dos afluentes do córrego Brejo Comprido por meio de simulações computacionais. As análises foram realizadas utilizando os métodos de avaliação de Fellenius, simplificado de Bishop e de Morgenstern - Price, baseados na teoria do equilíbrio limite. Para desenvolvimento da pesquisa foi realizada uma caracterização da área de estudo, na qual foram definidas a área de influência da voçoroca, além da configuração geométrica dos taludes, sendo determinados para esta pesquisa 30 perfis com alturas variando de 2 a 14 metros. A caracterização da estratigrafia do solo foi realizada por um levantamento visual para definição do começo e término das camadas, sendo observados basicamente dois tipos de solo. O solo superficial foi classificado como um silte-arenoso com coesão praticamente nula, enquanto o solo profundo se mostrou uma areia-argilosa com bastante coesão entre as partículas. Com os dados obtidos da caracterização da área de estudo e propriedades do solo, foi realizada a análise da estabilidade dos taludes, determinando os fatores de segurança associados a cada um deles, tendo seus valores apresentado grande variação de 1,15 até 22. Pode-se perceber que para alguns taludes específicos sobre determinada condição de análise, os valores obtidos para o fator de segurança se apresentaram instáveis ($<1,5$). A inspeção em campo permitiu verificar a influência do escoamento concentrado na instabilidade do solo principalmente no leito do córrego, além da existência de escoamento superficial e inteno no maciço nas faces dos taludes. Mediante análise realizada é possível identificar que o processo de retaludamento pode ser uma alternativa viável, devido à altura dos taludes ter sido um dos parâmetros que mais influenciou na estabilidade. Entretanto, se nenhuma solução for adotada o processo erosivo instaurado na área continuará a ser deflagado, principalmente pela susceptibilidade do solo mais superficial.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes, Voçoroca, Erosão, Parque Cesamar.

Abstract

Erosive processes are due to natural factors combined with the effect of time, which can also be caused or have their effect aggravated by human interference. These processes can cause landslides to slide, forming embankments that, if not stabilized, can render the area unusable and pose serious risks to the safety of engineering works and the population, especially if inserted in an urban setting. Based on this context, the work carries out an analysis of the stability of the gully slope of the Cesamar park, located in one of the tributaries of the Brejo Comprido stream through computer simulations. The analyzes were performed using the methods of evaluation of Fellenius, simplified by Bishop and Morgenstern - Price, based on the theory of limit equilibrium. For the development of the research, a characterization of the study area was carried out, in which the area of influence of the gullet was defined, in addition to the geometric configuration of the slopes, being determined for this research 30 profiles with heights ranging from 2 to 14 meters. The characterization of the soil stratigraphy was carried out by a visual survey to define the beginning and end of the layers, with basically two types of soil being observed. The topsoil was classified as a sandy silt with practically zero cohesion, while the deep soil proved to be a clayey sand with enough cohesion between the particles. With the data obtained from the characterization of the study area and soil properties, the analysis of the stability of the slopes was carried out, determining the safety factors associated with each one, with the selected values ranging widely from 1.15 to 22. It can be seen that for some specific slopes under a certain analysis condition, the values obtained for the safety factor were unstable (<1.5). The field inspection allowed to verify the influence of the concentrated flow in the instability of the soil, mainly in the stream bed, besides the existence of superficial and intentional flow in the massif in the faces of the slopes. Through the analysis carried out, it is possible to identify that the retraining process can be a viable alternative, due to the height of the embankments have been one of the parameters that most influenced stability. However, if no solution is adopted, the erosive process established in the area will continue to be triggered, mainly by the susceptibility of the more superficial soil.

Palavras-chave: Slope Stability, Gully Erosion, Erosion, Cesamar Park.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de localização da voçoroca do Parque Cesamar, Palmas -TO	11
Figura 2 – Galeria de Drenagem Pluvial	12
Figura 3 – Dimensões e divisão da voçoroca	13
Figura 4 – Fase inicial da voçoroca	13
Figura 5 – Fase de propagação da voçoroca e barreira de contenção.	14
Figura 6 – Estrutura de dissipação de energia.	14
Figura 7 – Tipos de superfícies de ruptura	16
Figura 8 – Erosão em forma de sulcos, voçoroca Parque Cesamar - Palmas (TO)	17
Figura 9 – Voçoroca Parque Cesamar, Palmas (TO)	18
Figura 10 – Formas de diminuição da inclinação de taludes.	25
Figura 11 – Revestimento cobertura vegetal.	25
Figura 12 – Fluxograma de estruturação do trabalho	30
Figura 13 – Metodologia para obtenção da geometria dos taludes	31
Figura 14 – Determinação da altura média dos taludes	31
Figura 15 – Localização dos taludes	32
Figura 16 – Camadas de solo dos taludes	33
Figura 17 – Ponto de coleta das amostras deformadas.	33
Figura 18 – Coleta de amostras indeformadas de solo	34
Figura 19 – Modelo de talude adotado nas análises	35
Figura 20 – Curva granulométrica do solo superficial.	39
Figura 21 – Curva granulométrica solo profundo	41
Figura 22 – Amostra indeformada solo superficial	43
Figura 23 – Solo superficial sem coesão	43
Figura 24 – Gráfico dos ensaios de cisalhamento direto	45
Figura 25 – Envoltória de resistência do solo profundo	45
Figura 26 – Diferenças dos valores obtidos para o mesmo talude 27	48
Figura 27 – Diferença dos valores obtido para o mesmo talude 4	48
Figura 28 – Diferença dos resultados variando o nível freático	49
Figura 29 – Diferença de fatores de segurança em função da altura do talude	49
Figura 30 – Talude 29 com a divisão entre as camadas de solo na metade da altura . . .	50
Figura 31 – Diferença de fatores de segurança para variação da espessura da camada . .	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Correlação entre parâmetros geotécnicos do solo e o N_{spt}	26
Tabela 2 – Condições de análises e respectivos coeficientes de segurança dos taludes analisados.	27
Tabela 3 – Índices físicos dos corpos de prova ensaiados e os respectivos valores de resistência do solo para amostras com umidade natural.	28
Tabela 4 – Índices físicos dos corpos de prova ensaiados e os respectivos valores de resistência do solo para amostras inundadas.	28
Tabela 5 – Resultados dos FS da seção (A)	29
Tabela 6 – Resultados dos FS da seção (B)	29
Tabela 7 – Geometria dos taludes analisados	37
Tabela 8 – Classificação do solo superficial ABNT	39
Tabela 9 – Parâmetros do solo superficial	40
Tabela 10 – Limites de Atterberg Solo Superficial	40
Tabela 11 – Classificação do solo profundo ABNT	41
Tabela 12 – Parâmetros do solo profundo	42
Tabela 13 – Limites de Atterberg Solo Profundo	42
Tabela 14 – Valores típicos de ângulo de atrito drenado para areias e siltes	44
Tabela 15 – Fatores de segurança obtidos para taludes na fase de propagação da voçoroca	46

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Caracterização da área de estudo	11
2.2	Movimentações de talude	15
2.3	Categorias de erosões	16
2.4	Resistência dos Solos	19
2.5	Definição de fator de segurança (FS)	20
2.6	Métodos para análise da estabilidade de Taludes	20
2.7	Ensaio de caracterização do solo	22
2.7.1	Análise granulométrica do solo	22
2.7.2	Índices de consistência (Limites de Atterberg)	23
2.7.2.1	Limite de liquidez (LL)	23
2.7.2.2	Limite de plasticidade (LP)	23
2.7.2.3	Índice de plasticidade (IP)	23
2.7.2.4	Massa específica real dos grãos (ρ_s)	23
2.7.3	Peso específico natural (γ_n)	24
2.8	Métodos de estabilização de taludes	24
2.9	Casos de análise de estabilidade de taludes.	26
3	METODOLOGIA	30
3.1	Definição da geometria dos taludes	30
3.2	Caracterização do solo	32
3.2.1	Caracterização Física	32
3.2.2	Caracterização mecânica	34
3.3	Ensaio de cisalhamento direto	35
3.4	Análise da estabilidade de taludes	35
4	RESULTADOS	37
4.1	Definição da geometria dos taludes	37
4.2	Dados da caracterização do solo	38
4.3	Dados do ensaio de cisalhamento direto	42
4.4	Análise da estabilidade de taludes	46
5	CONCLUSÕES	51
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

Dentro da área da engenharia o solo é usado como material de construção e fundação para diferentes tipos de obras, sendo para geotecnia seus parâmetros e os processos a ele associado objeto de estudo. Com o passar do tempo ocorrem alterações neste solo devido a processos geomorfológicos, estando essas mudanças muitas vezes associadas a processos erosivos.

Estes processos podem apresentar origem natural ou antrópica, sendo que a interferência humana pode agravar também a erosão natural, potencializando os efeitos e causando a erosão acelerada. O fenômeno pode ter início pela ação dos ventos, das águas e das geleiras, estando geralmente associados a fatores externos, como o potencial de erosividade da chuva, condições de infiltração e escoamento superficial, declividade, assim como a fatores internos como gradiente crítico e erodibilidade do solo.

O desenvolvimento dos processos erosivos resulta em desagregação e ruptura de maciços de solo, formando taludes que ao depender da sua estabilidade e diversos outros fatores como características geológicas e geomorfológicas do local, evolução ao longo do tempo e evolução físico-química do material, podem gerar a perda de estabilidade e nova ruptura agravando o problema (CAMAPUM *et al.*, 2006).

Tendo como base o problema destacado, o correto diagnóstico das causas, bem como a escolha da melhor solução tanto técnica como econômica, se iniciam a partir de estudos e análises. Sendo assim a análise da estabilidade de taludes pode se mostrar importante para a identificação e caracterização do problema, possibilitando a obtenção de dados dos diferentes tipos de solo, além de permitir uma análise da estabilidade global.

Esta pesquisa aplica os estudos e conhecimentos citados anteriormente em um problema do município de Palmas - TO, um processo erosivo em estágio avançado presente em uma importante área de turismo e conservação. A necessidade de um estudo mais aprofundado sobre a situação da erosão, motivou o trabalho em busca de informações sobre este caso e demais presentes na literatura.

O processo erosivo citado trata-se de uma erosão do tipo linear no seu estágio mais desenvolvido sobre a forma de voçoroca. O problema localiza-se num afluente do córrego Brejo Comprido, afluente este que se origina numa galeria de drenagem pluvial passando por um canal em formato trapezoidal até o ponto em que deságua no córrego somando-se as vazões e causando o cenário mais crítico. (PALMAS, 2014)

Sendo assim, este trabalho contribui para melhor compreensão sobre a origem e desenvolvimento do processo abordado, fornecendo dados para auxiliar na tomada de decisões sobre possíveis soluções, além de apresentar uma avaliação da situação atual do montante com base em um fator de segurança associado.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste na avaliação da estabilidade dos taludes da voçoroca do parque cesamar Palmas - TO.

Objetivos específicos

- Realizar levantamento topográfico da área de estudo;
- Determinar as características geotécnicas dos solos encontrados no Parque Cesamar;
- Identificar os principais fatores que influenciam no fenômeno analisado;
- Realizar um comparativo entre os métodos de cálculo de estabilidade de taludes, a partir dos fatores de segurança obtidos;

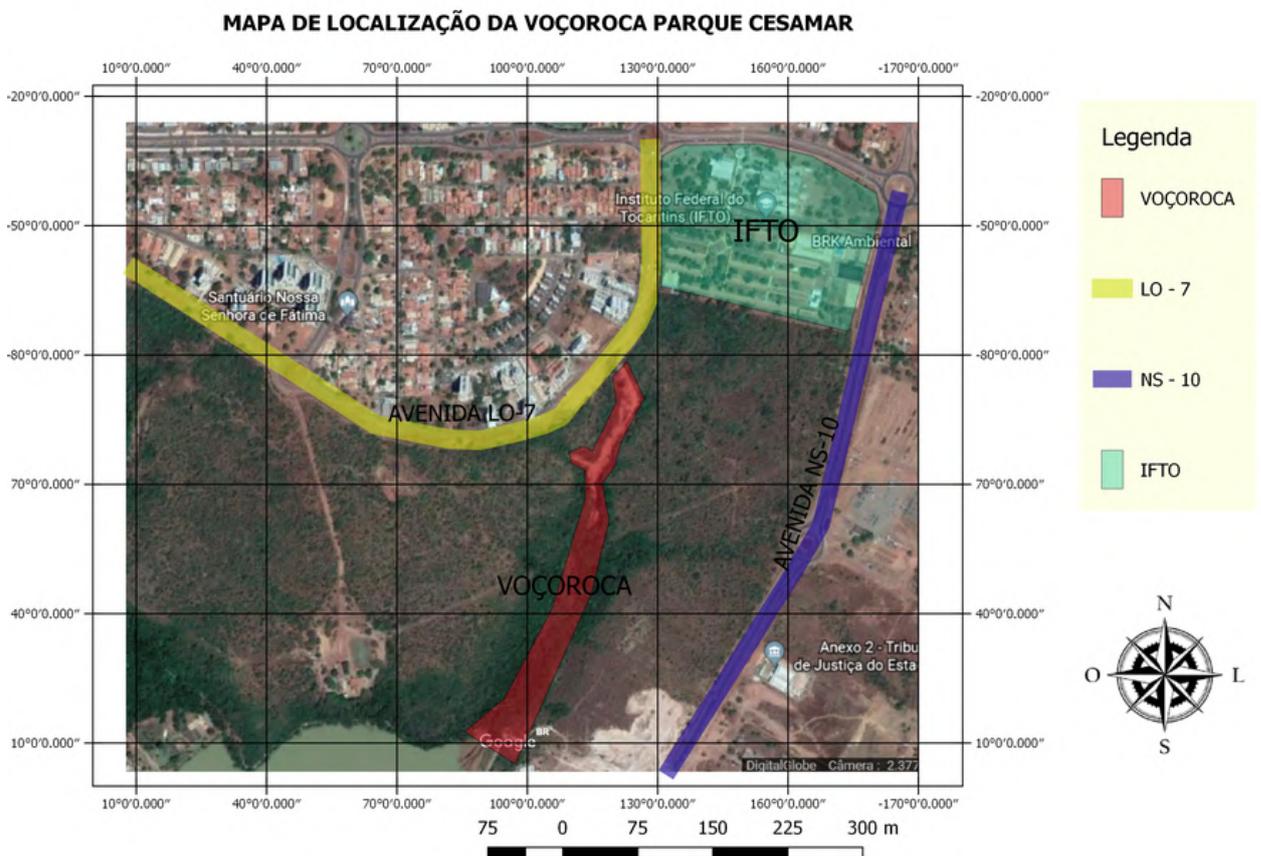
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais temas pertinentes à análise da estabilidade de taludes, abordando assuntos que dão embasamento ao trabalho e que apresentam conhecimentos necessários ao desenvolvimento da pesquisa. Na sequência são apresentados outros estudos semelhantes ao do projeto, realizados em outras locais, observando as principais dificuldades encontradas, os métodos utilizados e as conclusões obtidas.

2.1 Caracterização da área de estudo

O processo erosivo analisado nesta pesquisa está localizado nos limites do parque Cesamar, inaugurado em março de 1998 as margens do córrego Brejo Comprido sendo uma das principais áreas verde de Palmas- TO, com cerca de 96,770 m² de área e aproximadamente 6 km de perímetro (OLIVEIRA, 1998). A voçoroca se encontra na região Nordeste do parque, atrás do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), sendo o acesso através da avenida LO - 7 conforme mapa de localização da Figura 1.

Figura 1 – Mapa de localização da voçoroca do Parque Cesamar, Palmas -TO



O Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSB em seu anexo III que trata sobre a drenagem urbana (PALMAS, 2014), possui um tópico sobre as zonas críticas com erosão e assoreamento, no qual destaca que a origem do problema estudado ocorreu devido a uma galeria de drenagem das águas pluviais ($10^{\circ}12'08.5''S$ $48^{\circ}18'51.1''W$) localizada em um dos afluentes do córrego Brejo Comprido, conforme Figura 2. Essa galeria deságua todo seu volume diretamente sobre o solo da área de estudo, sem possuir uma correta destinação ou controle eficiente para conter seus efeitos.

Figura 2 – Galeria de Drenagem Pluvial



Fonte: Próprio autor.

O afluente por sua vez desemboca sobre o córrego, ponto a partir do qual as vazões se somam e a ação da água causa erosões mais significativas. Com o passar do tempo e ausência de medidas corretivas eficazes o processo erosivo do tipo linear evoluiu até atingir o estágio de voçoroca

Buscando auxiliar para uma melhor compreensão do processo a pesquisa divide a voçoroca em duas fases (Figura 3), uma fase inicial onde está localizada a galeria e o afluente do córrego, e que se iniciou o processo erosivo (Figura 4). A outra é a fase de propagação do problema, analisada a partir do ponto em que o afluente deságua sobre o Brejo Comprido onde as dimensões se mostram mais significantes (Figura 5).

Devido à evolução do problema e seu avanço em direção ao lago do parque, o poder público atuou na fase inicial construindo uma escada para dissipação da energia e redução da velocidade (Figura 6), um barramento formando bacias no local, além de uma barreira de contenção de rochas.

Figura 3 – Dimensões e divisão da voçoroca



Fonte: Google Earth modificado.

Figura 4 – Fase inicial da voçoroca



Fonte: Próprio Autor

Figura 5 – Fase de propagação da voçoroca e barreira de contenção.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6 – Estrutura de dissipação de energia.



Fonte: Próprio autor.

2.2 Movimentações de talude

Para melhor compreensão do conceito de estabilidade de taludes é importante definir as formas como ocorrem as movimentações do solo, as forças atuantes sobre o mesmo, a forma da superfície de ruptura e a velocidade com que ocorrem essas movimentações.

Os taludes são submetidos a forças gravitacionais e de percolação de água, que tendem a instabilizar o maciço até o ponto em que a sua resistência não seja mais suficiente para conter essas ações, ocasionando na ruptura do solo. A seguir serão descritos as principais formas de movimentação de taludes, podendo ser classificadas de acordo com a velocidade de movimento do solo das seguintes formas (MACHADO e MACHADO, 1997):

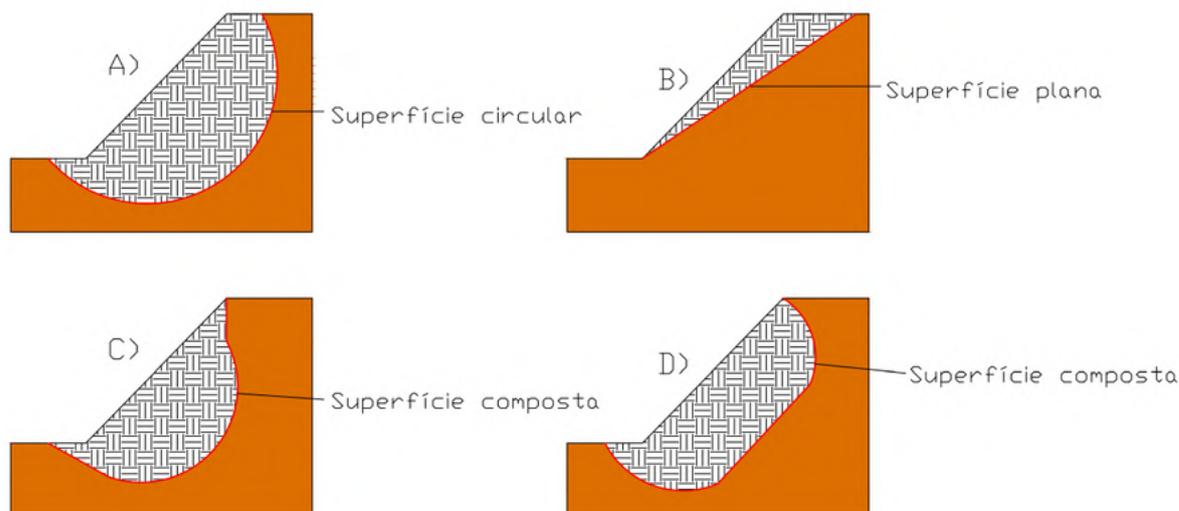
- **Rastejos:** São movimentos bem lentos e contínuos que ocorrem na superfície do maciço, não ocorrendo necessariamente ruptura. A causa do rastejo normalmente é a gravidade associada aos fatores de temperatura e umidade. O movimento geralmente apresenta a ordem de milímetros por ano.
- **Escorregamentos:** Movimentação que pode ocorrer de forma lenta ou rápida, e têm origem de um deslocamento de solo em forma de cunha, apresentando uma superfície de ruptura bem definida.
- **Desmoronamento:** São decorrentes da força da gravidade que separa a massa de solo do maciço, ocorrendo seu movimento de forma rápida. Podem ocorrer também a blocos de rochas, sendo para este caso a penetração de água nas fraturas gerando empuxos hidrostáticos pode ser uma das causas da ruptura.

Para os escorregamentos, estes podem ainda segundo Queiroz (2009), ser subdivididos em rotacionais ou translacionais. Os rotacionais ocorrem em solos aproximadamente homogêneos e isotrópicos, e a superfície de ruptura é um trecho de círculo, conforme exemplo da Figura 7a, sendo a resistência ao cisalhamento constante ao longo da mesma.

Enquanto os escorregamentos translacionais ou ainda conhecidos como planares (Figura 7b), normalmente ocorrem em solos ou rochas com descontinuidades ao longo da superfície de ruptura, apresentando heterogeneidade e anisotropia.

Além desses tipos de superfície de ruptura existe também aquela chamada composta, que é a junção entre a circular e a planar, não possuindo forma definida a depender dos fatores atuantes sobre o solo, conforme exemplos das Figuras 7c e 7d.

Figura 7 – Tipos de superfícies de ruptura



Fonte: Machado e Machado modificado.

Conforme Machado e Machado (1997) outras características vão influenciar em qual será a forma da superfície de ruptura, como o tipo de solo do talude, solos homogêneos apresentam superfície de ruptura circular, enquanto solos não homogêneos geralmente são não circular, além da inclinação do talude, taludes íngremes tendem a apresentar superfície plana e taludes suaves superfícies cilíndricas.

2.3 Categorias de erosões

Além de entender as formas de movimentações dos taludes é necessário entender como ocorrem a sua formação, em especial aqueles causados por erosões. Segundo Camapum *et al.* (2006) de uma maneira mais comum as erosões podem ser classificadas em erosão hídrica, eólica, glacial e organogênica.

Este trabalho abordou as erosões antrópicas de origem hídrica, sendo a água um dos maiores responsáveis pela ocorrência de muitos escorregamentos de taludes, devido a fatores como introdução de uma força de percolação agindo no sentido do escorregamento, aumento do peso específico do solo, perda da resistência por encharcamento e diminuição da resistência efetiva do solo.

A infiltração de água no solo pode causar ainda a lixiviação de argilominerais, fenômeno que provoca a perda dos nutrientes e conseqüente diminuição da sua capacidade de recuperação, além do carreamento ou o depósito de sedimentos, ambos influenciando no processo erosivo e assoreamento dos corpos d'água.

As erosões hídricas podem ser divididas em três principais grupos: Erosão fluvial, erosão interna e erosão pluvial, sendo esta última sub-dividida em laminar e linear (sulco, ravina, voçoroca) (CAMAPUM, *et al.*, 2009). A seguir será feita uma breve descrição sobre a erosão interna e de origem pluvial.

- **Erosão Interna:** Também conhecida como *Piping*, pode ser definida como um processo de erosão subterrânea, em que as partículas de solo são removidas pela percolação da água, formando cavidades tubulares no solo.

Esse fenômeno ocorre a partir da face de um talude, porém, não se restringe somente ao mesmo podendo avançar centenas de metros, podendo até evoluir para grandes cavidades no subsolo.

A erosão subterrânea segundo Camapum *et al.* (2006), pode ocorrer devido as seguintes situações: Quando a força de percolação ultrapassa a resistência localizada do maciço, quando o gradiente hidráulico supera o crítico para a área em questão ou quando a fração grossa do solo não é filtro da fina, causando o deslocamento entre as partículas que geram grandes cavidades no interior do maciço.

- **Erosão laminar:** Geralmente surge do escoamento de água que não infiltra, causando o transporte de partículas pela força gerada entre a água e o solo. Depende de fatores como a densidade, velocidade de escoamento e principalmente da inclinação de taludes.
- **Erosão Linear:** Esse tipo de erosão representa a evolução do processo erosivo em sulcos, ravinas e voçorocas nessa ordem respectivamente. A classificação destas manifestações apresenta critérios distintos na literatura, variando desde a geometria até aspectos geomecânicos e de fluxo.

Os sulcos podem ser definidos conforme Camapum *et al.* (2001), como pequenas canais de até 10 cm de profundidade, causados pela concentração do escoamento superficial. O escoamento na origem do processo geralmente se dá de forma distribuída, conforme exemplo da Figura 8.

Figura 8 – Erosão em forma de sulcos, voçoroca Parque Cesamar - Palmas (TO)



A concentração de água nos sulcos causam sua evolução para ravinas ou voçorocas. As primeiras se caracterizam por canais com profundidade entre 10 cm até 50 cm, ou quando ocorrer a instabilidade do talude por falta de coesão.

As voçorocas também conhecida por alguns autores como boçoroca, é um termo de origem Tupi-Guarani, Ibi-Çoroc que significa “terra rasgada” (CAMAPUM et al., 2006). Correspondem ao estágio mais avançado de um processo erosivo, podendo causar os maiores danos, além de apresentar maior dificuldade no controle e elevado custo.

Seguindo o critério de classificação já adotado anteriormente, as voçorocas são aquelas erosões com profundidade superior a 50 cm (Figura 9). Usualmente é adotado no Brasil a diferença entre ravina e voçoroca em função do processo atingir ou não o lençol freático. Elas podem também estar ou não associadas ao processo de erosão interna, mas principalmente a perda de resistência do solo, assunto que será abordado no tópico seguinte.

Figura 9 – Voçoroca Parque Cesamar, Palmas (TO)



Próprio Autor

Devido a voçoroca ser o estágio mais evoluído das erosões lineares, os volumes de solo erodidos em alguns casos podem até ser menores que aqueles por erosão superficial ou em sulcos, entretanto, o caráter comprometedor dos terrenos é muito grande, podendo causar a inutilização de terras agrícolas e urbanas além dos riscos as obras de engenharia.

2.4 Resistência dos Solos

O solo assim como vários materiais utilizados na construção civil, concreto como exemplo, resistem bem às tensões de compressão, porém, apresentam resistência limitada a tensões de cisalhamento e tração. No caso dos solos a ruptura se dá preferencialmente por meio do cisalhamento, em planos onde a tensão cisalhante e a tensão normal atinge um valor crítico, sendo o plano denominado plano de ruptura. (MACHADO e MACHADO, 1997)

Como nos solos a tensão atuante predominante é a de cisalhamento, pode definir-se resistência do solo, como sendo a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, utilizando para sua determinação o critério de Mohr - Coulomb.

- Critério de ruptura de Mohr – Coulomb

Esse critério originou-se da teoria desenvolvida pelo engenheiro alemão Christian Otto Mohr, que supunha que a tensão de cisalhamento correspondente à ruptura do material está em função da tensão normal que atua sobre o plano de ruptura, sendo sua envoltória em forma de linha curva.

Entretanto, para a resolução dos problemas de geotecnia foi necessário aproximar a tensão de cisalhamento no plano de ruptura para uma função linear da tensão normal, trabalho realizado por Coulomb em 1776 (DAS, 2011). A equação que relaciona as tensões normal e de cisalhamento é chamada de critério de ruptura de Mohr – Coulomb e pode ser escrita conforme Equação 3.1 representada abaixo:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

Onde: c = coesão; ϕ = ângulo de atrito interno; σ = Tensão normal no plano de ruptura; τ = Resistência ao cisalhamento.

Segundo Braja (2007), em um solo saturado a tensão efetiva (σ') é suportada pelos sólidos do material. O critério de ruptura de Mohr – Coulomb pode então ser representado em função da tensão efetiva conforme Equação 3.2.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.2)$$

Onde: c' = coesão; ϕ' = ângulo de atrito interno com base na tensão efetiva ou ângulo de atrito drenado.

Os parâmetros utilizados no critério de Mohr - Coulomb são as propriedades dos materiais mais significativas quando se trata sobre problemas de estabilidade são o ângulo de atrito e a coesão dos solos.

O fenômeno de atrito nos solos se diferencia do fenômeno de atrito que ocorre entre dois sólidos, devido durante uma movimentação de solo existem uma quantidade de grãos muito grandes que no processo de rolar uns sobre os outros acabam acomodando-se em vazios.

O ângulo de atrito pode então ser definido como o máximo ângulo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato, sem que ocorra o deslizamento (PINTO, 2002).

A coesão pode ser definida como sendo a parcela da resistência do solo que independe de quaisquer tensões aplicadas, a atração química entre as partículas podem provoca uma coesão real semelhante a uma cola entre os corpos, que se mantêm mesmo que todas as tensões aplicadas ao solo forem removidas (PINTO, 2002).

2.5 Definição de fator de segurança (FS)

A segurança de um maciço de solo pode ser quantificada através de um número, sendo este denominado Fator de Segurança (MACHADO, 1997). Esse fator pode ser representado conforme Equação 3.3.

$$FS = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (2.3)$$

Onde: FS = Fator de segurança em relação á resistência;

τ = Resistência média ao cisalhamento do solo;

τ_d = Resistência média ao cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura.

Quando este fator de segurança é igual a 1,0 significa que o talude está na iminência de ruptura ($F_s = 1,0$), quando está abaixo de um significa que ele já deveria ter se rompido ($F_s < 1$), e quando está acima de 1,0 indica que o talude está estável. Geralmente adota-se um fator de segurança mínimo de 1, 5 para projetos de engenharia (BRAJA, 2011).

2.6 Métodos para análise da estabilidade de Taludes

Neste tópico é feita uma abordagem dos métodos geralmente utilizados para o cálculo da estabilidade, assim como das teorias em que eles se baseiam, com foco maior para aqueles que serão adotados nesse trabalho.

Grande parte dos métodos são baseados na Teoria do Equilíbrio Limite, utilizada para calcular a estabilidade de uma massa de solo que se rompe na forma de superfície plana, circular, poligonal ou mista. O fator de segurança pode ser determinado a partir do equilíbrio de forças, equilíbrio de momentos e equilíbrio limite ao corte (SILVA, 2011).

- **Método Fellenius:** Esse método considera uma superfície de ruptura circular e foi originalmente criado para estudar solos saturados, tendo seu uso ampliado para demais situações.

O método utiliza superfície de ruptura do tipo fatias para determinar a distribuição das tensões normal sobre a mesma. Além disso, também utiliza no cálculo somente as equações de equilíbrio de momento, sendo a resultante da força entre as fatias paralelas à base.

O cálculo do fator de segurança para este método pode ser realizado conforme Equação 3.4, desprezando-se as forças nas laterais das fatias.

$$FS = \frac{\sum [c'(b/\cos\alpha) + (W\cos\alpha - u(b/\cos\alpha)) \cdot \text{tg}\phi']}{\sum W\sin\alpha} \quad (2.4)$$

Onde:

u = poropressão média na base da fatia;

c' = coesão efetiva do solo;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo do solo;

W = peso total da fatia de largura b ;

α = Ângulo entre a vertical e a força normal atuante na base da fatia.

- **Método Simplificado de Bishop:** O método de Bishop foi originalmente desenvolvido para superfícies de ruptura circular, sendo adaptado para uma análise por fatias. Para a adaptação deve-se admitir que a força entre as fatias são nulas, sendo a força normal atuando no centro da base da fatia.

O fator de segurança para este método é obtido por meio de um somatório de momentos para um ponto em comum, utiliza-se a mesma equação que o método de Fellenius, com a diferença das forças verticais, que para esse caso deve ser considerada conforme Equação 3.5:

$$FS = \frac{1 \sum [c' \cdot b + (W - ub) \text{tg}\phi]}{b} \quad (2.5)$$

- **Método Morgenstern-Price:**

Surgiu da necessidade de estudo de superfícies de ruptura não - circular, sendo um dos métodos classificados como rigoroso, cumprindo as condições de equilíbrio. A inclinação das forças de interação entre as várias fatias são determinadas por meio de uma função $f(x)$, que pode ser uma constante, senoide ou trapezoide, multiplicada por um determinado fator (λ), sendo ambos encontrados pela combinação de equações de forças verticais e horizontais quanto de equilíbrio de momentos (SILVA, 2011).

- **Método de Equilíbrio limite Generalizado (GLE):** Este método é uma extensão dos métodos de Spencer e MorgensternPrice. Para o cálculo do fator de segurança, o método considera tanto o equilíbrio das forças (F_f), como o equilíbrio dos momentos (F_m), conformes Equações 3.6 e 3.7, obtendo assim 2 fatores de segurança distintos.

$$F_m = \frac{\sum [c'\beta R + (N - \mu\beta)R \tan\phi']}{\sum Wx - \sum N f_{\pm} Dd} \quad (2.6)$$

$$Ff = \frac{\sum [c' \beta \cos \alpha + (N - \mu \beta) R \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum_N \sin \alpha - D \cos \omega} \quad (2.7)$$

A escolha de qual fórmula utilizar vai depender do tipo de análise que se deseja realizar, sendo, β , R , x , f , d e ω são parâmetros geométricos e D será a linha de impulso (linha que contém os pontos laterais e onde são aplicadas as forças de interação do talude).

Será utilizado também um método numérico na análise da estabilidade do talude, o método de tensão de elementos finitos que será descrito a seguir, havendo atualmente para esse tipo de métodos muito estudo e difusão de suas utilizações.

- **Método de tensão de elementos finitos:** Este método teve origem para a engenharia geotécnica por Clough e Woodward (1967), mas que apesar dos seus altos custos inicialmente, só se desenvolveu com a expansão dos computadores.

O método permite incorporar as relações tensão-do solo no estudo, e pode ser dividido em métodos diretos e métodos indiretos. Nos diretos o método dos elementos finitos é empregado diretamente para determinar a superfície potencial de ruptura e cálculo do fator de segurança.

Os métodos indiretos são realizados gerando inicialmente um campo de tensões pela análise do método dos elementos finitos e a partir dela utiliza-se outro procedimento de análise para determinação da potencial superfície crítica de deslizamento e seu fator de segurança associado.

Para este trabalho será adotado o método dos elementos finitos diretos, que para casos de análise não lineares, o fator de segurança é determinado pela redução progressiva dos parâmetros de resistência, conforme demonstrado nas Equações 3.8 e 3.9, sendo M um parâmetro adotado para reduzir os valores de c e ϕ nas sucessivas análises a serem realizadas.

$$c^* = c/M \quad (2.8)$$

$$\tan * \phi = \tan \phi / M \quad (2.9)$$

2.7 Ensaios de caracterização do solo

2.7.1 Análise granulométrica do solo

Tem a finalidade de identificar a distribuição das dimensões dos grãos de um solo, sendo dividida em duas fases: peneiramento e sedimentação. Para este trabalho foi utilizada a sedimentação com defloculante e o resultado apresentado por meio da curva granulométrica dos solos.

A norma que rege os procedimentos a serem adotados no ensaio da análise granulométrica é a ABNT/NBR - 7181/2016, com suporte da NBR 6457/2016 para preparação das amostras a serem utilizadas no ensaio.

2.7.2 Índices de consistência (Limites de Atterberg)

Somente uma análise granulométrica não é suficiente para caracterizar bem o material para os fins da engenharia, devido à fração fina dos solos representar grande importância no comportamento desse solo. A influência das partículas argilosa na engenharia pode ser obtida através de uma análise indireta do comportamento do solo na presença de água, método proposto inicialmente pelo engenheiro químico sueco Albert Atteberg, adaptado e padronizado pelo professor de Mecânica dos Solos Arthur Casagrande (PINTO, 2002).

2.7.2.1 Limite de liquidez (LL)

O Limite de Liquidez pode determinar a quantidade de umidade no solo para a qual este sofre mudança do estado sólido para o plástico, perdendo a sua capacidade de fluir. Ele é definido como o teor de umidade do solo no qual uma ranhura nele feita necessita de 25 golpes no aparelho de Casagrande para se fechar. A norma regulamentadora que rege os procedimentos a serem seguidos no ensaio é a ABNT/ NBR - 6459/2016.

O ensaio foi realizado cinco vezes para cada solo obtendo assim pares de valores (teor de umidade x número de golpes), utilizados para construção do gráfico no qual pontos os foram ajustados para uma reta, obtendo assim a partir deste o teor de umidade referente ao Limite de Liquidez.

2.7.2.2 Limite de plasticidade (LP)

Pinto (2002) define o limite de plasticidade como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se o solo com as palmas das mãos, sendo o limite mais baixo do intervalo plástico do solo.

A norma que regulamenta os procedimentos necessários a execução do ensaio de Limite de Plasticidade é a ABNT/ NBR - 7180/2016.

2.7.2.3 Índice de plasticidade (IP)

O índice de Plasticidade corresponde a faixa de valores de umidade do solo na qual ele comporta de maneira plástica. Pode ser obtido pela diferença entre os valores do Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade.

2.7.2.4 Massa específica real dos grãos (ρ_s)

É uma propriedade inerente de cada material, sendo utilizada na etapa de sedimentação para construção da curva granulométrica do solo. O procedimento foi realizado de acordo com as especificações da ABNT/NBR - 6458/2016, utilizando os grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm.

O ensaio foi realizado com três amostras previamente imersas em água destilada por 12 horas, sendo o cálculo realizado conforme Equação 4.1 que utiliza as massas e temperatura, sendo o resultado a média dos valores obtidos com as amostras.

$$\rho_s = \frac{\frac{100 \cdot m_1}{(100+W)}}{\frac{100 \cdot m_1}{(100+W)} + m_3 - m_2} \cdot \rho_w \quad (2.10)$$

Onde:

m_1 = massa de solo usada no ensaio;

m_2 = massa do conjunto: picnômetro + solo + água;

m_3 = massa do picnômetro com água até a marca de referência;

W = teor de umidade da amostra

ρ_w = massa específica da água na temperatura do ensaio

2.7.3 Peso específico natural (γ_n)

De acordo com Pinto (2002), pode ser definido como a relação entre o peso total do solo e seu volume total. Alguns autores também adotam a expressão “peso específico do solo” para se referir a essa propriedade.

Para sua determinação deve-se moldar um cilindro de solo com as dimensões já conhecidas para obtenção do volume. Sendo o peso específico natural o peso total dividido por esse volume ($\gamma_n = \text{Peso}_{total} / \text{volume}$).

2.8 Métodos de estabilização de taludes

As formas de controle do processo erosivo segundo Camapum *et al.* (2006) pode ser divididas em medidas preventivas e medidas corretivas, sendo a primeira com o objetivo de evitar que o processo se inicie, como exemplo a manutenção da cobertura vegetal e controle das águas pluviais.

As medidas corretivas são o conjunto de ações executadas após erosão já instalada, com o objetivo de interromper a evolução ou minimizar os danos causados, caso que se enquadra este trabalho.

A alternativas de correção podem ainda ser subdivididas em medidas de estabilização ou medidas de recuperação, devendo para cada caso ser avaliado aquela mais apropriada para o problema em questão. A seguir serão apresentados alguns exemplos de medidas corretivas:

- **Diminuição da inclinação do talude**

É um dos métodos mais simples e de mais baixo custo para solução do problema. Consiste na alteração da geometria do talude por meio da redução da sua altura ou do ângulo de inclinação.

Geralmente adotam-se os procedimentos de suavização do ângulo de inclinação do talude ou execução de patamares na superfície, conforme figura 10 (HORST, 2007).

Figura 10 – Formas de diminuição da inclinação de taludes.

Fonte: Próprio autor

- **Revestimento dos Taludes**

Uma medida de estabilização que é usualmente adotada é o revestimento da face do talude, podendo ser utilizado para isto vários tipos de materiais. Esse método visa minimizar os efeitos do fluxo de águas pluviais, além de aumentar a força de resistência sobre o maciço de solo.

O revestimento pode ser realizado utilizando cobertura vegetal, ou materiais como concreto, gabião, colchão reno, entre outros. A Figura 11 demonstra um exemplo desse tipo de técnica.

Figura 11 – Revestimento cobertura vegetal.

Fonte: Engestab

- **Drenagem**

A água atua de várias formas sobre a estabilidade de um maciço. A partir desses efeitos a necessidade de instalação de um sistema de drenagem para resolver os problemas decorrentes do fluxo de água se mostra de grande importância.

A drenagem pode ser dividida em superficial ou profunda, as superficiais são compostas de canaletas que tem a função de conduzir a água horizontalmente, enquanto no sistema profundo

utilizam-se furos ou tubos horizontais para captar a água que infiltra no maciço e destiná-la corretamente para fora da face do talude.

2.9 Casos de análise de estabilidade de taludes.

A seguir serão apresentados alguns casos de pesquisas semelhantes a deste trabalho, buscando os principais tópicos abordados para servir como base, além de possibilitar também uma comparação com os dados que serão obtidos.

1) Verificação de estabilidade de taludes sujeitos a voçorocas, na cidade de Manaus - AM

O artigo publicado pelo Dr. Nilton de Souza Campelo (CAMPELO, 2002), realizou 5 análises da estabilidade de talude, em áreas de voçoroca na cidade de Manaus, com suas alturas variando entre 28 m e 46 m.

Levando em consideração a altura dos taludes foram realizadas duas sondagens de simples reconhecimento (NSPT), a primeira na crista outra no pé do talude para cada voçoroca estudada, possibilitando assim uma caracterização do solo.

Com os valores da sondagem do solo os parâmetros de resistência para esse estudo foram determinados a partir de uma correlação com os valores da sondagem Nspt e o tipo de solo, conforme pode ser observado na Tabela 1.

A análise da estabilidade depois de obtido os parâmetros foram determinadas por meio de simulação computacional utilizando dois programas de domínio público baseados no equilíbrio estático para cada fatia do maciço, o SSTAB1 que utiliza superfícies de ruptura circular a partir de uma superfície inicial definida pelo operador e o NONCIR, sendo que este último utiliza superfícies formadas por segmentos de reta.

Tabela 1 – Correlação entre parâmetros geotécnicos do solo e o Nspt.

Classificação do solo	Nspt	γ KN/m ³	c(KPa)	ϕ (°)
Areia Argilosa	<10	<15	<5	<25
	10 a 20	15 a 17	5 a 15	25 a 30
	20 a 30	17 a 19	15 a 25	30 a 34
	>30	20	30	35
Argila Arenosa	<10	<13	<10	<15
	10 a 20	13 a 15	10 a 30	15 a 27
	20 a 30	15 a 18	30 a 55	15 a 27
	>30	19	60	28

Fonte: Campelo, 2002.

As condições de análise assim como os valores dos coeficientes de segurança global podem ser observados na Tabela 2, no qual e possuir observar a influência da altura sobre os valores do coeficiente, assim como possuir áreas erodidas instáveis de acordo com a literatura.

Tabela 2 – Condições de análises e respectivos coeficientes de segurança dos taludes analisados.

Talude analisado	Altura(m)	Condição de análise	Coeficiente de segurança global	
			SSTAB1	NOCIR
Erosão 1	28,5	Terreno Natural	2,12	1,49
Erosão 2	46,0	Terreno Natural	0,86	0,97
		Cortes do Terreno a 30.º, em patamares	1,32	1,45
Erosão 3	36,0	Terreno Natural	1,82	2,68
Erosão 4	29,5	Terreno Natural	1,48	1,708
Erosão 5	37,5	Terreno Natural	0,96	1,12

Fonte: Campelo, 2002.

2) Análise da estabilidade de taludes - Caso do município de Teutônia - RS

Neste trabalho realizado por Fritscher (2016), existem alguns pontos importantes a se destacar, primeiramente a composição do material do talude, que assim como nesta pesquisa foi realizada a partir de caracterização do solo retirado em campo, não sendo realizado ensaio de penetração N_{spt} . Outro ponto é a geometria do talude, que foi medida em campo utilizando trena a laser para determinar as dimensões necessárias ao estudo,

Para a análise, foram realizados os seguintes ensaios de laboratório: análise granulométrica na qual 99,30% do material foi classificado como areia ($0,06 \text{ mm} < \emptyset \leq 2 \text{ mm}$), massa específica real dos grãos de $2,69 \text{ g/cm}^3$, limite de liquidez e limite de plasticidade.

Além dos citados anteriormente foi realizado também ensaio de cisalhamento direto com amostras indeformadas retiradas em campo, sendo adotada duas situações a primeira com a amostra na umidade natural na qual foram utilizadas tensões de 50, 100 e 200 kPa a uma velocidade constante de 1,25 mm/min e outra com umidade saturada utilizando tensões de 25,50 e 100 kPa a uma velocidade de 0,025 mm/min.

Os valores obtidos para os índices físicos e parâmetros de resistência para amostras com a umidade natural e inundada são mostrados nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

Tabela 3 – Índices físicos dos corpos de prova ensaiados e os respectivos valores de resistência do solo para amostras com umidade natural.

Corpo de Prova	Tensão Normal (kPa)	Peso específico γ (kN/m ³)	Umidade (W%)	Grau de Saturação S (%)
1	50	18,57	10,94	48,49
2	50	17,97	10,62	43,55
3	100	16,98	9,57	34,99
4	100	17,97	9,95	41,44
5	200	17,77	11,23	44,17
6	200	17,25	9,83	37,10
Peso específico médio (kN/m ³)				17,75
Parâmetros de resistência		Coesão c (kPa)		100
		Ângulo de atrito (°)		36,87

Fonte: Fritscher, 2006.

Tabela 4 – Índices físicos dos corpos de prova ensaiados e os respectivos valores de resistência do solo para amostras inundadas.

Corpo de Prova	Tensão Normal (kPa)	Peso específico γ (kN/m ³)	Umidade (W%)	Grau de Saturação S (%)
7	25	19,52	21,08	84,82
8	50	19,50	22,57	87,88
9	100	19,54	24,06	91,43
Peso específico médio (kN/m ³)				19,50
Parâmetros de resistência		Coesão c (kPa)		45
		Ângulo de atrito (°)		27,83

Fonte: Próprio Autor

Para realizar a análise da estabilidade do talude será utilizado o programa SLOPE/W, da Geo Slope *International* Ltda, por meio dos métodos de Bishop, Morgenstern - Prince, Fellenius, Spencer e Jambu.

Foram adotadas duas seções distintas do talude para se realizar a análise, uma possuindo a maior altura do maciço e outra com altura média, ambas com o ângulo de atrito médio. Também foram feitas para cada caso três variações do nível de água, a primeira com o nível abaixo do pé

do talude, a segunda no meio da seção e a terceira na crista do talude. Os resultados obtidos para cada seção estão demonstrados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Resultados dos FS da seção (A)

Seção A	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3
Método	FS	FS	FS
Bishop	3,775	2,341	1,118
Morgenster - Price	3,956	2,621	1,272
Fellenius	3,774	2,562	1,509
Spencer	3,956	2,621	1,272
Jambu	3,914	2,705	1,253

Fonte: Fritscher, 2006.

Tabela 6 – Resultados dos FS da seção (B)

Seção A	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3
Método	FS	FS	FS
Bishop	4,911	3,035	1,698
Morgenster - Price	5,241	3,442	1,743
Fellenius	4,985	3,344	1,983
Spencer	5,241	3,442	1,743
Jambu	5,165	3,592	1,798

Fonte: Fritscher, 2006.

Através desses resultados foi possível visualizar como a altura influencia nos fatores de segurança, mas principalmente o nível de água, sendo a pior situação obtida com a maior altura e o lençol freático na cota da crista.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa as principais etapas necessárias foram a definição da geometria dos taludes, além da caracterização física e mecânica do solo, para a partir da obtenção desses dados aplicar a análise computacional da estabilidade dos taludes. O trabalho foi estruturado conforme fluxograma ilustrado na Figura 12:

Figura 12 – Fluxograma de estruturação do trabalho



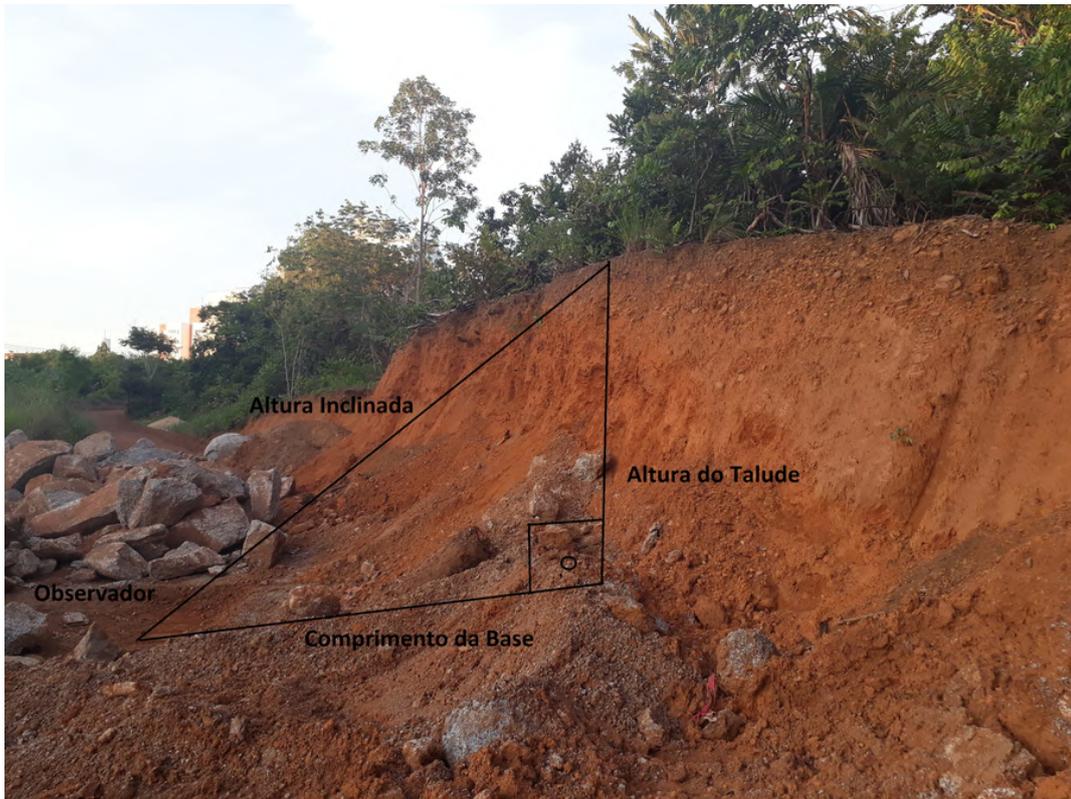
Fonte: Próprio autor

3.1 Definição da geometria dos taludes

Para realização da pesquisa foi necessário a definição de uma geometria para os taludes, sendo realizada por meio de um levantamento topográfico utilizando trena ultra-sônica com mira de laser da marca ZAAS modelo OQ-40/40S, com uma capacidade de medição de até 40 metros e precisão de +/- 5mm.

O levantamento consistiu em dividir a área da voçoroca em várias subáreas menores para facilitar a obtenção dos dados e análise no software. A metodologia utilizada consistiu em posicionar o equipamento alinhado com a base do talude e realizada a medição das alturas inclinada e do comprimento da base, obtendo por trigonometria a respectiva altura do talude, conforme exemplo da Figura 13.

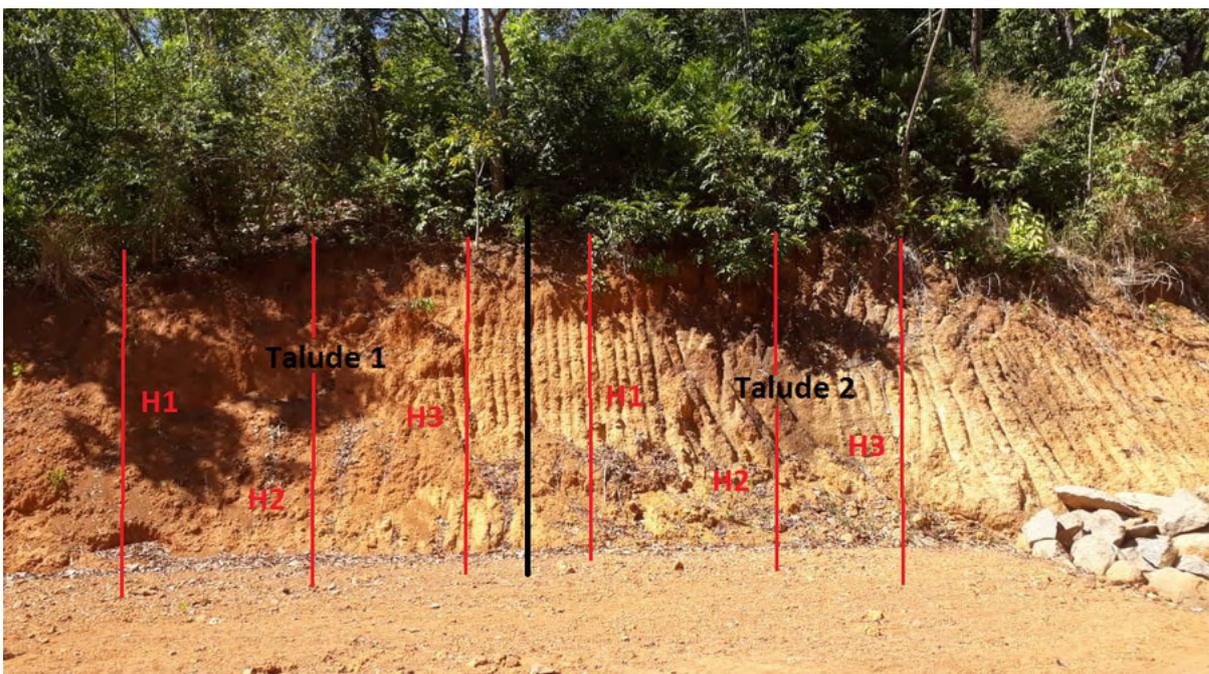
Figura 13 – Metodologia para obtenção da geometria dos taludes



Fonte: Próprio autor

Para cada talude foi determinado as suas respectivas extensões, além da altura média calculada a partir de três leituras realizadas no comprimento dos taludes, conforme Figura 14.

Figura 14 – Determinação da altura média dos taludes



Fonte: Próprio autor

Para esta pesquisa foram adotados 15 taludes em cada lado da erosão, conforme pode ser observado na Figura 15, abrangendo a parte inicial da voçoroca e a fase de propagação até onde foi possível realizar o levantamento devido à dificuldade de acesso e de se obter precisão dos dados.

Figura 15 – Localização dos taludes



Fonte: Google maps modificado

3.2 Caracterização do solo

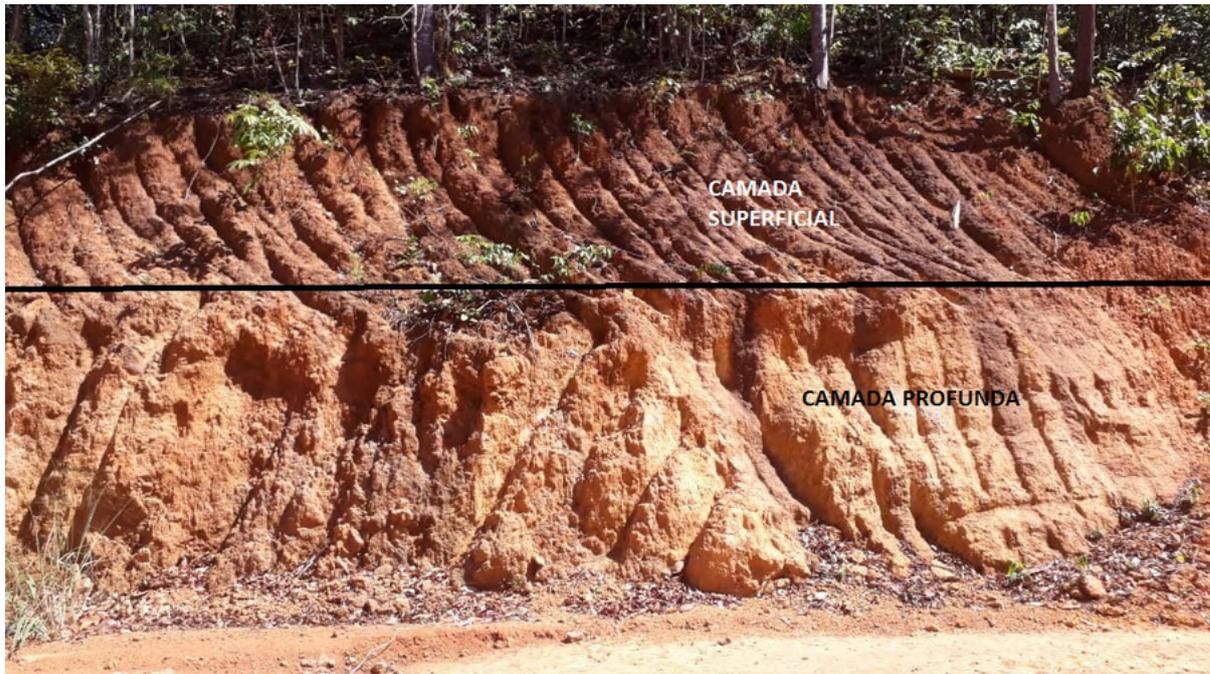
Outra etapa necessária para a análise da estabilidade do talude consiste na caracterização do solo, dividindo-se em caracterização física e mecânica. Para a caracterização física foi realizada uma identificação do material por meio da análise granulométrica, dos índices de consistência (Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Índice de Plasticidade) e do peso específico natural do solo. Já para a caracterização mecânica foi executado ensaio de cisalhamento direto para determinação dos parâmetros de resistência.

3.2.1 Caracterização Física

Para este trabalho adotou-se a hipótese de que os taludes são compostos de duas camadas homogêneas de solo, uma camada mais superficial de coloração avermelhada e outra camada mais profunda com um material mais amarelado, sendo adota a divisão entre as camadas na metade da altura dos taludes conforme pode ser observado na Figura 16.

Para a realização dos ensaios foram coletadas amostras deformadas do solo da voçoroca, no período de estiagem durante o mês de agosto, sendo consideradas para esse trabalho duas amostras coletadas nas faces dos taludes, conforme localização da Figura 17.

Figura 16 – Camadas de solo dos taludes



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – Ponto de coleta das amostras deformadas.



Fonte: Google Maps modificado.

A primeira foi retirada na fase inicial da voçoroca, a uma profundidade de aproximadamente 1,5 m, representando o solo superficial do maciço, possuindo as seguintes coordenadas ($10^{\circ}12'10.5''S$ $48^{\circ}18'50.9''W$).

A segunda amostra foi retirada na fase de propagação da erosão, a uma profundidade de aproximadamente 5 a 6 metros, em uma das áreas de maior dimensão da voçoroca com as seguintes coordenadas ($10^{\circ}12'13.0''S$ $48^{\circ}18'52.5''W$).

As amostras foram retiradas conforme ABNT/NBR - 9604/2016 no capítulo que trata sobre a preparação de amostras para ensaio de caracterização. O material coletado foi armazenado

em sacos plásticos devidamente identificados, sendo então transportado até o Laboratório de Engenharia Geotécnica e Infraestrutura - LEGI, da Universidade Federal do Tocantins - UFT para realização dos ensaios.

3.2.2 Caracterização mecânica

Para realização desta etapa foram retiradas quatro amostras indeformadas de solo do talude nos mesmos pontos de coletas das amostras deformadas, sendo o período de coleta durante o período chuvoso no mês de dezembro. Foram coletadas duas amostras e para o solo superficial e duas para o solo profundo. Foram utilizados cilindros de cravação, e seguindo os critérios estabelecidos pela ABNT/NBR - 9604/2016, conforme figura 18.

Figura 18 – Coleta de amostras indeformadas de solo



Fonte: Próprio autor.

As amostras foram vedadas para evitar a perda das características de campo, e posteriormente transportada para o laboratório de solos do Centro Universitário Católica do Tocantins para execução do ensaio.

3.3 Ensaio de cisalhamento direto

Para este estudo será adotado o ensaio de cisalhamento direto com deformação controlada tendo o mesmo sido adotado devido a sua facilidade de execução e por este método se mostrar satisfatório para o projeto na obtenção dos parâmetros de resistência necessários.

A norma que rege esse procedimento a ASTM D3080 - 04 *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, norma pertencente a ASTM International.

O ensaio foi realizado para amostras na condição natural, utilizando tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Todas as amostras passaram pelo processo de adensamento durante 24 horas, sendo a velocidade adotada na execução de 0,5 mm/min.

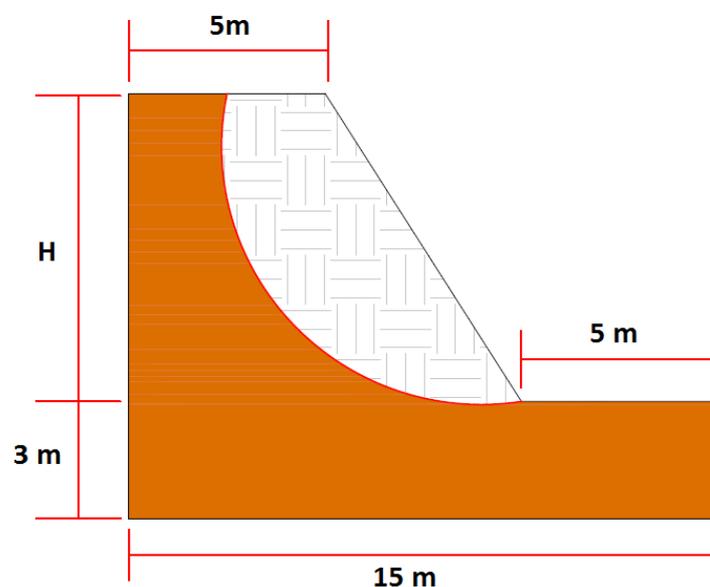
O cisalhamento do solo forneceu para cada tensão o gráfico da tensão *versus* deslocamento, possibilitando a partir dele a construção da envoltória de resistência do solo, obtendo assim os respectivos parâmetros de resistência.

3.4 Análise da estabilidade de taludes

A análise será feita utilizando métodos baseados em duas teorias distintas, teoria do equilíbrio limite (MEL) e teoria dos elementos finitos (MEF), sendo que para todos os métodos adotados os parâmetros do solo que serão utilizados nesta análise são o ângulo de atrito (Φ), coesão (c), e peso específico natural (γ_n).

O modelo geométrico dos taludes utilizado na análise para esta pesquisa consiste nas medidas padrões adotadas, variando somente o dado da altura, obtido na definição da geometria, conforme exemplo da Figura 19.

Figura 19 – Modelo de talude adotado nas análises



Devido à pesquisa não possuir sondagem para determinação do nível de água, serão adotadas duas situações distintas em cada método de análise, visando avaliar o efeito da água sobre a estabilidade do talude:

- 1) **Hipótese: nível de água na base do talude:** Busca representar o solo no seu estado seco, como ocorre durante o período de estiagem, avaliando a sua resistência sem a interferência da água.
 - 2) **Hipótese: nível de água na metade da altura do talude:** Visa simular a condição no período chuvoso onde ocorre a elevação desse nível, de modo a avaliar os efeitos decorrentes desse cenário.
- Teoria do Equilíbrio Limite

A análise da estabilidade dos taludes foi realizada utilizando métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite, mais comumente utilizada nos problemas de estabilidade e caracterizada pela formação de uma superfície de ruptura plana, circular ou mista, onde a razão entre a tensão cisalhante e a tensão normal atinge um valor crítico.

Os métodos que serão utilizados neste trabalho estão listados abaixo, diferenciando - se entre si pelas hipóteses simplificadoras adotadas em cada um deles.

- 1) Método Ordinário (Fellenius)
- 2) Método Simplificado de Bishop
- 3) Método Morgenstern - Price

O *software* escolhido para realizar a análise será o SLOPE/W versão estudante, sendo parte do pacote Geo Studio 2020 produzido pela GE0-SLOPE Internacional Ltd. Este programa consegue modelar situações para diferentes tipos de solo, geometrias complexas, situação de pressões neutras variável, utilizando uma variedade de métodos no cálculo.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos da definição da geometria dos taludes, da caracterização do solo assim como da análise da estabilidade de taludes. Foi realizada ainda a análise dos resultados, identificando os fatores que mais influenciam nos fatores de segurança.

4.1 Definição da geometria dos taludes

Os valores obtidos da definição das geometrias estão demonstrados na Tabela 7, por meio deles é possível visualizar que o comprimento médio dos taludes foi por volta de 10 metros. Os taludes da fase inicial da voçoroca (1 a 5 e 16 a 20) possuem alturas menores variando de 2 a 4 metros, enquanto para a fase de propagação o problema possui maior magnitude atingindo alturas que vão desde 6 até 14 metros de altura.

Tabela 7 – Geometria dos taludes analisados

Talude	Extensão (m)	Altura 1 (H1)	Altura 2 (H2)	Altura 3 (H3)	Altura média (Hm)	Desvio padrão	Variância
1	9,425	4,596	3,828	4,159	4,19	0,39	0,15
2	8,914	3,590	2,858	3,202	3,22	0,37	0,13
3	9,105	3,788	2,608	5,165	3,85	1,28	1,64
4	9,184	4,300	4,182	5,113	4,53	0,51	0,26
5	9,543	4,874	5,174	4,246	4,76	0,47	0,22
6	10,987	6,623	6,807	7,543	6,99	0,49	0,24
7	9,042	6,756	7,893	4,397	6,35	1,78	3,18
8	10,357	7,654	8,271	8,913	8,28	0,63	0,40
9	10,187	7,523	7,252	7,889	7,55	0,32	0,10
10	9,001	8,557	9,104	7,989	8,55	0,56	0,31

Talude	Extensão (m)	Altura 1 (H1)	Altura 2 (H2)	Altura 3 (H3)	Altura média (Hm)	Desvio padrão	Variância
11	10,946	6,077	6,054	10,636	7,59	2,64	6,96
12	10,187	8,899	9,556	9,000	9,15	0,36	0,13
13	9,765	8,556	7,789	8,221	8,19	0,38	0,15
14	10,221	10,431	9,87	11,567	10,62	0,86	0,75
15	11,765	9,875	10,444	10,341	10,22	0,30	0,09
16	3,784	3,458	1,770	0,928	2,05	1,05	1,66
17	10,144	3,205	2,410	2,839	2,82	0,32	0,16
18	6,694	3,149	2,831	3,061	3,01	0,13	0,03
19	8,956	4,180	3,885	2,509	3,52	0,73	0,80
20	6,972	3,260	5,530	4,944	4,58	0,96	1,39
21	8,587	8,871	7,567	7,855	8,10	0,56	0,47
22	10,433	7,985	8,689	8,213	8,30	0,29	0,13
23	10,733	6,976	12,091	12,563	10,54	2,53	9,60
24	8,506	7,127	9,221	6,787	7,71	1,08	1,74
25	9,935	7,670	8,823	8,569	8,35	0,49	0,37
26	9,657	13,234	11,890	12,888	12,67	0,57	0,49
27	9,449	14,857	13,555	14,188	14,20	0,53	0,42
28	10,890	11,777	10,678	11,458	11,30	0,46	0,32
29	11,055	12,345	11,788	12,322	12,15	0,26	0,10
30	10,687	10,897	11,666	12,054	11,54	0,48	0,35

Fonte: Próprio Autor.

4.2 Dados da caracterização do solo

- Solo - Superficial

O solo coletado na fase inicial da voçoroca, representando a parte mais superficial dos taludes apresenta uma coloração avermelhada. Ele foi classificado como sendo um silte - arenoso, conforme porcentagens demonstradas na tabela 8.

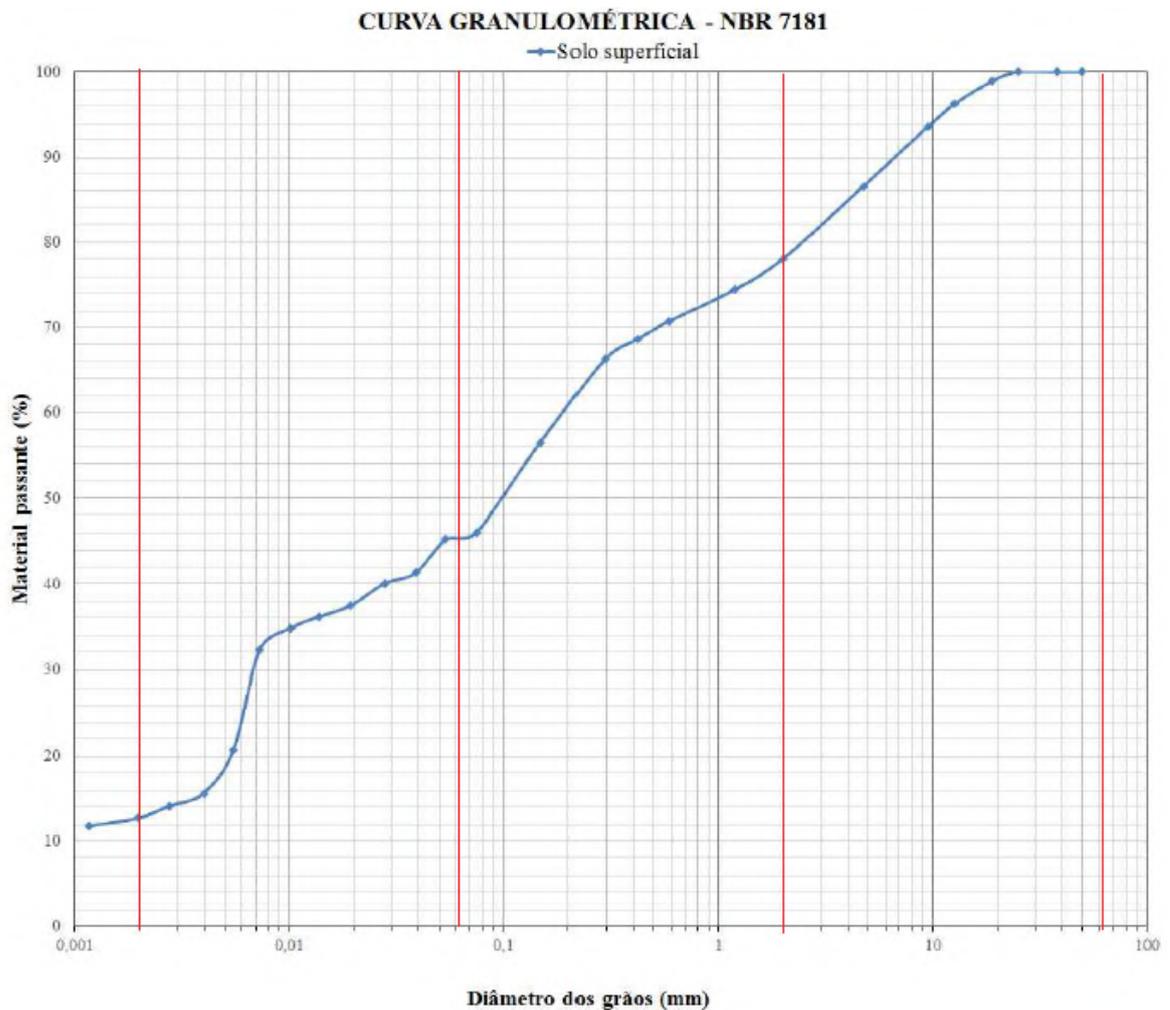
Tabela 8 – Classificação do solo superficial ABNT

Pedregulho	21,90%
Areia Total	33,90%
Areia Fina	7,20%
Areia Média	10,60%
Areia Grossa	16,10%
Silte	38,30%
Argila	6,00%

Fonte: Próprio Autor

A curva granulométrica do solo superficial está demonstrada na figura 20, indicando uma baixa porcentagem de argila em sua composição, além de possuir também grande concentração de pedregulhos.

Figura 20 – Curva granulométrica do solo superficial.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros obtidos a partir da curva granulométrica têm seus valores demonstrados na tabela 9. A partir deles é possível classificar o solo com uma uniformidade média, valores de Coeficiente de uniformidade (C_u) entre 5 e 15, e mal graduado por apresentar valores de coeficiente curvatura (C_c) menor que 1.

Tabela 9 – Parâmetros do solo superficial

Parâmetro	Valores
D10	0,015
D30	0,007
D60	0,19
C_u	12,67
C_c	0,02

Fonte: Próprio autor

Os resultados dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg estão demonstrados na tabela 10, a partir desta determinou-se o solo como apresentando uma plasticidade média ($7 < IP \leq 15$), conforme classificação de Jenkins (CAPUTO, 2015).

Tabela 10 – Limites de Atterberg Solo Superficial

Limite de Liquidez	30
Limite de Plasticidade	18
Índice de Plasticidade	12
Situação	Plasticidade média

Fonte: Próprio Autor.

Esses valores se comparados com o proposto por Pinto (2000), indicam um solo residual arenoso e fino. Já para Das (2011) o solo apresenta comportamento de uma argila inorgânica de baixa plasticidade.

O material apresentou ainda uma massa específica real dos grãos de $2,83 \text{ g/cm}^3$, umidade higroscópica de cerca de 3%, além de um peso específico natural de $16,10 \text{ kN/m}^3$.

- Solo - Profundo

O solo coletado na fase de propagação da voçoroca, representando a parte mais profunda dos taludes apresenta uma coloração amarelada e maior rigidez na superfície, representando maior dificuldade na coleta das amostras. O material foi classificado como sendo uma areia-argilosa, conforme porcentagens demonstradas na tabela 11.

Tabela 11 – Classificação do solo profundo ABNT

Pedregulho	6,20%
Areia Total	39,80%
Areia Fina	18,00%
Areia Média	13,00%
Areia Grossa	8,80%
Silte	16,20%
Argila	28,70%

Fonte: Próprio Autor

O solo profundo apresentou uma curva granulométrica bem graduada, com baixa concentração de pedregulhos em sua composição, conforme Figura 21.

Figura 21 – Curva granulométrica solo profundo



Fonte: Próprio autor.

O solo profundo apresentou um valor bastante elevado de coeficiente de uniformidade (Cu) oque indica um material não uniforme, além de ser classificado como um solo mal graduado devido seu valor de coeficiente de curvatura ($C_c < 1$), conforme pode ser observado na tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros do solo profundo

Parâmetro	Valores
D10	0,00015
D30	0,0006
D60	0,12
Cu	800
Cc	0,2

Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg estão demonstrados na tabela 13, a partir desta determinou-se o solo como apresentando uma plasticidade média, conforme classificação de Jenkins (CAPUTO, 2015)

Tabela 13 – Limites de Atterberg Solo Profundo

Limite de Liquidez	27
Limite de Plasticidade	14
Índice de Plasticidade	13
Classificação	Plasticidade média

Fonte: Próprio Autor

O material apresentou ainda massa específica real dos grãos de $2,72 \text{ g/cm}^3$, umidade higroscópica de cerca de 1,34% valores inferiores ao do solo superficial. O peso específico natural, por outro lado, foi de $17,18 \text{ kN/m}^3$, valor superior ao material coletado da fase inicial.

4.3 Dados do ensaio de cisalhamento direto

- Solo Superficial

Para o solo superficial não foi possível realizar o ensaio, devido às amostras coletadas inicialmente não possuírem coesão para moldagem do corpo de prova. As amostras indeformadas se desfaziam ao se exercer pressão sobre o solo, sendo que o equipamento de cisalhamento utiliza o modelo a cravação, conforme pode ser observado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Amostra indeformada solo superficial



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Solo superficial sem coesão



Fonte: Próprio autor.

Foi realizada nova coleta de amostras indeformadas de solo em pontos diferentes das iniciais e o resultado apresentado foi o mesmo, não sendo possível realizar a cravação do corpo de prova, devido às características do próprio solo e do período de realização das coletas (chuvoso).

A partir disso resolveu-se adotar para esta pesquisa os parâmetros de resistência em função do tipo de solo, sendo escolhido uma coesão $c = 0$ devido a grande quantidade de finos do solo e baixa porcentagem de argila. Já o ângulo de atrito foi definido conforme a Tabela 14 retirada de Das (2011) que fornece os valores típicos de ϕ para alguns solos granulares, sendo escolhido o valor de $\phi = 26^\circ$ para siltes devido o mesmo apresentar maior porcentagem na composição do solo.

Tabela 14 – Valores típicos de ângulo de atrito drenado para areias e siltes

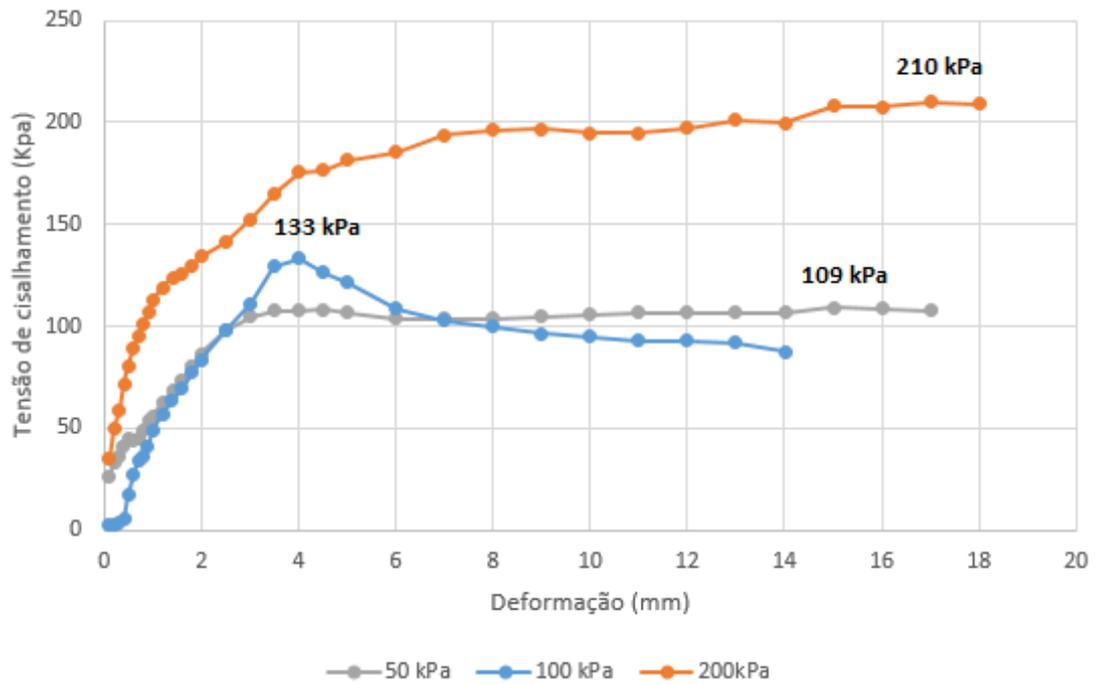
Tipo do solo	Ângulo de atrito (graus)
Areia: Grãos arredondados	
Fofa	27 - 30
Média	30 - 35
Compacta	35 - 38
Areia: Grãos angulares	
Fofa	30 - 35
Média	35 - 40
Compacta	40 - 45
Pedregulho com alguma areia	34 - 48
Silte	26 - 35

Fonte: Das,2011.

- Solo Profundo

Para o material mais profundo foi possível realizar a moldagem dos corpos de prova e realizar o cisalhamento do solo. Foram realizados 4 ensaios com o material coletado, duas para a tensão normal de 100 kPa, sendo descartada uma dessas amostras devido o resultado se mostrar incoerente com os valores obtidos para as amostras de 50 e 200 kPa. A Figura 24 demonstra o gráfico com as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento para as tensões normais adotadas, destacando ainda os valores de tensões obtidos.

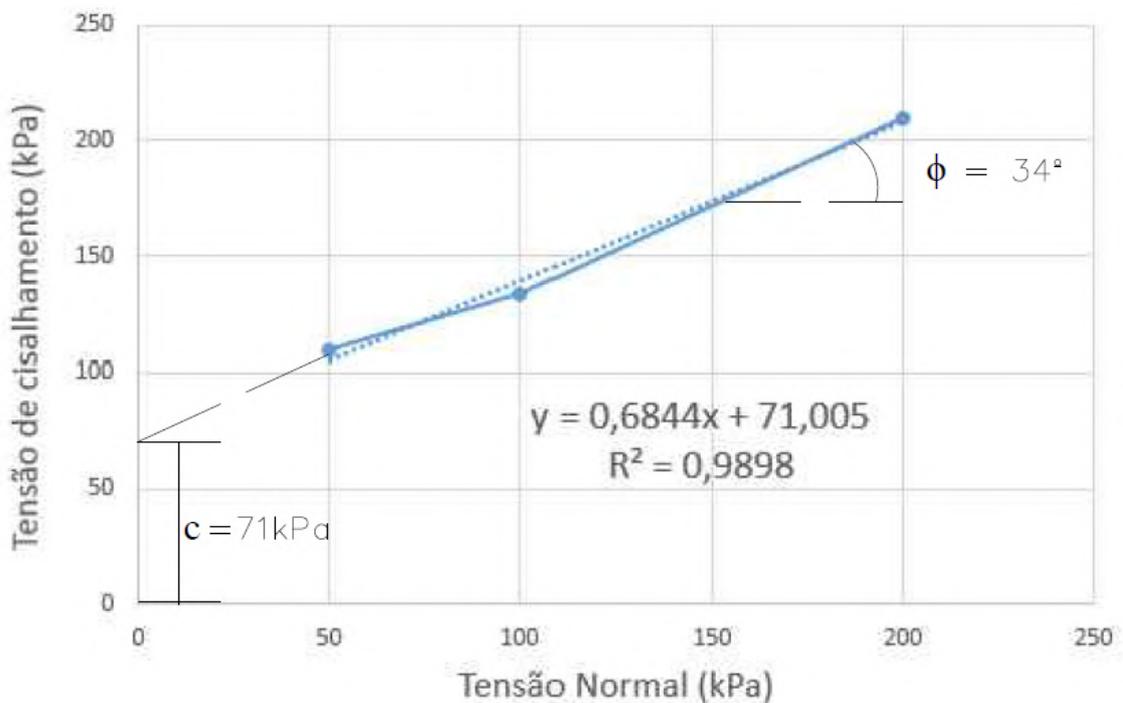
Figura 24 – Gráfico dos ensaios de cisalhamento direto



Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados obtidos, construiu-se a envoltória de resistência do solo, determinado sua equação e coeficiente de determinação (R^2), resultando numa coesão de $c = 71$ kPa e ângulo de atrito de $\phi = 34^\circ$, conforme Figura 25.

Figura 25 – Envoltória de resistência do solo profundo



Fonte: Próprio autor

4.4 Análise da estabilidade de taludes

- Fase Inicial

Os taludes analisados na fase inicial da voçoroca (1 a 5 ; 16 a 20) possuem alturas menores se comparados a fase de propagação, além de já terem passado por um processo de compactação decorrente das medidas adotadas anteriormente na tentativa de amenizar o problema. Esse cenário resultou em fatores de segurança bastante elevados, não sendo considerada uma situação crítica.

- Fase Propagação

Para esta fase as dimensões apresentaram maior magnitude que as anteriores, além dos efeitos da água se mostrarem mais aparentes com a presença de sulcos bem definidos e perda de volume de solo mais acentuada nas faces dos taludes .

Devido aos fatores citados os valores obtidos para os fatores de segurança foram menores que os da fase inicial, sendo os taludes de 25 a 30 os mais críticos estando alguns deles muito próximos da instabilidade ($FS < 1$) na condição de nível freático elevado.

Na tabela 15 estão demonstrados os fatores de segurança obtidos para todas as análises, sendo destacados aqueles em estados mais críticos ($FS < 1,5$) para a condição adotada.

Tabela 15 – Fatores de segurança obtidos para taludes na fase de propagação da voçoroca

Talude	Altura(m)	Nível d'água no pé do talude			Nível d'água meio do talude		
		Fellenius	Bishop	Morgenstern - Price	Fellenius	Bishop	Morgenstern - Price
6	6,99	3,47	3,64	3,62	2,88	2,76	2,74
7	6,35	3,91	4,10	4,07	3,48	3,44	3,42
8	8,28	2,98	3,17	3,12	2,42	2,26	2,22
9	7,55	3,19	3,40	3,35	2,92	2,84	2,79
10	8,55	2,96	3,15	3,11	2,46	2,31	2,28
11	7,59	3,10	3,34	3,31	2,50	2,44	2,42
12	9,15	2,74	2,92	2,89	2,43	2,34	2,30

Talude	Altura(m)	Nível d'água no pé do talude			Nível d'água meio do talude		
13	8,19	3,11	3,32	3,29	2,72	2,66	2,62
14	10,62	2,61	2,83	2,79	2,33	2,27	2,32
15	10,22	2,56	2,78	2,75	2,37	2,36	2,33
21	8,10	2,99	3,19	3,16	2,81	2,81	2,76
22	8,30	2,82	3,01	2,98	2,39	2,38	2,35
23	10,18	2,65	2,85	2,82	2,37	2,30	2,26
24	7,71	2,48	3,76	3,73	3,17	3,18	3,15
25	8,35	3,22	3,48	3,44	2,93	3,12	3,09
26	12,67	1,52	1,52	1,56	1,49	1,35	1,43
27	14,20	1,49	1,43	1,46	1,18	1,08	1,15
28	11,30	1,66	1,67	1,72	1,59	1,54	1,59
29	12,15	1,69	1,70	1,62	1,59	1,48	1,56
30	11,54	1,65	1,59	1,66	1,59	1,47	1,54

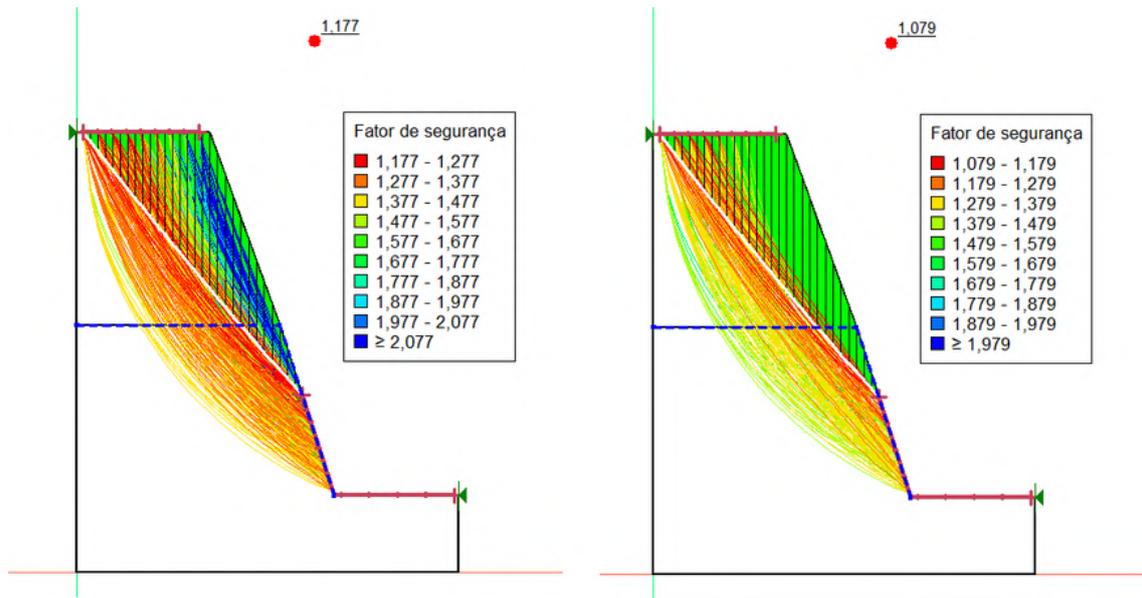
Fonte: Próprio autor

- Fatores que influenciam nos resultados obtidos

1) Método de análise adotado

A partir dos resultados e da interação realizada no software é possível perceber diferenças entre os métodos, o método de Fellenius, foi aquele que apresentou menores resultados para o nível de água na base do talude, provavelmente devido as suas considerações para realizar o cálculo. Entretanto, para a condição de nível de água no meio da altura do talude apesar de os valores se mostrarem próximos o método de Bishop foi o que apresentou menores valores, conforme exemplo da Figura 26.

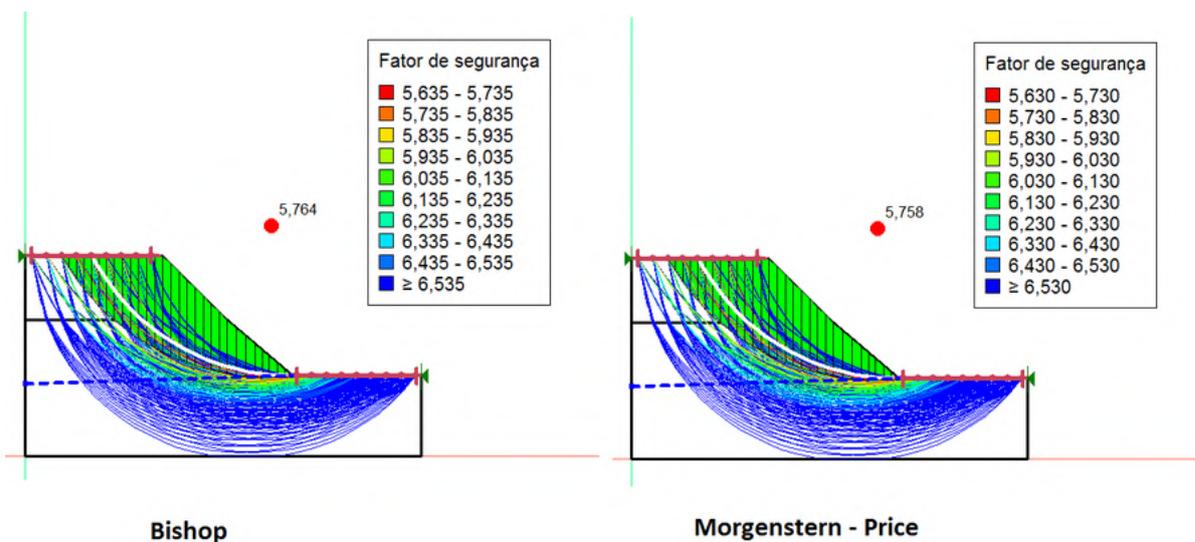
Figura 26 – Diferenças dos valores obtidos para o mesmo talude 27



Fonte: SLOPE/W

Os métodos de Bishop e Morgenstern - Price tiveram resultados mais conservadores e com valores muito próximos sendo em alguns praticamente iguais como o exemplo da Figura 27. Apesar da diferença entre os métodos a variação dos resultados se manteve entre 0,10 a 0,50.

Figura 27 – Diferença dos valores obtido para o mesmo talude 4



Fonte: SLOPE/W

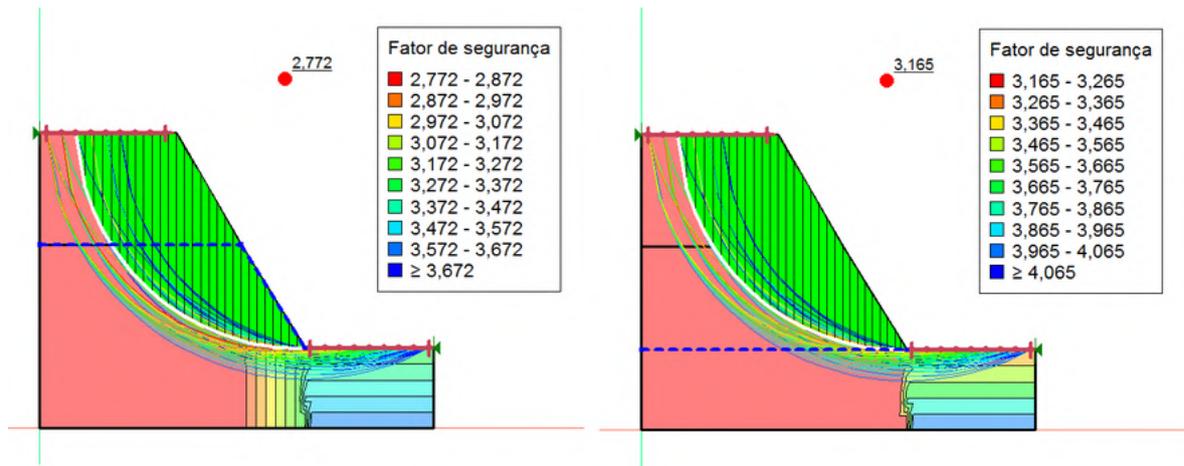
2) Altura do lençol freático

Outro fator que tem grande influência sobre a estabilidade de um talude é o efeito da água, mais especificamente a altura do nível freático. Para esta pesquisa todos os taludes

foram submetidos a essa variação da cota d'água, permitindo observa que a maioria dos taludes apresentou redução do fator de segurança, não ultrapassando, porém, uma variação de 0,5 a 1,0.

A Figura 28 demonstra um exemplo em que utilizando o mesmo talude (8) e o mesmo método (Bishop) os resultados se mostraram bem diferentes. Na figura é possível visualizar as isolinhas da carga total de água, separando as regiões mais críticas daquelas de menor influência

Figura 28 – Diferença dos resultados variando o nível freático

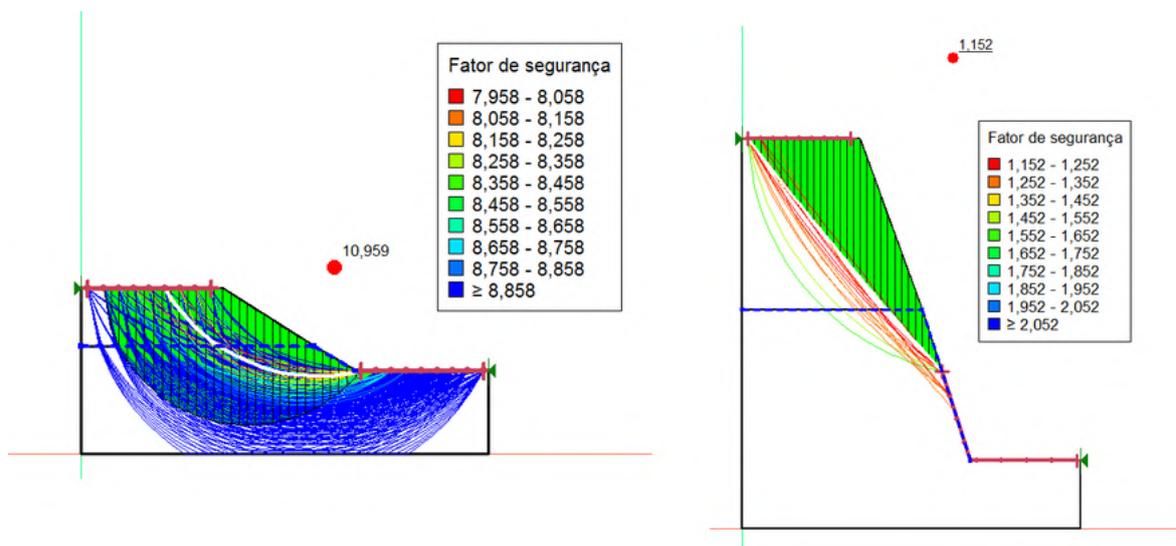


Fonte:SLOPE/W

3) Altura dos taludes

Um dos parâmetros analisados que apresentou grande relevância nas análises foi a altura dos taludes, possui um gradiente de fatores que para as mesmas condições adotadas, alcançou uma ampla variação conforme pode ser observado na Figura 29, no qual foi adotado o método de Bishop e altura do nível freático na crista do talude.

Figura 29 – Diferença de fatores de segurança em função da altura do talude

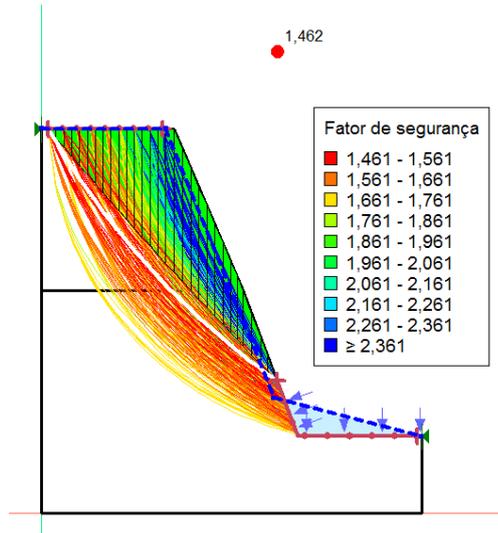


Fonte:SLOPE/W

4) Espessura das camadas

Outro fator significativo diz respeito a espessura das camadas, para esta pesquisa adotou-se a divisão entre as camadas situando na metade da altura dos taludes, conforme exemplo da Figura 30.

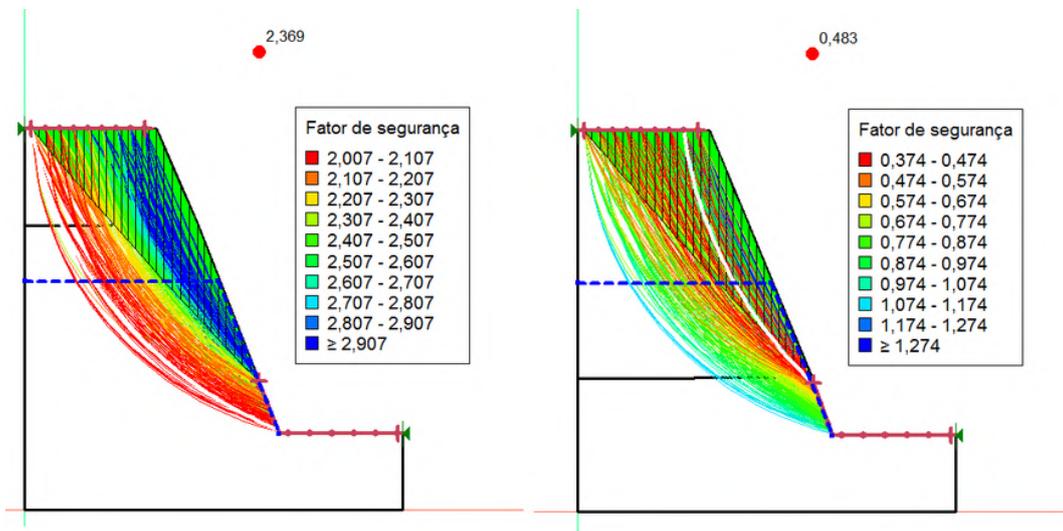
Figura 30 – Talude 29 com a divisão entre as camadas de solo na metade da altura



Fonte: SLOPE/W

Porém, ao analisar como exemplo o talude 29, um dos que possuem maiores alturas e fator de segurança crítico, utilizando as mesmas condições (nível freático na crista do talude) e método de análise (Fellenius). Se for feita a variação somente da espessura das camadas é possível visualizar na Figura 31 um aumento do fator de segurança ao se adotar a maior parte do talude para o material mais profundo, enquanto que se for adotado o talude constituído somente do material superficial a análise indica que este já deveria ter se rompido.

Figura 31 – Diferença de fatores de segurança para variação da espessura da camada



Fonte: SLOPE/W

5 CONCLUSÕES

Ao avaliar o cenário dos processos erosivos pode se perceber a variedade de áreas e processos por eles afetados, bem como sua magnitude e complexidade dos fatores envolvidos. Nesse tipo de situação é fundamental possuir o maior número de informações possíveis para prevenção ou adoção da melhor medida corretiva para cada tipo de caso.

Nesse sentido o trabalho contribuiu levantando um breve histórico sobre a origem e desdobramento do processo, mas principalmente com a obtenção de dados que podem ajudar futuramente na tomada de decisões.

A inspeção em campo da área de estudo permitiu confrontar o que esta presente na literatura com o que de fato ocorreu com este processo, bem como a diferença existente entre as fases adotadas da erosão.

Na fase inicial foi possível observar como o canal atuando como um escoamento concentrado de grande vazão fez com que o efeito da água tanto na forma de escoamento superficial como por percolação, acabassem diminuindo a resistência do solo, causando a instabilidade do maciço. Também foi possível observar como as soluções adotadas pelo poder público não foram efetivas, sendo carregadas pela vazão da água como as rochas ou se mostraram insuficientes para conter o problema como a estrutura de dissipação de energia.

Para a fase de propagação observou-se que de fato os efeitos sobre o leito do córrego Brejo Comprido somados com o efeito do seu afluente apresentaram maiores magnitudes. Pode-se observar muito bem a divisão entre as camadas de solo com colorações bem definidas, a presença numerosa de sulcos sobre a face dos taludes demonstrando a existência do escoamento superficial e o colapso de maciços de solo expostos na face que podem ser devidos a pressão exercida pelo escoamento intenso.

Todos esses fatores somados fizeram com que a erosão linear evoluiu-se até o estágio atual, dando origem a necessidade de uma pesquisa em avaliar a estabilidade dessa área para prevenir possíveis movimentações do solo.

Destaca-se ainda que o processo erosivo além de inutilização da área, têm contribuído para o agravamento de outro problema no cenário ambiental, o assoreamento do lago do parque Cesamar, por meio do carreamento das partículas de solo com as águas pluviais, tendo como destino o corpo hídrico.

As demais fases do trabalho também apresentaram contribuições, a definição da geometria dos taludes com a inspeção em campo permitiu determinar as dimensões alcançadas atualmente pelo processo erosivo, possuindo atualmente larguras que podem chegar até aproximadamente 25 metros e um comprimento de aproximadamente 720 metros, sendo que este último vai desde a origem do problema, até o lago do parque.

Já a caracterização do solo mostrou a composição dos materiais estudados, ambos com uma grande quantidade de grãos arenosos, porém, o solo superficial se mostrou mais instável que o profundo devido à baixa concentração de material argiloso em sua composição, não apresentando uma coesão entre suas partículas, que resulta numa maior susceptibilidade ao rompimento.

Dentre os parâmetros avaliados, aqueles que apresentaram maior relevância para as análises realizadas, foram a altura dos taludes e a espessura das camadas. A variação dos fatores de segurança ao se modificar esses valores se mostrou bastante significativa, sendo a situação de grandes alturas combinadas com uma grande espessura do solo superficial o estado mais crítico, podendo alcançar o estado de desequilíbrio do maciço.

Com a análise foi possível concluir que os taludes se mostraram estáveis em sua maioria, entretanto, para algumas condições específicas os valores se mostraram instáveis sendo para estes casos recomendado a adoção de medidas de contenção, principalmente em áreas de maior predominância do solo superficial.

As soluções para a voçoroca devem prever desvio da água pluvial que atinge a área por meio da construção de um canal artificial ou outra forma de desvio do fluxo, apesar de a água não ter sido identificado na análise como um dos principais fatores de instabilidade seu efeito para a continuidade da deflagração do processo ainda é considerável.

As medidas sugeridas para recuperar o solo propriamente dito, seriam um retaludamento das áreas críticas, devido o efeito da altura na análise da estabilidade, além de um revestimento da fase ou contenção do solo superficial.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Referências. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.** Referências. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento.** Referências. Rio de Janeiro, 2016.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., LIMA, M.C. & MORTARI, D. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. 7.º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Goiânia, GO. 2001.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SOUZA, N. M.; SALES, M. M.; SILVA, M. T. da. (2006). Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília, DF: Editora FINATEC.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. ; FAZIO, J. A. ; GOUTTE-LIMA, Marisaides ; JESUS, A. S. ; MORTARI, D. ; NOGUEIRA, Jairo Furtado ; SANTOS, R. M. M. . Erosão dos solos. In: José Camapum de Carvalho; Manoel Porfírio Cordão Neto, Larissa Andrade de Aguiar. (Org.). Livro Comemorativo dos Vinte Anos do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília. 1ed.Brasília: FT, 2009, v. 1, p. 155-175.

CAMPELO, Nilton de Souza et al. Verificação de estabilidade de taludes sujeitos a voçorocas, na cidade de Manaus. In: 10.º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL., 2002, Ouro Preto - MG. Artigo Técnico [...]. researchgate: Researchgate, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280804970_VERIFICACAO_DE_ESTABILIDADE_DE_TALUDES_SUJEITOS_A_VOCOROCAS_NA_CIDADE_DE_MANAUS. Acesso em: 20 jun. 2019.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações. Rio de Janeiro, (7ª edição), 2015.

DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 7ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011

ENGESTAB. Revestimento de Taludes. [S. l.], 11 ago. 2016. Disponível em: <https://www.engestab.com.br/revestimento-taludes>. Acesso em: 11 dez. 2019.

FRITSCHER, Ester Cristina. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE TEUTÔNIA/RS. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em engenharia civil) - Curso de engenharia civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016. Disponível em: <https://docplayer.com.br/55978211-Analise-de-estabilidade-de-talude-estudo-de-caso-no-municipio-de-teutonia-rs.html>. Acesso em: 1 maio 2019.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel, 1983, Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação, Blucher, 2.ª edição, São Paulo, Brasil.

HORST, R. Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade de taludes em maciço terroso. Ijuí, Rio Grande do Sul, 2007, 129p.

MACHADO, Sandro Lemos, MACHADO, Miriam de Fátima. Mecânica dos solos II: Conceitos introdutórios. Salvador, 1997.

OLIVEIRA, W. L. de M. Estudo crítico sobre o eia/rima do parque Cesamar com relação às medidas mitigadoras previstas após a sua implantação. 1998. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 1998.

PALMAS. Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas - TO. Palmas: Prefeitura Municipal de Palmas: Secretaria de Assuntos Jurídicos, 2014. v. III.

PINTO, Carlos de Sousa, 2002, Curso Básico de Mecânica dos Solos, Ed. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

QUEIROZ, R. C. Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil. São Carlos: RiMa, 2009. 392 p.

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. Disponível em: . Acesso em: 15 set. 2018.