



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

João Pedro Noleto Barbosa

ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO PREVENTIVA DE UM TALUDE EM ZONA
URBANA NA CIDADE DE PALMAS, TOCANTINS.

Palmas – TO

2019

João Pedro Noleto Barbosa
ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO PREVENTIVA DE UM TALUDE EM ZONA
URBANA NA CIDADE DE PALMAS, TOCANTINS.

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II do curso de bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Profa. Esp. Kênia Parente Lopes Mendonça.

Palmas – TO

2019

João Pedro Noleto Barbosa

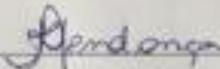
ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO PREVENTIVA DE UM TALUDE EM
ZONA URBANA NA CIDADE DE PALMAS, TOCANTINS.

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado
como requisito parcial para aprovação na
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) II do curso de bacharelado em Engenharia
Civil do Centro Universitário Luterano de
Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Profa. Esp. Kênia Parente Lopes
Mendonça

Aprovado em: ____/____/____

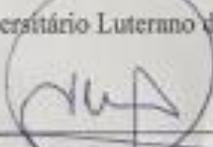
BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Kênia Parente Lopes Mendonça

Orientador

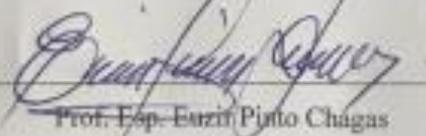
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. M.Sc. Jocélio Cabral Mendonça

Avaliador 1

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. Esp. Euzil Pinto Chagas

Avaliador 2

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2019

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Exemplo de aplicações de estudos de estabilidades.	13
Figura 2- Representação dos elementos de um talude.....	14
Figura 3 - Escala de Varnes.....	14
Figura 4 Elementos que configuram massa escorregada.....	16
Figura 5 Condição de ruptura por escorregamento	17
Figura 6 Curva de deslizamento formada por da/dl	18
Figura 7 Forças normais e de cortes em uma fatia genérica.....	20
Figura 8 Método de Spencer - Diagrama de Corpo Livre	21
Figura 9 Exemplo de terminação do FS pelo método de Spencer.....	22
Figura 10 Método de Morgenstern - Price - Diagrama de Corpo Livre	23
Figura 11 Seção transversal de uma cortina atirantada	26
Figura 12 Cortina atirantada na recomposição de uma rodovia	26
Figura 13 Esquema das partes de um tirante	27
Figura 14 Ensaio de Protensão	28
Figura 15 Modos de ruptura de uma cortina atirantada.....	29
Figura 16 Forças atuantes na massa de solo	31
Figura 17 Esquema de recomendações de Projeto	32
Figura 18 Distância do bulbo até fundações adjascentes	33
Figura 19 Representação da estabilidade global.....	33
Figura 20 Variações de Geossintéticos.....	34
Figura 21 Exemplo de Geocélula	35
Figura 22 Geocélula instalada em um talude.....	36
Figura 23 Preparação do Talude para Instalação da Geocélula.....	37
Figura 24 Processo de instalação da geocélula.....	37
Figura 25 Esquema para dimensionamento pelo método Rimoldi e Ricciuti (1994).....	38
Figura 26 Localização da Área de Estudo	44
Figura 27 Talude : Situação Preexistente	47
Figura 28 Talude : Situação Preexistente	47
Figura 29 Talude : Erosão Superficial Preexistente	48
Figura 30 Talude 1: Situação Atual	48
Figura 31 Leitura de Coordenadas C7 GPS Dados	45
Figura 32 Talude 1: seção transversal	49

Figura 33 Curva granulométrica do solo	50
Figura 34 Retroanálise em condição saturada	52
Figura 35 Seção do talude de projeto	52
Figura 36 Detalhamento dos tirantes	53
Figura 37 Fator de Segurança - Cortina Atirantada.....	54
Figura 38 Estabilidade talude berma inferior	57
Figura 39 Estabilidade berma superior	57
Figura 40 Estabilidade berma inferior reforçada com geocélula.....	58
Figura 41 Estabilidade berma superior reforçada com geocélula.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de VARNES (1978) dos movimentos de massa	15
Quadro 2 - Classificação de CAPUTO et al. (2015) dos movimentos de massa	15
Quadro 3 Fatores de Segurança Mínimos	19
Quadro 4 Características dos métodos das lamelas	20
Quadro 5 Aplicações dos Geossintéticos.....	34
Quadro 6 Fluxograma das etapas de estudo	43
Quadro 7 Composição granulométrica do solo dos taludes	50
Quadro 8 Limites de Atterberg.....	51
Quadro 9 Classificação do solo	51
Quadro 10 Correlações empíricas.....	51
Quadro 11 Dimensionamento dos tirantes.....	53
Quadro 12 Características técnicas das geocélulas utilizadas para o dimensionamento.....	55
Quadro 13 Dimensionamento da geocélula: berma inferior.....	55
Quadro 14 Dimensionamento da geocélula: berma superior.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
PE	Poliétileno
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PEAD	PEAD

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Numero de grampos
c	Coesão
d_{ab}	Distância euclidiana
d_p	Espaçamento entre grampos
E	Força horizontal entre fatias
E_p	Estabilidade no pé do talude
FS	Fator de Segurança
F	Força
H	Altura do talude
J_{min}	Resistência da solda ao cisalhamento
L	Comprimento do talude
M	Momento
m/s	Metros por segundo
m/min	Metros por minuto
m^2	Metros quadrados
P	Peso do corpo do talude
Q	Resultante entre esforços normais e cisalhantes na fatia
R_T	Força resistente resultante
R_{crista}	Força resistente na crista
R_p	Força resistente na solda
R_g	Resistência à tração da grelha
W	Peso
α	ângulo formando comprimento da curva e plano horizontal
τ_f	Resistência ao cisalhamento
τ_{mob}	Tensão cisalhante mobilizada
γ	Massa específica
φ	Ângulo de atrito
Σ	Somatório
σ_{adm}	Tensão admissível
w	Ângulo de inclinação do talude
ρ	Raio da curvatura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.2 HIPÓTESES	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 JUSTIFICATIVA	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 DEFINIÇÃO DE TALUDE	13
2.2 MOVIMENTOS DE MASSA	14
2.2.1 Escorregamentos.....	16
2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES	17
2.3.1 Método das Lamelas.....	19
2.3.2 Método de Spencer	21
2.3.3 Método de Morgenstern-Price.....	22
2.4 SOLUÇÕES PARA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES.....	24
2.4.1 Cortina Atirantada	24
2.4.1.1 Características e Detalhes Construtivos	25
2.4.1.2 Elementos e Instalação de Uma Cortina.....	27
2.4.1.3 Dimensionamento Das Cortinas Atirantadas.....	29
2.4.1.4 Recomendações Na Elaboração Do Projeto	32
2.4.1.5 Considerações	33
2.4.2 Geocélula Preenchida Com Solo	34
2.4.2.1 Características e Detalhes Construtivos	35
2.4.2.2 Elementos E Instalação De Um Painél de Geocélulas	37
2.4.2.3 Dimensionamento Das Geocélulas em Taludes	38
2.4.2.4 Considerações	42
3 METODOLOGIA.....	43
3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS PREEXISTENTES	44
3.1.1 Descrição da área de estudo.....	44
3.1.2 Caracterização Geométrica	45
3.1.1 Caracterização Geotécnica	45
3.2 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMECÂNICO	46

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 LEVANTAMENTOS DE DADOS PRÉ EXISTENTES.....	47
4.1.1 Inspeção Visual	47
4.1.2 Caracterização Geométrica	49
4.1.3 Caracterização Geotécnica	49
4.1.4.1 Correlações empíricas	51
4.1.4.2 Retroanálise	51
4.2 DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES PARA ESTABILIZAÇÃO.....	52
4.2.1 Dimensionamento da cortina atirantada.....	52
4.2.2 Dimensionamento da geocélula preenchida com solo	54
5 CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS	61

RESUMO

O presente trabalho teve como objeto de estudo um talude localizado em uma zona residencial do município de Palmas – TO. Este talude até o momento do estudo não colapsaram, porém, por não possuir nenhum tipo de tratamento de estabilização, encontra-se em situação de risco. O objetivo deste estudo então foi o desenvolvimento de um modelo geotécnico que pudesse representar esse talude e o dimensionamento de duas soluções de engenharia para sua estabilização (cortina atirantada e geocélula preenchida com solo). O modelo foi elaborado via GPS e uma retroanálise, a partir de correlações empíricas associadas ao software SLOPE/W. Os dimensionamentos foram realizados através de métodos clássicos: Método Brasileiro de Atirantamento e o método Rimoldi e Ricciuti (1994) para geocélulas e a verificação da estabilidade de ambos foram feitas também no SLOPE/W. Os resultados foram satisfatórios na medida em que foi possível fazer o dimensionamento a partir do modelo geotécnico proposto e a verificação da estabilidade foi condizente com o dimensionamento. Além disso, este trabalho trouxe consigo a possibilidade de uma etapa antes do anteprojeto de uma intervenção geotécnica, pois, de posse de um GPS, um software e ensaios básicos de laboratório é possível traçar a melhor alternativa para a exploração geotécnica de um talude.

Palavras Chave: Talude, Geocélula, Cortina Atirantada

ABSTRACT

The present study had as object of study a slope located in a residential zone of the municipality of Palmas - TO. This slope until the moment of the study did not collapse, however, because it does not have any type of stabilization treatment, it is at risk. The objective of this study was the development of a geotechnical model that could represent this slope and the design of two engineering solutions for its stabilization (cable-stayed curtain and geocellula filled with soil). The model was elaborated via GPS and a reanalysis, based on empirical correlations associated with SLOPE / W software. The scoping was done through classical methods: Brazilian Method of Retrieval and the Rimoldi and Ricciuti (1994) method for geocells and verification of stability of both were also done in SLOPE / W. The results were satisfactory in that it was possible to do the sizing from the proposed geotechnical model and the stability check was in agreement with the sizing. In addition, this work brought with it the possibility of a step before the preliminary design of a geotechnical intervention, since, with GPS, software and basic laboratory tests, it is possible to draw the best alternative for the geotechnical exploration of a slope.

Keywords: Slope, geocell, Curtain cable-stayed

1 INTRODUÇÃO

Deslizamentos de terra ocorrem de formas variadas e em diferentes estágios de desenvolvimento, além de envolver uma gama de processos e fatores de perturbação, o que traz infinitas possibilidades de classificação. (ZÁRUBA&MENCL, 1969). Guidicini e Nieble, (1984) distinguem os agentes e causas de movimentação de massas entre agentes predisponentes e efetivos e causas internas, externas e intermediárias. Isso elucida a complexidade da análise de estabilidade de um talude e a escolha do método de estabilização deste. O método de estabilização, portanto, deve ser escolhido de acordo com, não somente esses agentes e causas, mas também de acordo com as condições de prazos, custos, materiais constituintes, até mesmo impacto ambiental.

O presente trabalho teve como objeto de estudo um talude localizado em uma zona residencial do município de Palmas – TO. Este talude se encontra ainda estável, porém, por não possuir nenhum tipo de tratamento de estabilização, já apresenta princípios de degradações decorrentes, principalmente, das ações das águas pluviais.

Escolheu-se esse tema, pois movimentos coletivos de solo e rochas são responsáveis por grandes tragédias. Estes eventos são de maior impacto quando atingem áreas urbanas, seja em encostas ou taludes adjacentes a áreas ocupadas; a consequência de um eventual colapso pode ser catastrófica e possivelmente trará danos sociais e ambientais irreversíveis.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

É possível dimensionar e modelar duas alternativas para estabilização de um talude de sem nenhum tipo de intervenção de melhorias localizado em área urbana e apontar as principais diferenças com relação ao Fator de Segurança obtido?

1.2 HIPÓTESES

O talude que foi objeto de estudo deste trabalho conta apenas com o solo compactado como elemento estrutural. Taludes, tanto de corte, quanto de aterro precisam de intervenções que acarretem no aumento de sua estabilidade, prevenindo, assim, sua ruptura. Sendo assim, teve-se como hipóteses ao problema proposto que a partir de informações geométricas e geotécnicas do talude, contando ainda com o auxílio de softwares de modelagem numérica, é possível verificar a estabilidade do talude na situação atual e após as propostas de intervenção e ainda apontar qual proposta trará maior estabilidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Propor duas alternativas para estabilização de um talude localizado em área residencial em Palmas, Tocantins e apontar as principais diferenças com relação ao Fator de Segurança.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a área de estudo através do levantamento de informações pré-existentes;
- Dimensionar duas alternativas de estabilização: Cortina Atirantada e Geocélula Preenchida com solo e vegetação;
- Modelar duas alternativas de estabilização para verificação e validação de seus dimensionamentos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Sendo o solo um material heterogêneo e complexo – o que traz um caráter singular para empreendimento - não é possível estabelecer uma solução ideal para a maioria dos problemas de estabilização, preventiva ou após colapso. Além disso, o estudo de um talude ou encosta, no que se refere a ensaios laboratoriais, de campo e levantamento topográfico, acaba sendo oneroso e demandando muito tempo e ainda com possibilidade de erros desde a coleta de amostras, até mesmo na execução dos ensaios.

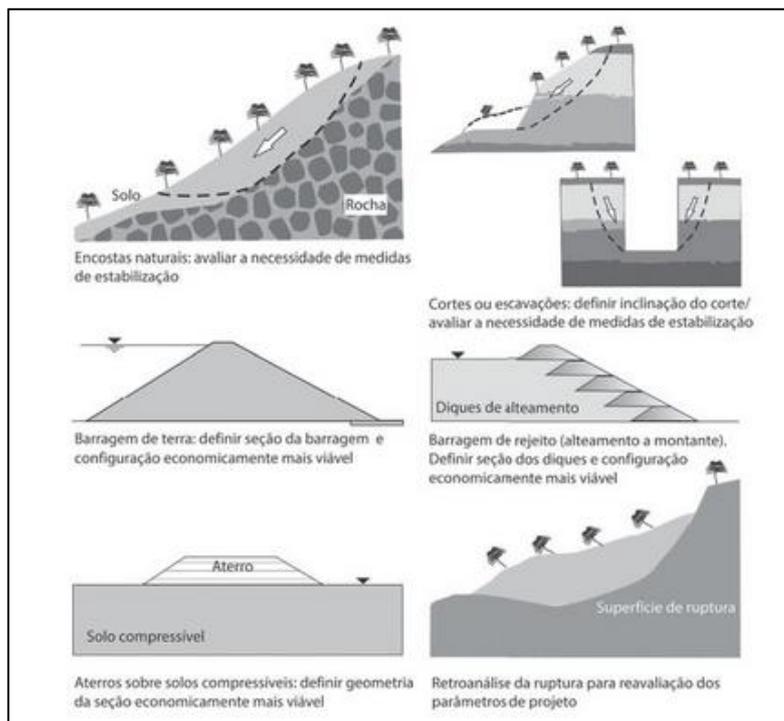
Torna-se relevante então uma proposta de verificação do dimensionamento de duas alternativas para a estabilização preventiva de um talude de aterro já executado contando com a verificação dos dimensionamentos a partir de uma modelagem numérica realizada através de um software comumente utilizado na engenharia geotécnica. Também é interessante realizar um estudo preliminar a partir de uma retroanálise, pois, com informações geométricas obtidas por um GPS e geotécnicas a partir de ensaios de laboratório elementares e correlações empíricas é possível que se economize tempo e dinheiro na medida em que esse estudo pode indicar de antemão a melhor área de coleta de amostras indeformadas e ensaios de campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO DE TALUDE

Entende-se por talude como toda superfície inclinada que delimita um maciço rochoso ou de terra, natural (encosta) ou construída pelo homem (corte e aterro). (CAPUTO et al., 2015).

Figura 1- Exemplo de aplicações de estudos de estabilidades.



Fonte: Gerscovich (2016)

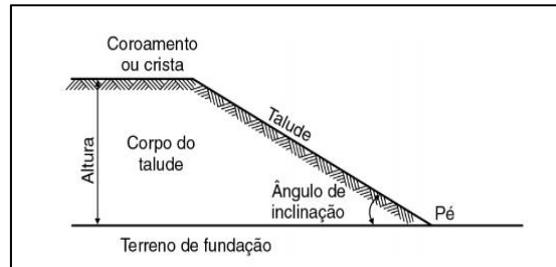
Taludes naturais ou encostas podem ser constituídos de rochas, solo residual e (ou) solo coluvionar, sendo o solo residual aqueles que permanecem no local onde foi formado e o coluvionar aquele que foi transportado, principalmente, pela ação gravitacional. Taludes construídos são resultados de cortes e aterros. Os taludes de cortes são aqueles formados pela retirada de material. Devem ser construídos com inclinação e altura definida a fim de que se garanta sua estabilidade e seu projeto é regido pelas propriedades geomecânicas do solo cortado e suas condições de fluxo.

Os taludes de aterros são necessários quando o solo de fundação não conta com capacidade de suporte adequada ou quando o terreno não se encontra nivelado. São comumente utilizados em projetos de barragens de terra e obras rodoviárias. Em taludes de aterro, como já se tem conhecimento das propriedades geotécnicas do material aterrado, os

cálculos de estabilidade se tornam mais precisos em comparação aos taludes de corte. (GERSCOVICH, 2016).

Os elementos constituintes de um talude, de acordo com Caputo et al. (2015), são: coroamento (crista), corpo, ângulo de inclinação, pé altura. Conforme esquema representado na figura abaixo:

Figura 2- Representação dos elementos de um talude

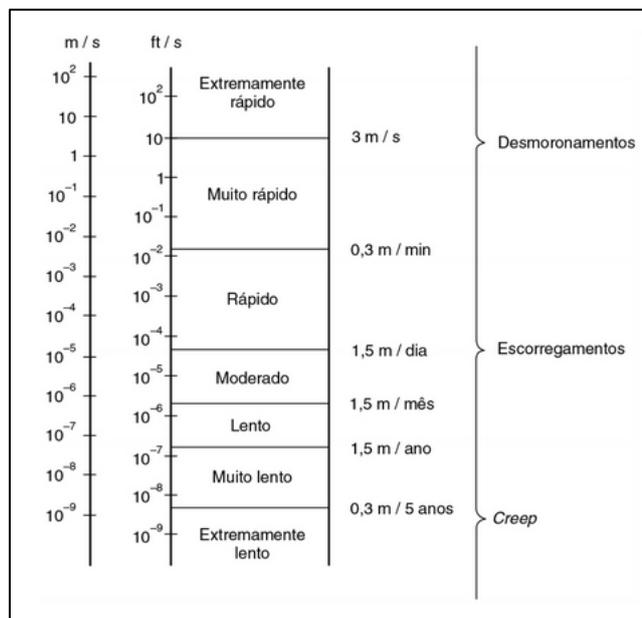


Fonte: Caputo et al. (2015)

2.2 MOVIMENTOS DE MASSA

Todo deslocamento de solo que ocorre em um talude ou encosta é considerado um movimento de massa e geralmente está associado a problemas de instabilidade dessas estruturas.

Figura 3 - Escala de Varnes



Fonte: Caputo et al. (2015)

A classificação destes movimentos coletivos de massa passou por várias metodologias ao longo dos anos e teve várias propostas de sistemas classificatórios. VARNES (1958) desenvolveu uma escala de classificação dos deslocamentos de terra em relação à velocidade com que estes movimentos ocorrem.

Quadro 1 - Classificação de VARNES (1978) dos movimentos de massa

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De Rocha	De detritos	De terra
Tombamento			De Rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas Unidades	Abatimento de Rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra De blocos de terra De terra
			de Blocos rochosos	De Blocos de detritos	
	Translacional	Muitas Unidades		De Rocha	De detritos
			De Rocha	De detritos	De terra
Expansões Laterais			De Rocha	De detritos	De terra
Corridas/escamentos			De Rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra (Rastejo de Solo)
Complexo			Combinação de um ou mais tipos de movimentos		

Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016)

O sistema de classificação que é mais comumente utilizado pelos pesquisadores é o de Varnes (1978), em que se subdividem os movimentos em queda, tombamento, escorregamento e complexo, sendo aplicável tanto para solos, quanto rochas. (GERSCOVICH, 2016).

CAPUTO et al. (2015) classifica estes movimentos de maneira mais sucinta, dividindo-o em três grupos:

Quadro 2 - Classificação de CAPUTO et al. (2015) dos movimentos de massa

Tipo de Movimento	Definição
Desprendimento de terra ou rocha	Fenômeno localizado caracterizado pelo desprendimento de porção do maciço terroso que cai livremente em baixas velocidades e se acumula onde estaciona.
Escorregamento (<i>landslide</i>)	Deslocamento de massa em alta velocidade em superfície de deslizamento após ruptura. Divide-se em <i>Escorregamento rotacional</i> para solos coesivos e <i>Escorregamento translacional</i> para maciços rochosos estratificados.
Rastejo (<i>Creep</i>)	Deslocamento contínuo de camadas superficiais que ocorrem lentamente podendo ou não haver limite entre a quantidade de material que se movimenta e que permanece parada. É identificável a partir de curvaturas de árvores ou inclinações de postes.

Fonte: Adaptado de CAPUTO et al (2015)

2.2.1 Escorregamentos

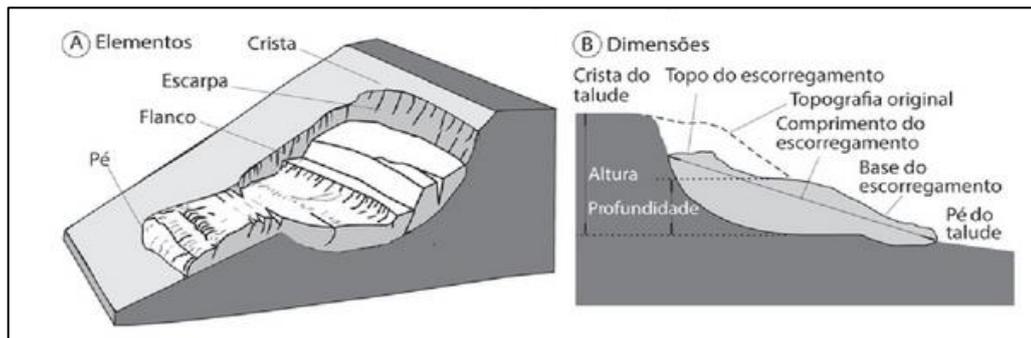
Por se tratar de um movimento de massa de grande impacto devido à alta velocidade com que ocorre, o escorregamento é digno de maior detalhamento de análise. Estando o Brasil situado em região tropical-úmida, geralmente, suas bordas das regiões montanhosas possuem vasta vegetação pluvial e frequentemente testemunham escorregamentos, certa vezes até catastróficos. (GUIDICINI&NIEBLE, 1984).

No que tange aos escorregamentos em taludes Caputo et al (2015) afirma

Se a superfície de deslizamento passar acima ou pelo pé do talude, será um escorregamento superficial ou ruptura do talude, e se passar por um ponto afastado do pé do talude, escorregamento profundo, ruptura de base ou ruptura sueca (por ter sido observado pela primeira vez nos acidentes ocorridos durante a construção das ferrovias suecas).

Gerscovich (2016) detalhou os elementos que configuram um escorregamento como são descritos na NBR 11682 (ABNT, 2009):

Figura 4 Elementos que configuram massa escorregada

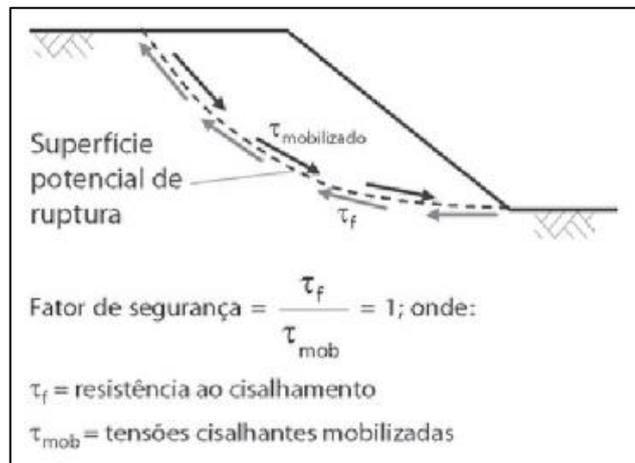


Fonte: Gerscovich (2016)

As causas gerais dos escorregamentos advêm de uma instabilidade que ocorre quando tensões de cisalhamento se igualam ou superam a resistência do maciço a estas tensões. (GERSCOVICH, 2016). Para Caputo et al (2015) há dois tipos causas que ocasionam escorregamentos, externas e internas. A primeira se trata de um acréscimo no peso próprio do talude, seja por cargas aplicadas ou acréscimo de umidade em épocas de chuva. A segunda é a perda de resistência ao cisalhamento do material constituinte do talude.

De qualquer maneira o escorregamento ocorrerá quando o fator de segurança deste talude for menor ou igual a 1.

Figura 5 Condição de ruptura por escorregamento



Fonte: Gerscovich (2016)

Os agentes deflagradores dos movimentos de massa podem ser divididos em dois grandes grupos. No primeiro grupo encontram-se os fatores internos, ou seja, aumento na sollicitação do talude. Isso pode ser ocasionado por perda de massa (erosões, cortes e escorregamentos), sobrecarga (peso da água da chuva, acúmulo de massa, construções não previstas), sollicitações dinâmicas (terremotos, explosões, tráfego) e pressões laterais (materiais expansivos, congelamento e água em trincas). O segundo grupo, fatores externos, contém agentes responsáveis pela redução da resistência ao cisalhamento, são eles: características intrínsecas do material (propriedades geomecânicas) e ações variáveis (ações do intemperismo, variações na poropressão, elevação do lençol freático, *pipping*). (Varnes, 1978 apud GERSCOVICH, 2016).

2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES

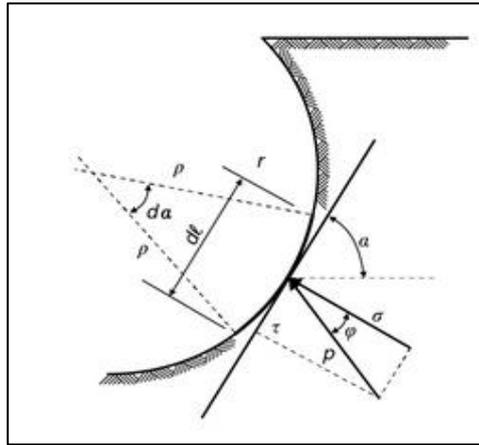
A análise de estabilidade de taludes se dá a partir do estudo de tensões internas e externas. Um talude é considerado como uma massa de solo submetida a três grupos de forças distintas são elas: peso próprio, escoamento da água e resistência ao cisalhamento. Sendo assim, existem dois métodos fundamentais de análises de estabilidade de taludes: métodos de análises de tensões e métodos de equilíbrio limite. (Caputo et al, 2015).

O método de análises de tensões consiste basicamente em determinar tensões em todos os pontos do meio e comparar com a resistência ao cisalhamento ao longo da mesma superfície. Essa relação foi descrita pela primeira vez pelo professor Fritz Kötter em 1888 para solos não coesivos. A Equação básica de Kötter (1) trata-se de uma equação diferencial de primeira ordem:

$$\frac{dp}{dl} - 2p \tan \varphi \frac{d\alpha}{dl} - \gamma \sin(\alpha - \varphi) = 0 \quad (1)$$

p é a tensão resultante sobre o elemento dl da curva de deslizamento, φ representa o ângulo de atrito interno, γ o peso específico do solo e α o ângulo formando entre dl e o plano horizontal.

Figura 6 Curva de deslizamento formada por $d\alpha/dl$



Fonte: Caputo et al (2015)

Para solos coesvivos esta equação também é válida, sendo $\tau = p \sin \varphi$, tem-se:

$$\frac{d\tau}{d\alpha} - 2\tau \tan \alpha + \gamma \rho \sin \varphi \sin(\alpha - \varphi) = 0 \quad (2)$$

em que ρ é o raio da curvatura. Esta equação foi demonstrada por Jáký (1936) e, portanto, trata-se da Equação Básica de Kötter em função das tensões de cisalhamento. (Caputo et al, 2015).

Os métodos do equilíbrio limite são baseados na teoria homônima, a Teoria de Equilíbrio Limite. Ela dá base de cálculo para esses métodos estimando o equilíbrio de uma massa de solo a partir de um fator de segurança. Ferreira (2012) elucida que o fator de segurança pode ser calculado de três maneiras: equilíbrio das forças, momentos e limite ao corte,

$$FS = \frac{\sum F_{estabilizadoras}}{\sum F_{instabilizadoras}} \quad (3)$$

$$FS = \frac{\sum M_{estabilizadores}}{\sum M_{instabilizadores}} \quad (4)$$

$$FS = \int \tau_f / \tau_{mob} \quad (5)$$

O critério de ruptura Mohr-Coulomb é o modelo matemático utilizado para se calcular a tensão cisalhante τ_f que se dá em função da tensão normal σ , onde:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

Sendo assim, retomando o critério de estabilidade apresentado por Gerscovich (2016), para casos gerais têm-se:

- $FS > 1$: talude estável
- $FS = 1$: talude instável
- $FS < 1$: não há significado físico

Porém, a NBR 11682 (ABNT, 2009) estabelece diferentes fatores de segurança para diferentes situações e condições que o talude possa se encontrar. Nela existem critérios dos níveis de segurança de acordo com o risco à perda de vidas humanas e aos danos materiais e ambientais:

Quadro 3 Fatores de Segurança Mínimos

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

Fonte: ABNT (2009)

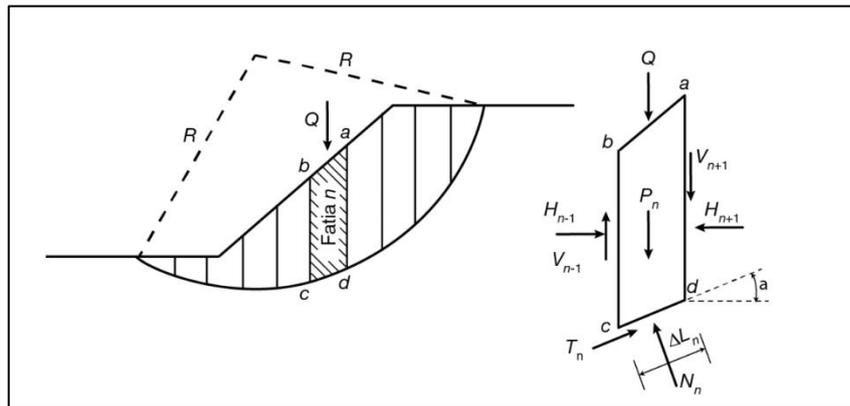
Apesar dessas três possibilidades de determinação dos fatores de segurança, a mais comumente utilizada nos métodos do equilíbrio limite é equação do equilíbrio dos momentos.

2.3.1 Método das Lamelas

Este método é o mais comumente utilizado na análise da estabilidade de taludes, pois, segundo Caputo et al (2015) aplica-se a solos com ângulo de atrito e coesão diferentes de 0. A ideia de se considerar a superfície de deslizamento como circular e se dividir numericamente a massa deslocada em lamelas, ou fatias, foi introduzida no início do século XX. Fellenius

(1936), Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern&Price (1965) e Spencer (1967). Uma das principais razões que fez com que o método das lamelas fosse adotado imediatamente é a possibilidade de se realizar os cálculos à mão. (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2012).

Figura 7 Forças normais e de cortes em uma fatia genérica



Fonte: Caputo et al (2015)

Entretanto, deve-se entender sobre as diversidades desses métodos, observando o grau de consistência matemática no cálculo do fator de segurança, determinando, assim, qual o método mais apropriado para um determinado problema. Um método é tido como rigoroso quando ele, no mínimo, satisfaz as três equações da estática. (FERREIRA, 2012).

O quadro a seguir apresentam os métodos mais tradicionais e quais equações da estática eles satisfazem.

Quadro 4 Características dos métodos das lamelas

Método	Tipo de Superfície	Equilíbrio dos Momentos	Equilíbrio das Forças Horizontais	Equilíbrio das Forças Verticais	Força Normal Entre Fatias (E)	Força Cortante Entre Fatias (X)	Inclinação da Resultante (X/E) / Relação entre força X e E
Fellenius	Circular	Sim	Não	Sim	Não	Não	Inexistente
Bishop Simplificado	Qualquer	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Horizontal
Janbu Simplificado	Qualquer	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Circular	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern-Price	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

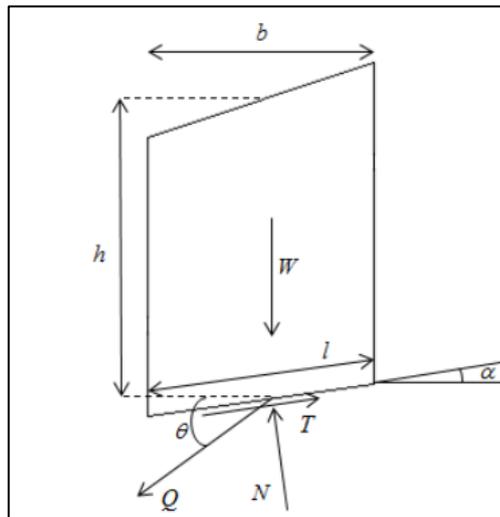
Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

Nota-se, portanto, que os métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Janbu Simplificado são considerados métodos não rigorosos.

2.3.2 Método de Spencer

O Método de Spencer (1967) satisfaz todas as condições de equilíbrio e, portanto, trata-se de um método rigoroso de análise de estabilidade de taludes. É um método aplicado em superfícies circulares, logo, mesmo utilizando as equações de equilíbrio de momento, apresenta simplificações acerca das forças normais e cisalhantes entre as fatias, tratando-as apenas como uma resultante Q que atua no ponto médio da base da fatia com inclinação θ . (FERREIRA, 2012).

Figura 8 Método de Spencer - Diagrama de Corpo Livre



Fonte: Ferreira (2012)

A equação (7) que determina a resultante Q advém da manipulação das equações de equilíbrio, bem como o critério de Mohr-Coulomb:

$$Q = \frac{\frac{lc}{FS} + \frac{(W \cos \alpha - ul) \tan \varphi}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left(1 + \frac{\tan \varphi \tan(\alpha - \theta)}{FS}\right)} \quad (7)$$

A fim de que seja garantido o equilíbrio global o somatório das forças horizontais e verticais devem ser 0 e θ constante (raio constante) para garantir que o número de equações e variáveis sejam iguais.

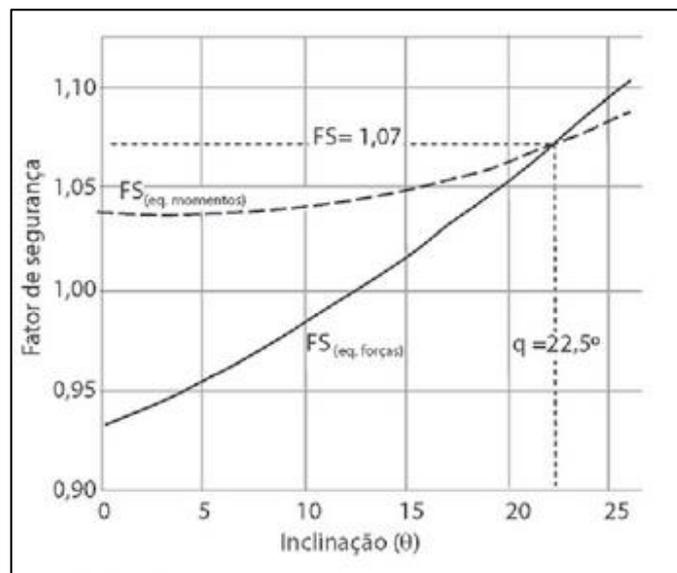
$$\sum Q \sin \theta = \sum Q \cos \theta = \sum Q = 0 \quad (8)$$

Quanto à conservação do momento, sendo o somatório dos momentos das forças externas (R) em relação ao centro nulo, o momento se conserva se o mesmo ocorrer com as forças internas, portanto:

$$\sum [Q \cos(\alpha - \theta)] x R = 0 \quad (9)$$

Então, assumindo um valor de Q para um θ constante, determina-se um fator de segurança para o equilíbrio de forças FS_f pela equação (7), faz-se um processo análogo para o equilíbrio dos momentos, obtendo um FS_m , o valor onde esses FS se cruzarem será o FS global. (GERSCOVICH, 2016).

Figura 9 Exemplo de terminação do FS pelo método de Spencer

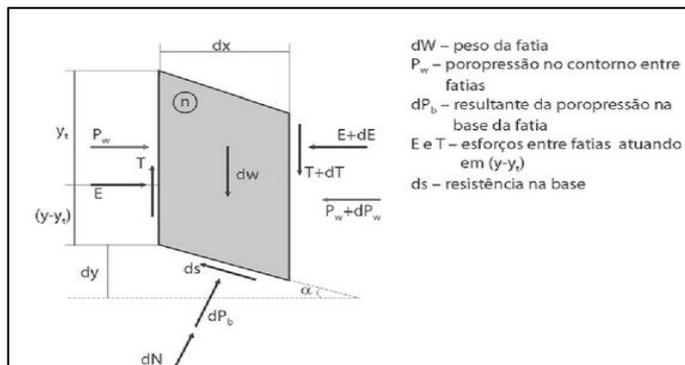


Fonte: Gerscovich (2016)

2.3.3 Método de Morgenstern-Price

O Método de Morgenstern-Price (1965) é um método rigoroso de análise de estabilidade de taludes e o único método clássico que se aplica a superfícies quaisquer e ainda possui a inclinação e relação variável entre da resultante entre as forças normais e cisalhantes entre as lamelas. Portanto, será o método de análise utilizado no presente estudo.

Figura 10 Método de Morgenstern - Price - Diagrama de Corpo Livre



Fonte: Gerscovich (2016)

Diferentemente dos demais métodos rigorosos, o método de Morgenstern-Price assume que a resultante entre as forças de interação (T e E) entre as fatias obedecem uma função ao longo da superfície de ruptura que descreve a variação entre essa relação e um fator de escala λ .

$$T = \lambda f(x)E \quad (10)$$

A função $f(x)$ é escolhida após uma avaliação preliminar sobre como a inclinação das forças entre as fatias variam. Quando se tem um valor nulo para a função, o fator de segurança se assemelha ao método de Bishop e quando esse valor é uma constante, o fator de segurança será equivalente ao obtido pelo método de Spencer. (GERSCOVICH, 2016).

O método é aplicado a partir de equações diferenciais que regem o equilíbrio das forças (11) e dos momentos (12):

$$(y - y_t) \frac{dE}{dx} - E \frac{dy}{dx} + \frac{dP_w}{dx} (y - h) - P_w \frac{dy}{dx} + X_1 = 0 \quad (11)$$

$$\frac{c}{FS} [1 + \tan^2 \alpha] + \frac{\tan \phi}{FS} \left[\frac{dW}{db} + \frac{dX}{db} - \frac{dE}{db} \tan \alpha - u (1 + \tan^2 \alpha) \right] = \frac{dE}{db} + \frac{dX}{db} \tan \alpha + \frac{dW}{db} \tan \alpha \quad (12)$$

A força horizontal entre as lamelas (E) é determinada por uma função definida na equação (13) que está também associada ao critério de Mohr-Coulomb:

$$E(x) = \frac{1}{L+Kx} \left[E_i L + \frac{Nx^2}{2} + Px \right] \quad (13)$$

onde,

- $K = \lambda k \left\{ \frac{\tan \varphi}{FS} + A \right\}$ (14)

- $L = 1 - \frac{A \tan \varphi}{FS} + \lambda m \left(\frac{\tan \varphi}{FS} + A \right)$ (15)

- $N = \frac{\tan \varphi}{FS} [2AW_{w0} + p - r(1 + A^2)] - [2W_w + pA]$ (16)

- $p = \frac{1}{FS} \{ (c - s \tan \varphi)(1 + A^2) + V_w A \tan \varphi + q \tan \varphi \} + (qA - V_w)$ (17)

O equilíbrio dos momentos é descrito em relação ao que foi estabelecido pela equação (10).

$$M(x) = E(y_t - y) = M_{ew}(x) + \int_{x_0}^x \left(\lambda f - \frac{dy}{dx} \right) E dx \quad (18)$$

$$M_{ew}(x) = \int_{x_0}^x \left(-P_w \frac{dy}{dx} \right) dx + [P_w(y - h)] \quad (19)$$

Para solucionar esse método deve-se estabelecer a distribuição de funções entre as fatias, definir um fator de segurança e um λ para, enfim, calcular o $E(x)$, $M(x)$. (GERSCOVICH, 2016).

2.4 SOLUÇÕES PARA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

A escolha de uma solução para estabilização de um talude deve seguir alguns critérios que envolvem desde a localização do talude até o risco que o talude oferece à sociedade e meio ambiente, caso entre em colapso, além das questões técnico-econômicas que viabilizam o método e avaliação de desempenho deste. (CARVALHO, 1991).

Existem inúmeras formas e métodos de estabilização de taludes, desde proteção do revestimento, retaludamento até reforço estrutural propriamente dito. Serão discutidas neste trabalho duas soluções de estabilização preventiva para um talude de aterro ainda estável em zona urbana. Estas soluções deverão contribuir para a resistência dos esforços estáticos e ainda suportar cargas permanentes e acidentais, a fim de que o talude permaneça conservado. Carvalho (1991) salienta a importância do trabalho de conservação. Este deve extrapolar sua função corretiva e adotar um caráter preventivo para impedir eventuais danos e prejuízos.

2.4.1 Cortina Atirantada

É uma solução de estabilização que envolve um reforço estrutural do solo. Segundo a NBR 11628 (ABNT, 2009) estruturas de solo reforçado são aquelas onde ocorre a introdução

de elementos resistentes no interior do maciço, podendo ser na forma de grampos, fitas, geossintéticos e tirantes.

É um dos métodos de contenção mais modernos e eficientes em termos de desempenho mecânico. A cortina atirantada pode vencer qualquer altura e ainda ser aplicada nas mais variadas situações. Entretanto, os custos para execução são elevados. Esse sistema construtivo requer longo tempo de execução, mão de obra e equipamentos especializados, além dos cuidados na prevenção de corrosão dos tirantes. (MASSAD, 2010).

2.4.1.1 Características e Detalhes Construtivos

A cortina atirantada trata-se de uma parede de concreto armado fixada ao maciço por meio de tirantes, que podem ser cordoalhas, monobarras ou fios. Furos são feitos no maciço (com inclinação variando entre 15° e 30°) para a introdução dos tirantes que por sua vez são presos por meio de uma calda de cimento injetada em alta pressão que preenche os poros do solo formando um bulbo que ancora as barras metálicas. Após o tempo de cura dos bulbos as cordoalhas são protendidas e afixados à parede de concreto “empurrando” a estrutura na direção do talude. (GERSCOVICH et al, 2016).

Dependendo do carregamento dos tirantes e dos espaçamentos das ancoragens, as cortinas de concreto armado podem variar entre 20 cm e 40 cm. Tirantes com carga de trabalho de aproximadamente 390 kN precisam de painéis de 30 cm, painéis mais esbeltos de até 25 cm trabalham com tirantes com carga de 200 kN. A carga de trabalho de um tirante permanente será segundo a NBR 5629 (ABNT, 2006):

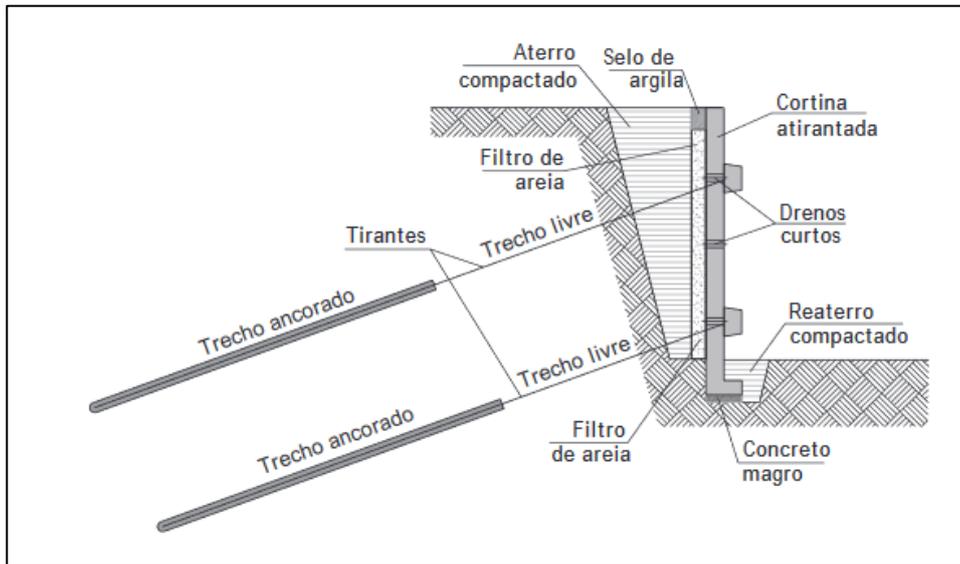
$$\sigma_{adm} = \frac{\text{Carga de ensaio}}{1,75} \quad (20)$$

tem-se:

- $\text{Carga máxima de ensaio} = 0,9f_{yk}A_s$;
- f_{yk} = resistência característica do aço à tração;
- A_s = área da seção transversal útil da barra;
- 1,75 = fator de segurança.

Tirantes provisórios adotaram 1,50 como fator de segurança. O item 4.3.2 da NBR 5629 (ABNT, 2006) preconiza que a espessura mínima de cada barra de aço que compõe o tirante deverá ser de 50 mm².

Figura 11 Seção transversal de uma cortina atirantada



Fonte: Gerscovich et al (2016)

Figura 12 Cortina atirantada na recomposição de uma rodovia



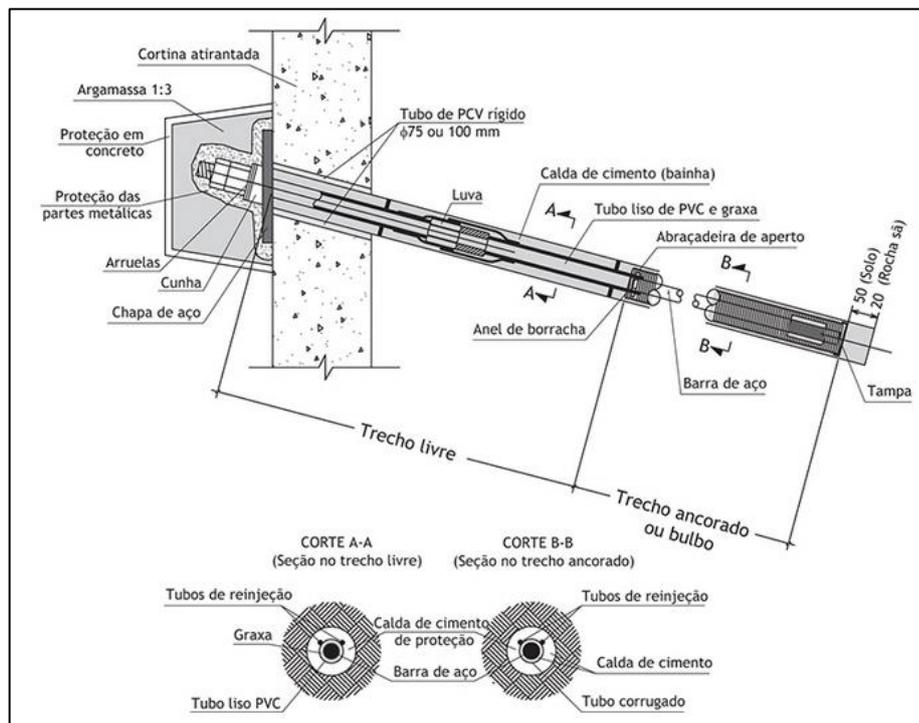
Fonte: Gerscovich et al (2016)

A cortina de concreto é composta por painéis. Estes painéis de concreto podem ter entre 5 m e 15 m de comprimento. Entre cada painel há uma junta de dilatação. Os painéis estarão apoiados sobre uma fundação direta ou sobre estacas, dependendo da solicitação exigida devido ao peso do painel e da componente vertical dos tirantes e do empuxo ativo. (GERSCOVICH et al, 2016).

2.4.1.2 Elementos e Instalação de Uma Cortina

Um tirante é composto por três partes principais, são eles: cabeça do tirante, trecho ancorado e trecho livre.

Figura 13 Esquema das partes de um tirante



Fonte: Gerscovich et al (2016)

A cabeça do tirante é a parte que fica exposta, colada na face externa do painel e protegida por uma camada de concreto. Ela transmite a carga do bulbo de ancoragem para a cortina de concreto armado. O trecho livre se localiza entre o bulbo de ancoragem e cabeça do tirante. Este elemento deve ficar livre de atrito com o solo, ou seja, todos os esforços são suportados pelo trecho ancorado. (GERSCOVICH et al, 2016).

Cuidados contra a corrosão devem ser tomados. A seção 5.2 da NBR 5629 (ABNT, 2006) divide os tipos de proteção em três classes, dependendo do tipo de agressividade em que os tirantes se encontram e se o tirante será permanente ou provisório. Esses cuidados variam desde películas protetoras até galvanização ou zincagem do tirante.

Feito o tratamento anticorrosivo, segue para o processo de montagem dos tirantes, em que a NBR 5629 (ABNT, 2006) recomenda que se utilize uma bancada própria para a montagem dos tirantes, protegida contra intempéries e se faça o dimensionamento adequado das luvas, soldas e emendas. Segue-se então para a perfuração para instalação dos tirantes no terreno, que é feita vide projeto, onde se loca os furos, se especifica a inclinação e direção

destes. Todo método para perfuração é válido, desde que se garanta um furo retilíneo com as especificações do projeto e ainda que se garanta que o furo permaneça aberto até que ocorra a injeção da calda.

Os processos de registros de dados, verificações prévias, colocação dos tirantes até injeção da calda de cimento são discorridos na NBR5629 (ABNT, 2006). Ressalta-se, porém, a etapa de aplicação de carga no tirante. Esta etapa ocorre depois dos ensaios de protensão de todos os tirantes. O ensaio é realizado através do equipamento indicado na figura 14:

Figura 14 Ensaio de Protensão



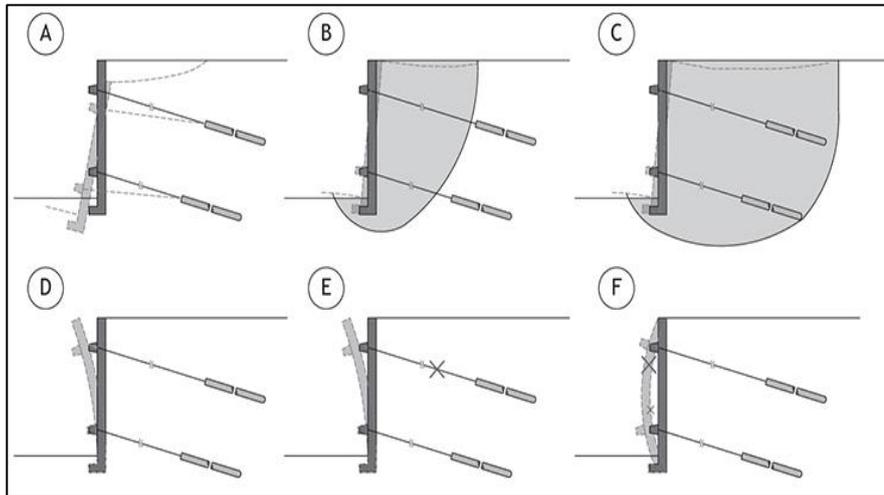
Fonte: <<http://www.solodactha.com.br/obras/ebm5.htm>>

Este equipamento possui um macaco hidráulico, deflectômetros, placas de apoio e dispositivos de referência para medição de deslocamentos, centralizadores de carga e uma célula de carga. São realizados os ensaios de qualificação, com a finalidade de verificar o comportamento dos elementos enterrados dos tirantes. Ensaio de recebimento, obrigatório em todas as ancoragens, este ensaio tem a finalidade de controlar a capacidade de carga dos tirantes. Ensaio básico, em que se verifica a execução correta do tirante incluindo a escavação deste. Ensaio de fluência, para verificar o deslocamento da cabeça do tirante, ou seja, seu desempenho em relação às cargas de longa duração. Ensaio de incorporação, quando o tirante já apresenta bom desempenho ele é incorporado à estrutura, devendo apresentar entre 80% e 100% da carga de trabalho prevista em projeto.

2.4.1.3 Dimensionamento Das Cortinas Atirantadas

A figura 15 apresenta os modos de ruptura que devem ser analisados no dimensionamento de uma cortina atirantada.

Figura 15 Modos de ruptura de uma cortina atirantada



Fonte: Gerscovich et al (2016) apud GEORIO (2014)

Os modos de ruptura apresentados na figura 15 são: ruptura de fundação (A), ruptura de talude (B e C), deformação excessiva (D), ruptura de tirantes (E) e ruptura de painel (F). É fundamental de que seja garantido que não ocorra ruptura de fundação, devendo-se avaliar, nesse caso, a adoção de fundações profundas. Ressalva-se ainda que existem interações solo estrutura, em que o empuxo de terra possui papel fundamental em sua distribuição entre as ancoragens, trazendo, portanto, a necessidade de métodos numéricos de análise dessas interações. (GERSCOVICH et al, 2016, apud CRAIZER, 1981).

A elaboração de um projeto geotécnico exige que se determine a geometria de cada painel, as cargas as quais os tirantes serão solicitados, os comprimentos dos trechos livres e ancorados, espaçamentos e o projeto executivo dessa estrutura de contenção. Para isso existem métodos de dimensionamentos aproximados, em que os tirantes são dimensionados de forma que se contraponham aos empuxos. Nestes métodos aproximados há uma simplificação nos casos: cortinas verticais, em solos homogêneos, sem lençol freático e superfície de ruptura passando pelo pé do talude. (GERSCOVICH, 2016).

Coulomb Adaptado é um exemplo de um método simples em que, segundo Gerscovich (2016) apud GeoRio (2014), se considera o conceito de resistência mobilizada do solo:

$$\varphi_{mob} = \arctg\left(\tan \frac{\varphi}{FS}\right) \quad (21)$$

$$c_{mob} = \frac{c}{FS} \quad (22)$$

O somatório das tensões nos tirantes é definido pelo produto entre o empuxo ativo do solo e o espaçamento entre os tirantes. E ainda, se for considerado que toda componente vertical das estacas será suportada pelas fundações do painel, o empuxo pode ser considerado paralelo à inclinação do terreno:

$$\sum T = E_a S_h \frac{\cos i}{\cos \alpha} \quad (23)$$

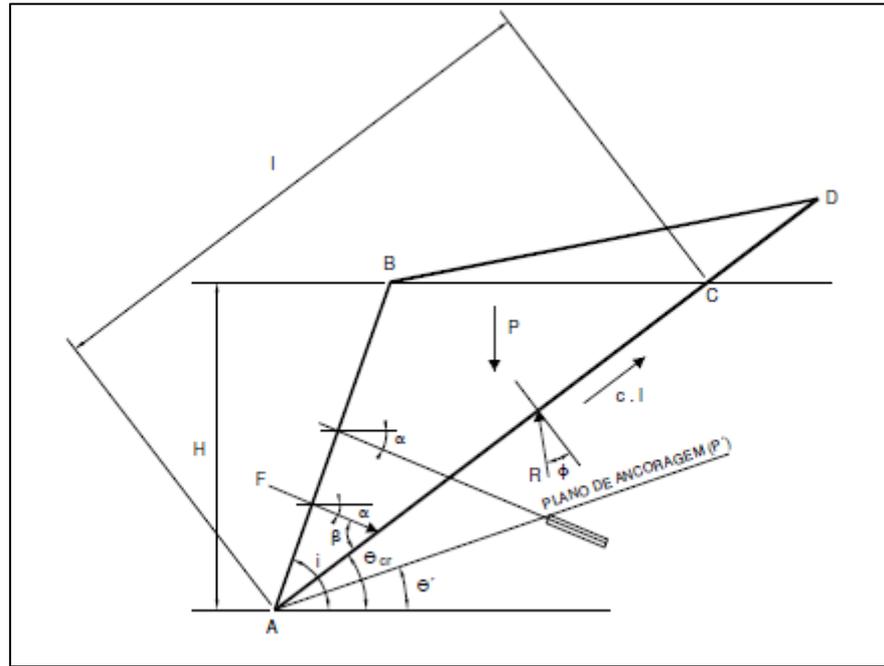
Em que:

i é a inclinação do terreno

α é a inclinação dos tirantes

Outro processo de dimensionamento é o Método Brasileiro de Atirantamento, este, por sua vez, utiliza a Teoria do Equilíbrio Limite para obter o fator de segurança e foi baseado no método de Culmann (1866), em que se restringe à taludes verticais de solos homogêneos, pois considera-se que a superfície de ruptura passa pelo pé do talude, portanto somente o peso da massa de solo (w), a força de coesão (C_d) e a a força de reação (R) causam a instabilidade do talude. Este método considera a força de protensão dos tirantes para o equilíbrio da massa de solo (cunha) a fim de que elas garantam o fator de segurança exigido em norma. (GERSCOVICH, 2016).

Figura 16 Forças atuantes na massa de solo



Fonte: Fiamoncini (2009) apud Tecsolo (1978)

Têm-se, portanto o ângulo crítico de deslizamento θ_{crit} formado pela horizontal com o plano crítico de deslizamento:

$$\theta_{crit} = \frac{i + \varphi}{2} \quad (24)$$

O fator de segurança mínimo (existente) é determinado em função da linha de maior declive do plano crítico de deslizamento (l) e do peso (P) da cunha:

$$FS_{existente} = \frac{lc \cdot \cos \varphi}{P(\sin(\theta_{crit} - \varphi))} \quad (25)$$

O fator de segurança desejado para um ângulo formado pela horizontal com o plano de ancoragem $\theta \geq 1.5$

$$FS_{desejado} = \frac{\frac{2c}{\gamma H} \sin i \cdot \cos \varphi}{\sin(i - \theta) \cdot \sin(\theta - \varphi)} \quad (26)$$

Existe, então, uma relação entre o fator de segurança existente e o desejado (λ) que, em função do ângulo β formado pelos tirantes e o plano de deslizamento e o peso da cunha obtido pelo plano de ancoragem P' , determina a força de ancoragem necessária (F):

$$\lambda = \frac{FS_{desejado}}{FS_{existente}} \quad (27)$$

$$F = \frac{\lambda - 1}{\lambda} * P' * \frac{\sin(\theta_{critc} - \varphi)}{\cos(\beta - \varphi)} \quad (28)$$

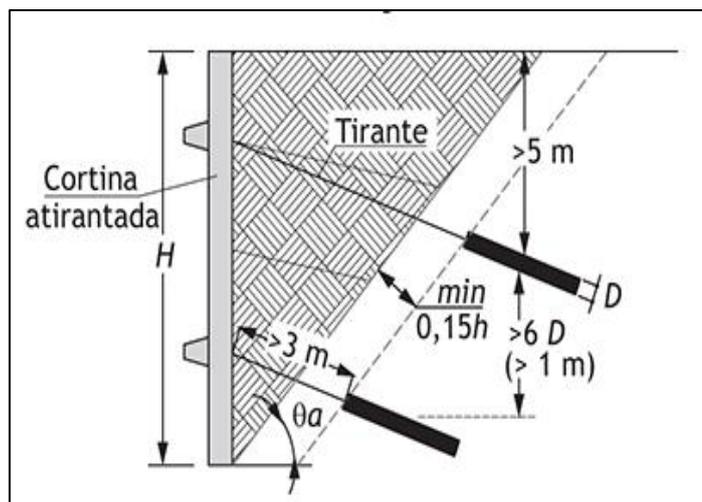
Finalmente, o número (N) de tirantes será:

$$N = \frac{F * \text{espaçamento horizontal}}{F_{adm}} \quad (29)$$

2.4.1.4 Recomendações Na Elaboração Do Projeto

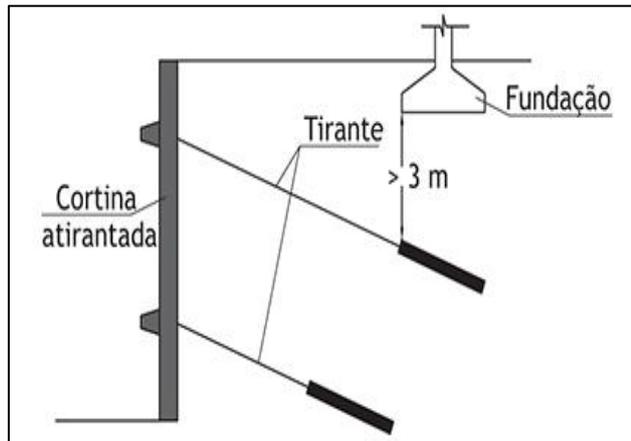
O bulbo deve estar distante no mínimo 3 m da superfície de início da perfuração, com espaçamento entre eles maior que 1 m e ainda seis vezes maior do que o diâmetro da perfuração. O bulbo deve ter início a uma altura da superfície equivalente a 15% da altura da contenção (H) e possuir recobrimento de 5m. (GERSCOVICH et al, 2016, apud ABNT, 2006, PINELO, 1980, GEORIO, 2014)

Figura 17 Esquema de recomendações de Projeto



Fonte: Gerscovich et al (2016) apud Pinelo (1980)

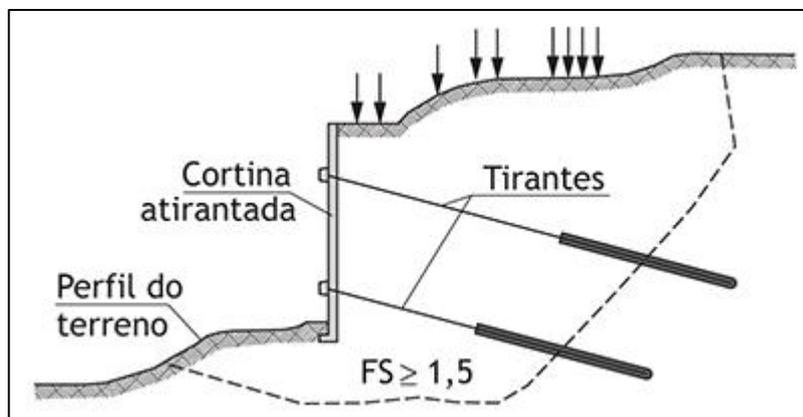
Figura 18 Distância do bulbo até fundações adjacentes



Fonte: Gerscovich et al (2016) apud Ostermayer (1977)

Outra recomendação é dada por Hanna (1982), baseada em Ostermayer (1977), em que a distância mínima entre os bulbos e as fundações adjacentes deve ser de 3 m. Além disso, como consta na NBR 5629 (ABNT,2006) o fator de segurança deve ser igual ou superior a 1,5.

Figura 19 Representação da estabilidade global



Fonte: Gerscovich et al (2016) apud ABNT (2006).

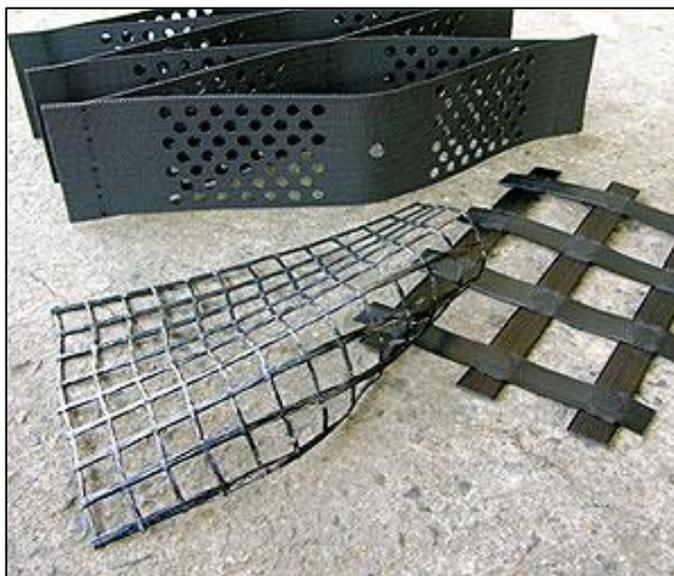
2.4.1.5 Considerações

A Cortina Atirantada é um dos métodos de estabilização mais modernos e eficientes em termos de desempenho mecânico. A cortina atirantada pode vencer qualquer altura e ainda ser aplicada nas mais variadas situações. Entretanto, os custos para execução são elevados. Esse sistema construtivo requer longo tempo de execução, mão de obra e equipamentos especializados, além dos cuidados na prevenção de corrosão dos tirantes. (MASSAD, 2010).

2.4.2 Geocélula Preenchida Com Solo

Criados para realização de obras costeiras nos EUA após a segunda guerra mundial, os geossintéticos são produtos industrializados e pelo menos um de seus componentes é fabricado a partir de polímeros sintéticos ou naturais. (VERTEMATTI, 2001).

Figura 20 Variações de Geossintéticos



Fonte: Quinalia (2009)

Os tipos e aplicações dos geossintéticos são variadas e estão descritas por Bueno, Vilar (2004) no Manual Brasileiro de Geossintéticos:

Quadro 5 Aplicações dos Geossintéticos

Função	Geotêxtil	Geogrelha	Geomembrana	Georede	GCL	Geocélula	Geotubo	Geofibra
Separação	X	X	X	-	-	-	-	-
Proteção	X	-	-	X	-	X	-	-
Filtração	X	-	-	-	-	-	-	-
Drenagem	X	-	-	X	-	-	X	-
Erosão	X	-	-	-	-	X	-	-
Reforço	X	X	-	-	-	X	-	X
Impermeabilização	X	-	X	-	X	-	-	-

Fonte: Bueno, Vilar (2004)

Os geossintéticos são feitos de Polietileno (PE), Poliéster (PET), Polipropileno (PP) ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD).

2.4.2.1 Características e Detalhes Construtivos

De acordo com a Associação Brasileira de Geossintéticos, geocélula é um geossintético de arranjo tridimensional formado a partir de tiras poliméricas sobrepostas geralmente de 0,5 m a 1 m de largura, soldadas de forma que fiquem interconectadas em forma semelhante à de colmeia. Segundo a Geoacademy, essas células podem ser ter preenchimento:

- Granular: apresenta redução da energia hidráulica, limitando as forças dentro e sob as células, forma uma estrutura flexível e durável, direciona o fluxo na superfície da célula, eliminando escoamento lateral e o solapamento do solo de apoio dos painéis e controla o movimento das partículas individuais, que pode ocorrer devido à gravidade ou ao escoamento da água. Ideal para taludes de inclinação moderada.
- Concreto: controla a retroerosão progressiva (piping) e o solapamento, faz com que a geocélula atue como junta de dilatação e acrescenta estabilidade em taludes íngremes de canais com fluxo contínuo. Ideal para encontro de pontes e taludes de baixa inclinação e para canais de alta velocidade de fluxo.
- Vegetação: favorece a redução da energia hidráulica, limitando as forças dentro e sob as células, protege as raízes com o acréscimo da resistência natural, direciona o fluxo da água sobre o topo do painel e não através dele, previne sulcos e ravinas, combate a perda de umidade e ainda possui apelo estético, além de tornar o ambiente mais agradável. Ideal para taludes íngremes, bermas, diques, canaletas e vertedouros.

Figura 21 Exemplo de Geocélula



Fonte: <http://inovageo.eng.br/> (2018)

Uma das aplicações das geocélulas na estabilização de taludes é no controle de erosões, em que elas se caracterizam como soluções permanentes de proteção superficial flexível (quando preenchidas com solo), desempenhando duas funções básicas: retenção de finos provenientes do solo e os materiais erodíveis e ainda resistir às velocidades de escoamento e esforços tangenciais provenientes pelo escoamento superficial da água. Ou seja, são materiais que têm a finalidade de aumentar a resistência do terreno. Eles não só impedem o processo erosivo como atuam como elemento de suporte ao desenvolvimento e fixação da cobertura vegetal. É um material não degradável que atua como camada protetora do talude, reforçando a vegetação.

Figura 22 Geocélula instalada em um talude



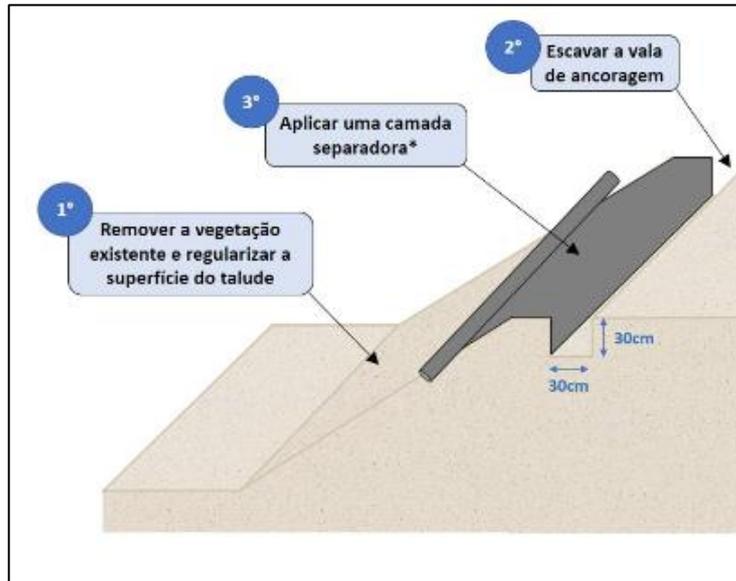
Fonte: <http://geoacademy.com.br/> (2018)

O desenvolvimento da vegetação em taludes com inclinação menor que 45° é facilitado nas geocélulas, haja vista que elas permitem o confinamento de grande quantidade de material fértil, bem como as raízes da vegetação. Taludes mais íngremes também possibilitam o emprego das geocélulas, pois se tratam de materiais com alta resistência à tração e grande capacidade de retenção da solução aquo-pastosa (hidrossemeadura), porém acabam exigindo a utilização de um sistema de grampos de fixação. Não somente a inclinação é determinante na utilização, não só das geocélulas, mas como geossintéticos em geral. Outras características do terreno também devem ser levadas em consideração. Taludes extensos também possuem grande solicitação de esforços de tração, o que muitas vezes exigem a instalação segmentada dos elementos geossintéticos por meio de bermas ou valas de ancoragem intermediárias. (MARQUES, GEROTO, 2015).

2.4.2.2 Elementos E Instalação De Um Painél de Geocélulas

Em empresa OBER Geossintéticos sugere um processo de instalação da geocélula no talude:

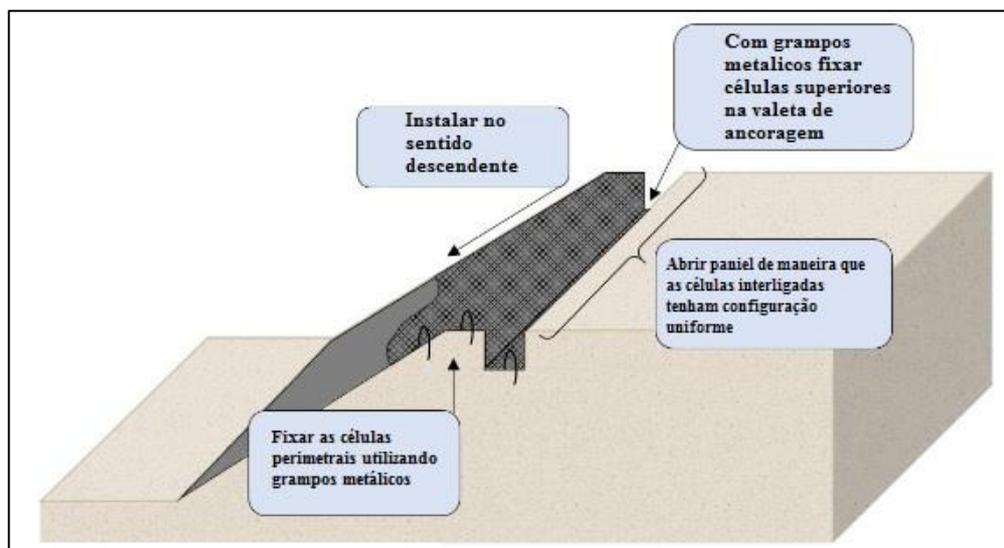
Figura 23 Preparação do Talude para Instalação da Geocélula



Fonte: OBER Geossintéticos

Em muitos casos se faz necessária uma camada separadora de geotêxtil, devido à diferença entre granulometria entre o subleito e o material que será confinado. Nesses casos esse fabricante deve-se adotar camada mínima de 20cm e se aplicado sobre uma superfície de solo compressível e realizar as costuras com linhas de nylon de alta resistência.

Figura 24 Processo de instalação da geocélula



Fonte: OBER Geossintéticos

O fabricante recomenda grampos metálicos CA50 para resistir às cargas e ancorar os painéis adequadamente. Para preencher as células, o material deve ser lançado a uma altura de 1 m com auxílio de equipamentos convencionais (retroscavadeiras e carregadeiras) e a compactação desse material também deve ser feita com equipamentos tradicionais, porém, no caso do solo onde terá vegetação, deve ser feita uma compactação leve, a fim de que se garanta a germinação da vegetação e ainda, deve-se garantir que o enchimento estará nivelado com as bordas das geocélulas, essas recomendações também podem ser encontradas no Manual Brasileiro de Geossintéticos (2014).

2.4.2.3 Dimensionamento Das Geocélulas em Taludes

A partir do método desenvolvido por Rimoldi e Ricciuti (1994), ilustrado pela GeoAcademy, o dimensionamento das geocélulas em taludes, em que é analisada a estabilidade na crista, no pé e ao longo do talude.

➤ Estabilidade ao longo do talude

Primeiramente determina-se o peso do corpo do talude (P):

$$P = \gamma LH \quad (30)$$

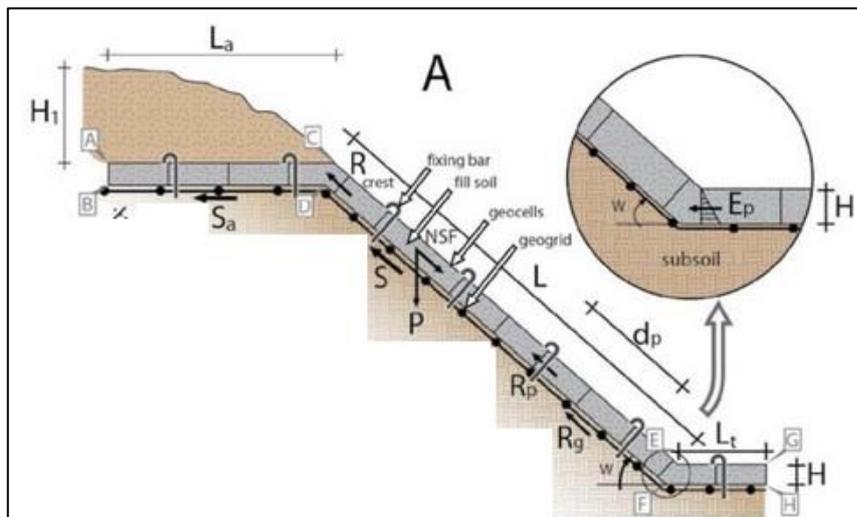
em que:

γ é o peso específico do solo de preenchimento (kN/m³);

L é o comprimento do talude (m);

H é a altura da geocélula (m).

Figura 25 Esquema para dimensionamento pelo método Rimoldi e Ricciuti (1994)



Sendo assim a força de deslizamento (NSF) é uma componente da força peso em relação ao ângulo de inclinação (w):

$$NSF = P \sin w \quad (31)$$

A força resistente resultante é determinada pela soma das forças resistentes parciais:

$$R_T = S + \frac{R_{crista}}{FS_j} + \frac{R_p}{FS_j} + R_g + E_p + R_c \quad (32)$$

S é a força de atrito solo-interface, em função da NSF e do ângulo de atrito de entre solo de preenchimento e solo de apoio da geocélula. (φ'):

$$S = \gamma LH \cos w \tan \varphi' \quad (33)$$

➤ Estabilidade na crista do talude

$$R_{crista} = n_j J_{min} \quad (34)$$

sendo:

R_{crista} a resistência na crista resultante do somatório das resistências das soldas;

n_j o número de soldas por unidade de largura da geocélula (m-1);

FS_j o fator de segurança contra ruptura da solda ($\geq 1,5$);

J_{min} a resistência mínima da solda (kN/solda).

A resistência na crista leva em consideração a resistência da solda, entretanto, existe ainda uma força adicional R_p que contribui para estabilidade que é a resistência proveniente dos grampos fixados ao talude:

$$R_p = b J_p \quad (35)$$

em que:

b é o número de grampos por unidade de largura do talude distribuídos ao longo de seu comprimento. (1/m)

J_{min} é a resistência ao cisalhamento das soldas sob a tensão aplicada nos grampos (kN/solda). Os grampos devem ser fixados desencontrados e em múltiplos mais próximos do diâmetro da célula com espaçamento d_p , portanto:

$$d_p = L/b \quad (36)$$

Caso seja necessário o uso de uma geogrelha, a resistência à tração desta $R_g = \alpha_{2\%}$, sendo $\alpha_{2\%}$ é a resistência à tração da geogrelha a 2% de deformação.

➤ Estabilidade no pé do talude

$$E_p = \frac{k p \gamma H^2}{2} = \frac{\gamma \tan^2(45^\circ + \varphi_o/2) H^2}{2} \quad (37)$$

φ_o é o ângulo de atrito do solo de preenchimento das células (°).

➤ Estabilidade global

Finalmente, o fator de segurança global será a razão dos esforços resistentes pelos atuantes:

$$FS_g = \frac{R_T}{NFS} \geq 1,5 \quad (38)$$

Em caso de instabilidade, aumentar a quantidade de grampos ou inserir uma geogrelha sob a geocélula.

➤ Estabilidade da estabilidade da ancoragem do bloco ABCD na crista do talude

O fator de segurança para ancoragem do bloco é:

$$FS_a = \frac{S_a}{(NFS - S) \cos w} \geq 1,5 \quad (39)$$

S_a é a componente horizontal da força resistente da canaleta de ancoragem

$$S_a = \gamma H_t L_a \tan \varphi_{ia} \quad (40)$$

em que:

H_t é a profundidade da canaleta de ancoragem;

φ_{ia} é o ângulo de atrito no Solo de preenchimento x Solo de apoio da geocélula na crista do talude;

L_a é o comprimento de ancoragem que pode ser calculado por:

$$L_a = \frac{FS_a(NSF-S) \cos w}{\gamma H_t \tan \varphi_{ia}} \geq 0,75 \quad (41)$$

É importante salientar a importância dessa análise, mesmo quando, na ancoragem, considerando a resistência R_{crista} como função apenas das resistências das soldas, a resistência promovida pela ancoragem ainda deve ser levada em conta.

➤ Estabilidade no pé do talude

A estabilidade no pé do talude é feita de forma análoga à da crista. É estabelecido um fator de segurança maior ou igual a 1,5 e então se calcula o comprimento de ancoragem, que, neste caso, deve ser no mínimo 1,0m.

➤ Estabilidade do solo de cobertura

Nos casos em que a espessura do solo é maior que a da geocélula deve ser avaliada a estabilidade deste solo de cobertura. Neste caso a análise de estabilidade será dada pela diferença entre a altura do talude e a altura da camada de solo de cobertura H_s (m):

$$NSF_1 = \gamma L(H_s - H) \quad (42)$$

$$R_{T1} = S_1 + E_{p1} + R_{g1} \quad (43)$$

$$S_1 = \gamma L(H_s - H) \cos w \tan \varphi' \quad (44)$$

$$E_{p1} = \frac{\gamma \tan^2(45^\circ + \varphi_o/2)(H_s - H)^2}{2} \quad (45)$$

$$R_{g1} = \alpha_{2\%} \quad (46)$$

$$FS_1 = \frac{R_{T1}}{NFS} \geq 1,3 \quad (47)$$

Em caso de instabilidade determinar um $\alpha_{2\%}$ para o fator de segurança desejado.

2.4.2.4 Considerações

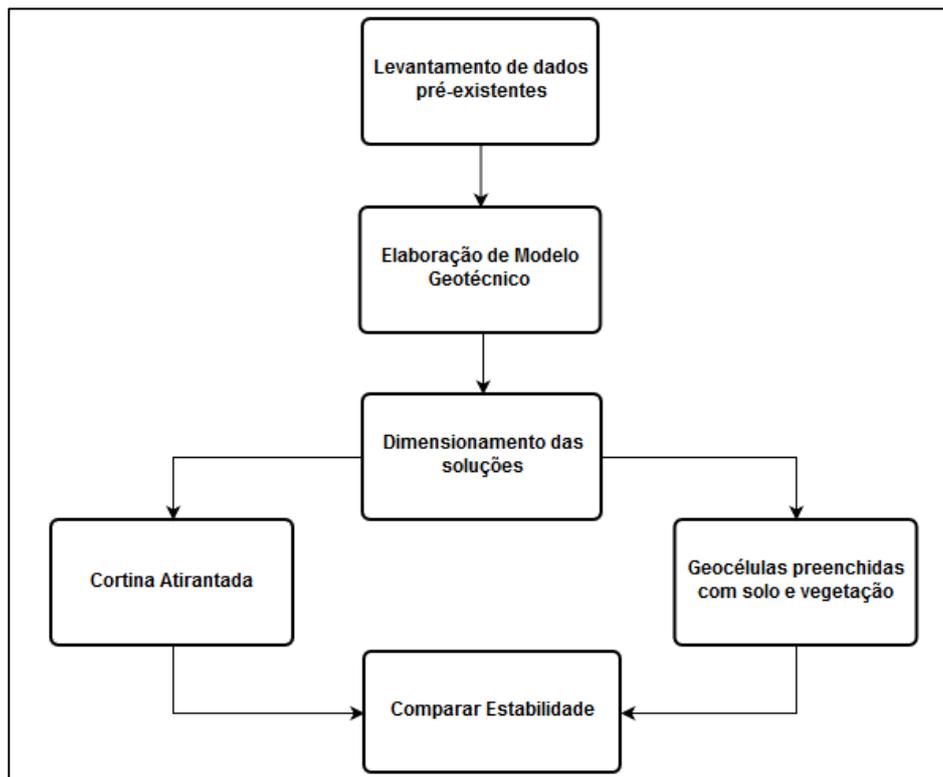
As geocélulas aplicadas no controle de erosões se mostram cada vez mais eficazes, na medida em que avançam as técnicas de construtivas e novos produtos são desenvolvidos. Promovem-se como uma solução segura, de baixo custo de implementação e bastante durável. Possuem, contudo, grande exigência dos projetistas, fabricantes e executores no que se refere a atualizações, pois é um material, assim como outros geossintéticos, que se encontra em constante desenvolvimento, lançando sempre novos produtos no mercado. (MARQUES, GEROTO, 2015).

3 METODOLOGIA

Ventura (2007) apud Yin (2001) caracteriza como um estudo de caso uma investigação empírica de método abrangente e lógica no planejamento da coleta e análise de dados. Portanto, este trabalho pode ser enquadrado como um estudo de caso, na medida em que será analisado um problema real, um talude de aterro em zona urbana, ainda estável, mas completamente vulnerável. Identificar-se-á possíveis causas do problema contrapondo estas informações a estudos anteriores a fim de que se estabeleçam algumas soluções preventivas adequadas ao talude de aterro em questão com uma análise comparativa entre elas.

Foi estudado um talude localizado em uma zona urbana na cidade de Palmas, Tocantins. O estudo trouxe duas sugestões para uma estabilização de caráter preventivo desse talude: Cortina Atirantada e Revestimento Vegetado de Geocélulas. Em seguida, foi comparado o desempenho de estabilidade entre os dois métodos a partir de análise computacional. Para isso foram realizadas as etapas ilustradas do fluxograma do quadro 6:

Quadro 6 Fluxograma das etapas de estudo



Fonte: Autor (2018)

3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS PREEXISTENTES

Nesta etapa foram coletadas informações disponíveis acerca dos taludes estudados para que se pudesse caracterizar o talude, trazendo também as características do local de estudo. Foi feito inicialmente um croqui, seguido de uma medição fidedigna para obter as informações geométricas do talude Utilizou-se para essa atividade o C7 GPS da Universidade Federal de Santa Maria.

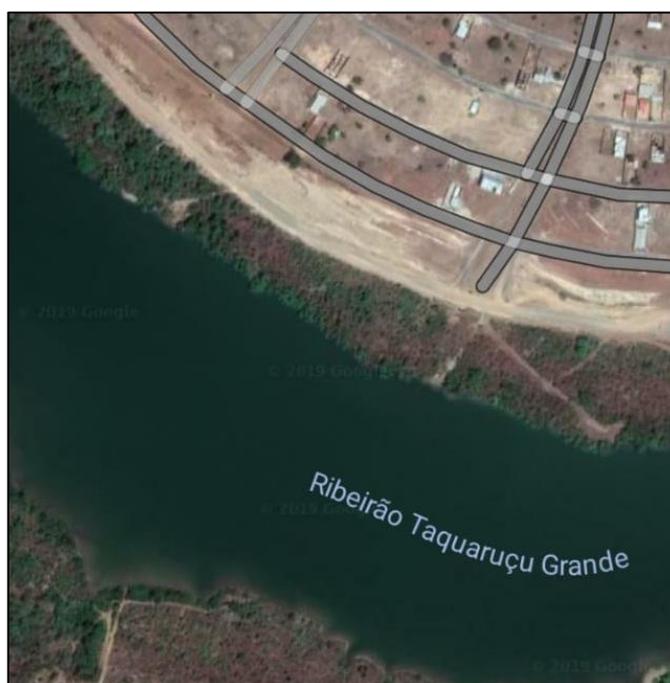
Em paralelo à etapa de medição foram coletadas amostras do solo para realização de ensaios de massa específica, granulometria e índice de plasticidade para se estimar, a partir de métodos empíricos e modelos computacionais, o ângulo de atrito e coesão do solo dos taludes com a partir de uma retro análise. Sendo assim, esta etapa foi dividida em:

- Descrição da área de estudo
- Caracterização geométrica
- Caracterização geotécnica

3.1.1 Descrição da área de estudo

O objeto de estudo está localizado no plano diretor sul da cidade de Palmas – TO $10^{\circ}17'09.1''S$; $48^{\circ}20'24.1''W$.

Figura 26 Localização da Área de Estudo



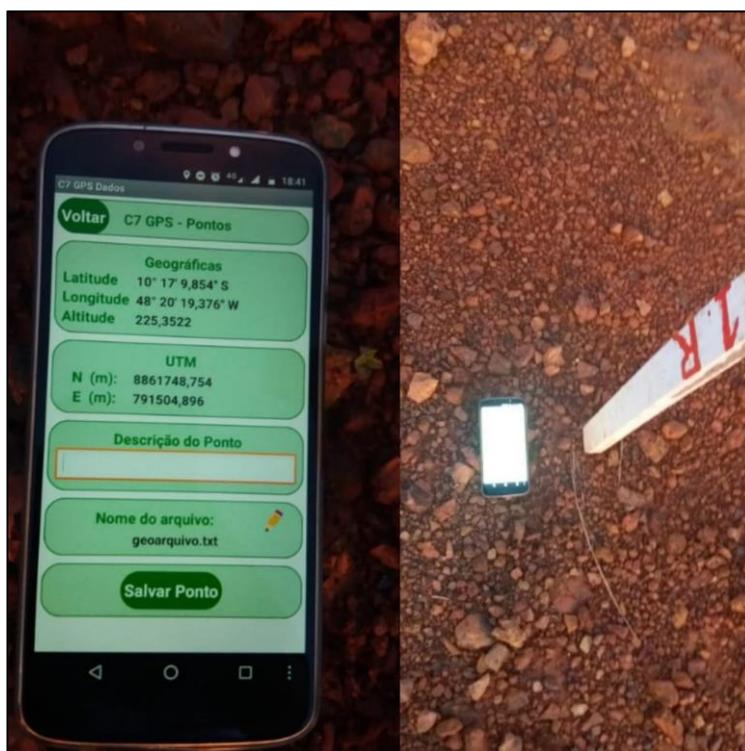
Fonte: Autor (2019)

Trata-se de um talude próximo ao Ribeirão Taquaruçu Grande em um loteamento ainda com poucas construções próximas, mas há edificações residenciais habitadas próximas à crista de um desses taludes.

3.1.2 Caracterização Geométrica

Por meio do aplicativo C7 GPS Dados foi feita uma altimetria coletando pontos nos pontos mais altos de cada patamar dos taludes com precisão de 3 m. As distâncias dos patamares foram tiradas com um diastímetro.

Figura 27 Leitura de Coordenadas C7 GPS Dados



Fonte: Autor (2019)

3.1.1 Caracterização Geotécnica

Com o objetivo de se obter informações relevantes do solo para a análise da estabilidade dos taludes estudados, foram realizados alguns ensaios pertinentes para obtenção dessas informações, de maneira direta ou empírica. Os ensaios realizados foram os de análise granulométrica e índice de plasticidade, para que, de posse desses resultados, fosse possível confrontá-los com a literatura a fim de que se obtivessem (a partir de correlações empíricas) os valores típicos das demais propriedades pertinentes para análise da estabilidade dos taludes para aquele tipo de solo.

3.2 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMECÂNICO

Havendo poucas informações geotécnicas do talude de estudo, foi coletada amostra de solo para que fossem realizados os ensaios de granulometria e índice de plasticidade, para que, considerando uma possível instabilidade do talude, se realizasse uma retroanálise através de correlações empíricas e o software SLOPE/W.

O SLOPE/W é um software de modelagem numérica para determinação do fator de segurança de taludes. Ele utiliza a Teoria do Equilíbrio Limite em associação ao método dos elementos finitos para essa determinação. Os principais inputs requeridos para a análise de estabilidade de um modelo são:

- Geometria
- Coesão, ângulo de atrito e peso específico
- Reforços ou Contensões
- Carregamentos

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES

Posterior à elaboração do modelo geomecânico dos taludes as informações coletadas foram suficientes para o dimensionamento de duas intervenções para estabilização preventiva propostas neste trabalho.

O dimensionamento da cortina atirantada foi realizado via Método Brasileiro de Atirantamento (item 2.4.1.3), pois trata-se de um método que também se faz uso da Teoria do Equilíbrio Limite. No caso da Geocélula Preenchida com Solo e Vegetação, adotou-se o método desenvolvido Rimoldi e Ricciuti (1994) o qual ocorrem verificações de estabilidade na crista, corpo e pé do talude (item 2.4.2.3).

Após os dimensionamentos foi realizada uma nova análise de estabilidade no SLOPE/W para contrapor os acréscimos de estabilidade entre as duas soluções propostas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 LEVANTAMENTOS DE DADOS PRÉ EXISTENTES

4.1.1 Inspeção Visual

Foram feitas duas visitas principais ao local de estudo. Uma em agosto de 2018 (período de estiagem) para avaliar situação preexistente e outra em janeiro do ano seguinte (período chuvoso) para verificação das condições atuais, avaliação da condição do talude, aumento de manifestações patológicas e coleta dos dados geométricos e geotécnicos.

Figura 28 Talude : Situação Preexistente



Fonte: Autor (2018)

Figura 29 Talude : Situação Preexistente



Fonte: Autor (2018)

O talude apresenta dois patamares (bermas) em que é possível observar algumas regiões de corte e outras de aterro, principalmente próxima ao pavimento, provavelmente para estabilização de suas camadas.

Figura 30 Talude : Erosão Superficial Preexistente



Fonte: Autor (2018)

Já havia marcas visíveis de erosão superficial, todo o caminho preferencial da água da chuva já havia carregado material para o pé do talude naquele momento. As inspeções durante o período chuvoso mostraram um agravamento na erosão superficial de ambos os taludes, porém, ainda sem colapso de nenhum deles.

Figura 31 Talude 1: Situação Atual



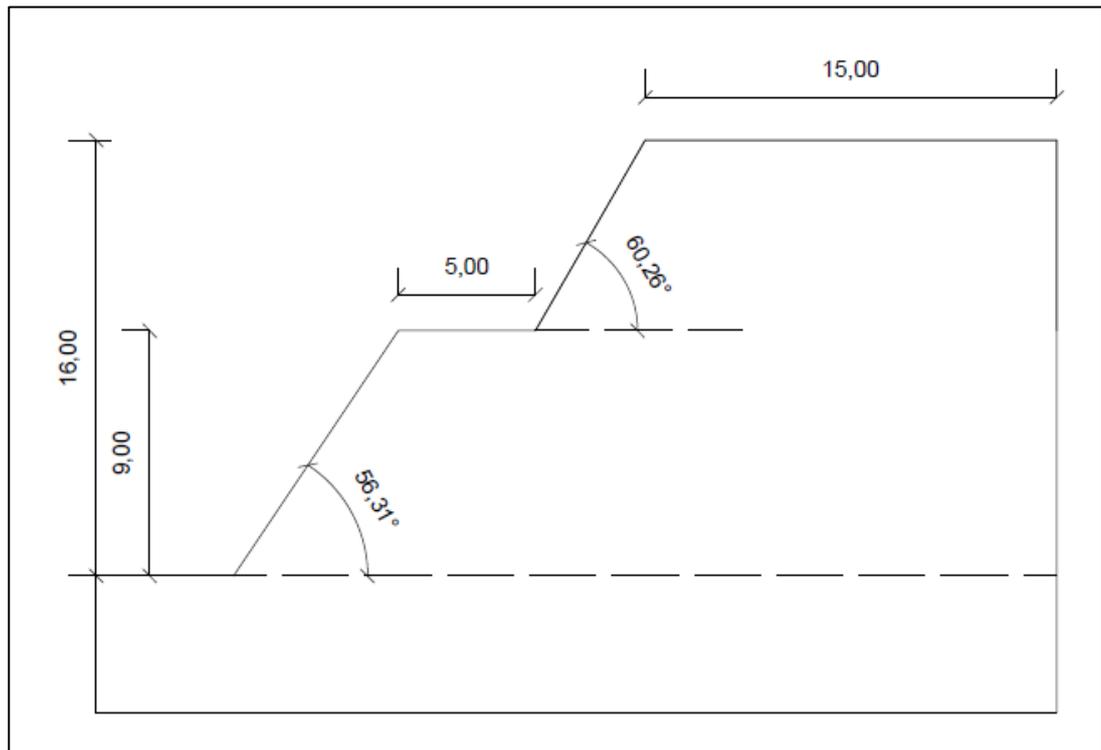
Fonte: Autor (2019)

Observa-se que os sulcos de erosão se alargaram e muito material do talude foi carreado para além do pé, em uma pista existente.

4.1.2 Caracterização Geométrica

De posse das coordenadas foi estabelecido o perfil do talude:

Figura 32 Talude 1: seção transversal



Fonte: Autor (2019)

4.1.3 Caracterização Geotécnica

A análise granulométrica do solo foi feita de acordo com a ABNT NBR 7181 (2018). Após o processo de lavagem do material na peneira #200 restaram em média 151,4g de 1kg da amostra, ou seja, 84,86% do solo é de material coesivo (siltes e argilas).

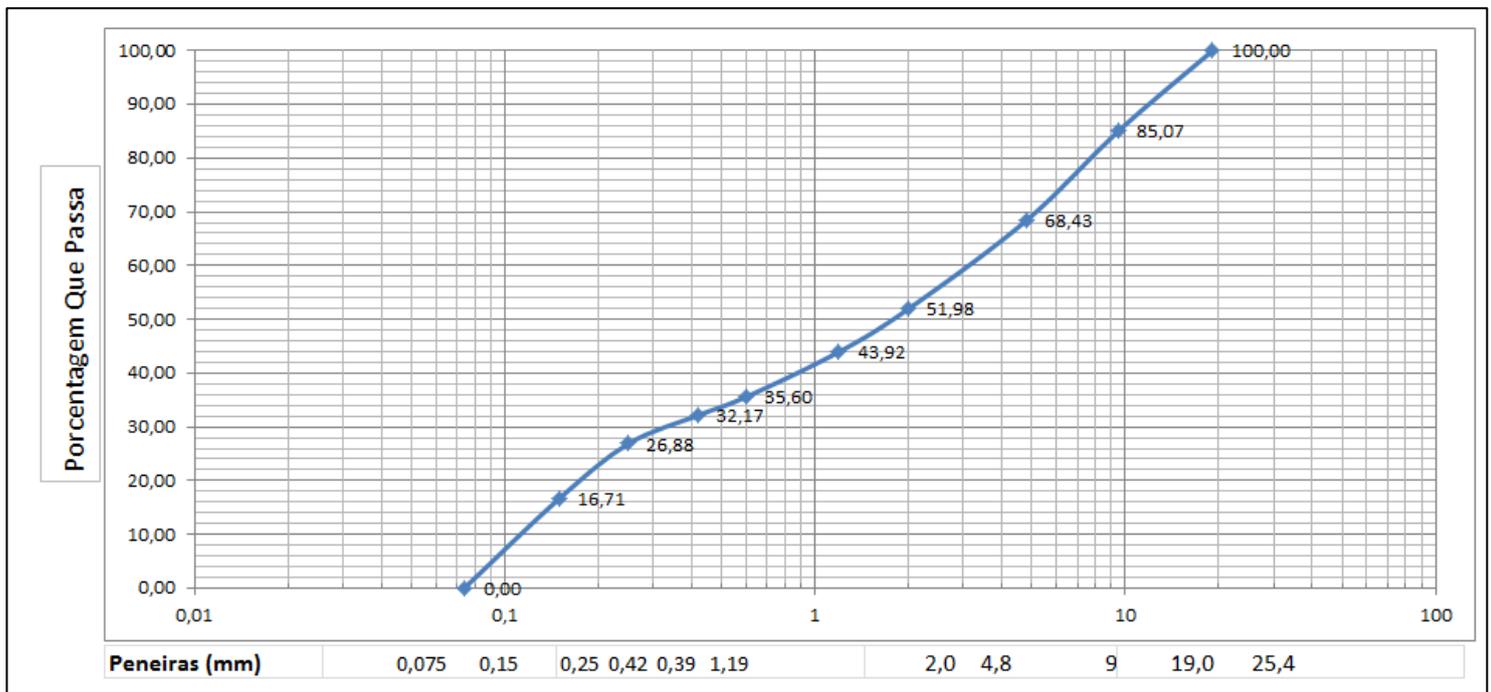
A composição granulométrica da parcela grossa do material está representada no Quadro 7:

Quadro 7 Composição granulométrica do solo dos taludes

Φ peneira (mm)	massa retirada (g)	% retida em cada peneira	% retida acumulada	% que passa em cada peneira
19,10	0,00	0,00	0,00	100,00
9,50	22,60	14,93	14,93	85,07
4,80	25,20	16,64	31,57	68,43
2,00	24,90	16,45	48,02	51,98
1,19	12,20	8,06	56,08	43,92
0,60	12,60	8,32	64,40	35,60
0,42	5,20	3,43	67,83	32,17
0,25	8,00	5,28	73,12	26,88
0,15	15,40	10,17	83,29	16,71
0,07	25,30	16,71	100,00	0,00
< 0,074	0,00	0,00	100,00	0,00
Σ	151,40	100,00		

Fonte: Autor, 2019

Figura 33 Curva granulométrica do solo



Fonte: Autor (2019)

A figura 36 mostra a curva gerada pela composição granulométrica do solo de estudo. A partir dessa curva, conclui-se que se trata de um solo uniforme (Índice de conformidade $CNU < 15$).

O quadro 8 apresenta os valores dos limites de Atterberg desse solo:

Quadro 8 Limites de Atterberg

Limite de Liquidez (LL)	NBR 6459 (2016)	51,0
Limite de Plasticidade (LP)	NBR 7180 (2016)	27,8

Fonte: Autor (2019)

Sendo assim, o solo é classificado como um material Silto-Argiloso, segundo a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e, pela classificação unificada, adotada pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) trata-se de uma argila inorgânica de alta plasticidade.

Quadro 9 Classificação do solo

Classificação	
AASHTO	A-7-5
UNIFICADA	CH

Fonte: Autor (2019)

4.1.4.1 Correlações empíricas

O quadro 10 mostra as correlações propostas por Waltham (1994), nas quais estão relacionadas às classificações unificadas dos solos com valores de limites de liquidez (LL), índice de plasticidade (IP) e o ângulo de atrito interno.

Quadro 10 Correlações empíricas

Classificação do Solo		Dimensão das Partículas	Valores Típicos		
Tipo	Classe		LL (%)	IP (%)	ϕ (°)
Cascalho	G	2mm - 60mm	-	-	>32
Areia	S	0,06mm - 2mm	-	-	>32
Silte	ML	0,002mm - 0,006mm	30	5	32
Silte argiloso	MH	0,002mm - 0,06mm	70	30	25
Argila	CL	< 0,002 mm	35	20	28
Argila Plástica	CH	< 0,002 mm	70	45	19
Ôrgânico	O	-	-	-	<10

Fonte: Waltham, (1994).

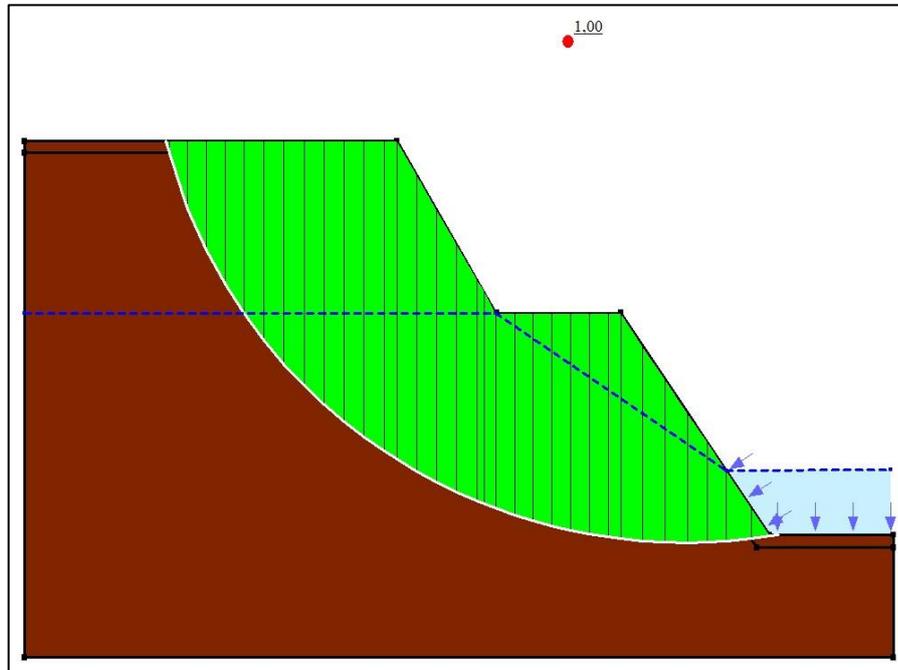
De acordo com a correlação proposta por Waltham (1994), o ângulo de atrito (ϕ) adotado será 19°.

4.1.4.2 Retroanálise

Uma retroanálise foi feita para a determinação da coesão do solo. Para isso, em virtude das características do solo, foi considerado um peso específico do solo em seu estado saturado (pior situação) $\gamma_n = 21 \text{ kN/m}^3$. Então, de posse das características geométricas e geotécnicas do solo dos taludes estudados e de do software SLOPE/W (geostudio), foi possível modelar os taludes, determinando sua coesão variando o valor até encontrar um $FS = 1$, que seria o

equilíbrio limite (crítico), já que não se tem uma prospecção geotécnica muito detalhada, portanto, para o dimensionamento dos métodos de estabilização dos taludes em questão, serão pressupostos que ambos encontram-se instáveis.

Figura 34 Retroanálise em condição saturada



Fonte: Autor (2019)

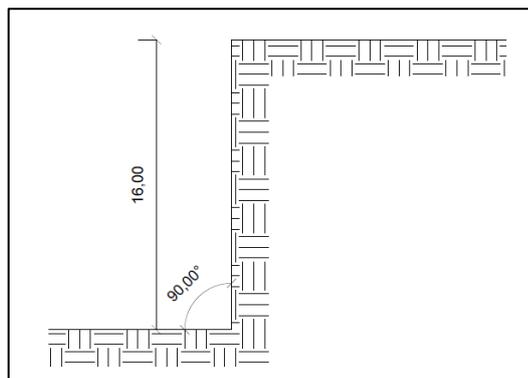
Ao se fixar a coesão em 19° a coesão obtida na retroanálise foi de 26 kPa.

4.2 DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES PARA ESTABILIZAÇÃO

4.2.1 Dimensionamento da cortina atirantada

A fim de que se obtivesse um maior aproveitamento da área, foi adotado para o dimensionamento dessa solução um talude vertical, como representado na figura 36.

Figura 35 Seção do talude de projeto



Fonte: Autor (2019)

O quadro 11 apresenta as etapas de dimensionamento da cortina atirantada segundo o Método Brasileiro De Atirantamento.

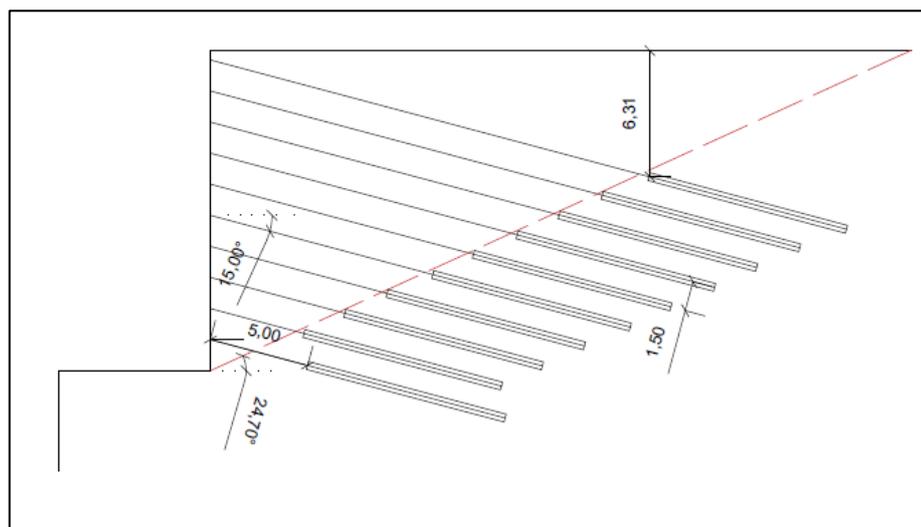
Quadro 11 Dimensionamento dos tirantes

$\theta_{crit} = \frac{i + \varphi}{2}$	54,5°
$FS_{existente} = \frac{lc * \cos \varphi}{P(\sin(\theta_{crit} - \varphi))}$	0,40
$FS_{desejado} = \frac{\frac{2c}{\gamma H} \sin i * \cos \varphi}{\sin(i - \theta) * \sin(\theta - \varphi)}$	1,50
$\lambda = \frac{FS_{desejado}}{FS_{existente}}$	3,74
$F = \frac{\lambda - 1}{\lambda} * P' * \frac{\sin(\theta_{crit} - \varphi)}{\cos(\beta - \varphi)}$	1797,59 kN/m
$N = F * \text{espaçamento horizontal} / F_{adm}$	10
$L = \frac{R_{rup}}{9,2 * N_{spt} * \varnothing * k}$	10,14 m

Fonte: Autor (2019)

O ângulo formado pela horizontal com plano de ancoragem Θ foi estimado de forma que se obtivesse um fator de segurança mínimo de 1,50. Este ângulo foi de 24,70° como representado na figura 37.

Figura 36 Detalhamento dos tirantes



Fonte: Autor (2019)

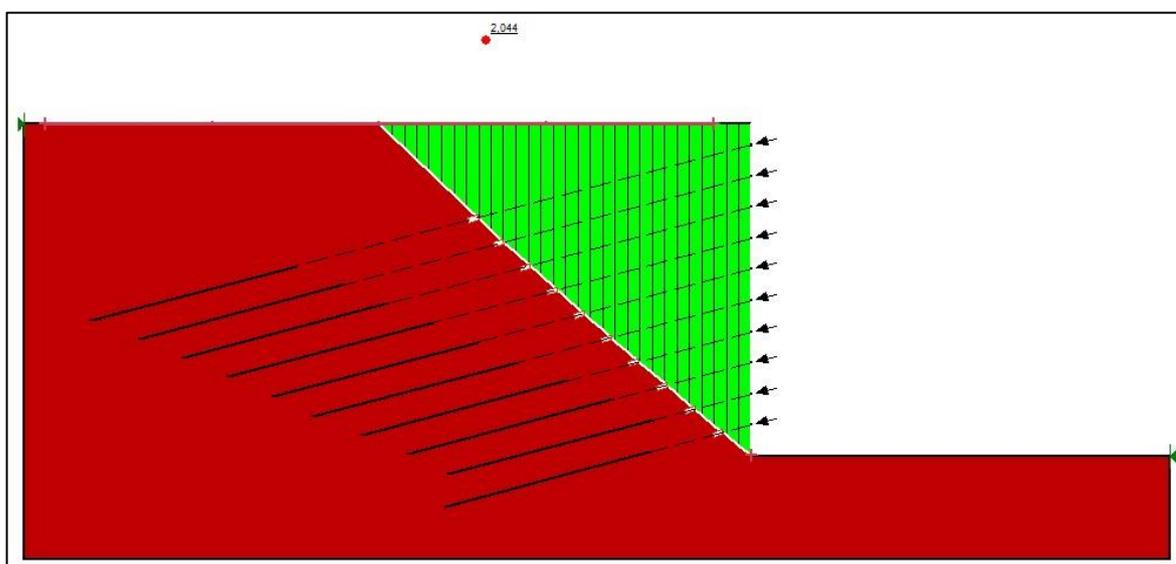
A inclinação dos tirantes foi fixada segundo a recomendação de Gerscovich et al, 2016 ($\alpha = 15^\circ$), sendo possível, então calcula-se o ângulo entre os tirantes e o ângulo de ancoragem $\beta = \alpha + \theta = 39,7^\circ$. Respeitaram-se também as recomendações construtivas descritas previamente no item 2.4.1.4.

Carga máxima adotada para determinar o número de tirantes N foi a de trabalho permanente fornecida pelo fabricante Dywidag, que para diâmetro nominal de 32 mm é de 390 kN.

4.2.1.1 Verificação da estabilidade

Feito o dimensionamento dos tirantes e de mão dos parâmetros geotécnicos foi possível criar um modelo do SLOPE/W e ainda determinar o fator de segurança da estabilização proposta.

Figura 37 Fator de Segurança - Cortina Atirantada



Fonte: Autor (2019)

O fator de segurança obtido com o reforço foi 2,04 superior ao mínimo estabelecido (1,5) pela ABNT NBR 5629 (2006). Este fator de segurança mostra que o método de dimensionamento é eficiente, contudo, trouxe um fator de segurança um pouco conservador, o que pode impactar nos custos de execução.

4.2.2 Dimensionamento da geocélula preenchida com solo

O dimensionamento dessa estabilização foi feita em duas etapas. Foram dimensionadas as geocélulas para cada berma separadamente, isso se justifica, pois a inclinação do talude é fator determinante no dimensionamento através do método Rimoldi e Ricciuti (1994) descrito no item 2.4.2.3. Sendo assim, duas verificações de estabilidade globais foram feitas.

O quadro 12 apresenta as características da geocélula utilizada no dimensionamento, fornecidas pelo fabricante.

Quadro 12 Características técnicas das geocélulas utilizadas para o dimensionamento

Características Técnicas	Métodos de Teste	Unidade	4/200GREEN
Dimensões internas da célula		mm	100x200
Peso do painel por m ²	ISO 9864	kgf/m ²	1,60
Dimensões dos painéis		m	3,5x10
Resistência à tracção máxima	ISO 13426	kN/banda	1,20
Deformação máxima	ISO 13426	%	15,00
Resistência ao corte da junção	ISO 13426	kN/junção	0,80
Resistência mínima da junção	ISO 13426	kN/junção	0,35

Fonte: <http://www.tenaxind.com>

O quadro 13 e o quadro 14 apresentam os valores das forças resistentes e o comprimento de ancoragem adotado para a berma inferior e superior do talude, respectivamente.

Quadro 13 Dimensionamento da geocélula: berma inferior

$P = \gamma LH$		22,72 kN/m
$NSF = P \sin w$		18,90 kN/m
$R_T = S + \frac{R_{crista}}{FS_j} + \frac{R_p}{FS_j} + R_g + E_p + R_c$		34,80 kN/m
$S = \gamma LH \cos w \tan \varphi'$		4,34 kN/m
$R_{crista} = n_j J_{min}$		1,75 kN/m
$R_p = b J_p$		43,28 kN/m
$E_p = \frac{k p \gamma H^2}{2} = \frac{\gamma \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi_o}{2}) H^2}{2}$		0,44 kN/m
$FS_g = \frac{R_T}{NFS} \geq 1,5$		1,84
$FS_a = \frac{S_a}{(NFS - S) \cos w} \geq 1,5$		1,5
$S_a = \gamma H_t L_a \tan \varphi_{ia}$	mín	12,12 kN/m
	adotado	16,27 kN/m
$L_a = \frac{FS_a (NSF - S) \cos w}{\gamma H_t \tan \varphi_{ia}} \geq 0,75$	mín	1,11 m
	adotado	1,5 m

Fonte: Autor (2019)

Quadro 14 Dimensionamento da geocélula: berma superior

$P = \gamma LH$		16,82 kN/m
$NSF = P \sin w$		14,68 kN/m
$R_T = S + \frac{R_{crista}}{FS_j} + \frac{R_p}{FS_j} + R_g + E_p + R_c$		25,79 kN/m
$S = \gamma LH \cos w \tan \varphi'$		2,83 kN/m
$R_{crista} = n_j J_{min}$		1,75 kN/m
$R_p = b J_p$		32,04 kN/m
$E_p = \frac{k p \gamma H^2}{2} = \frac{\gamma \tan^2(45^\circ + \varphi_o/2) H^2}{2}$		0,44 kN/m
$FS_g = \frac{R_T}{NFS} \geq 1,5$		1,76
$FS_a = \frac{S_a}{(NFS - S) \cos w} \geq 1,5$		1,5
$S_a = \gamma H_t L_a \tan \varphi_{ia}$	mín	8,68 kN/m
	adotado	16,27 kN/m
$L_a = \frac{FS_a (NFS - S) \cos w}{\gamma H_t \tan \varphi_{ia}} \geq 0,75$	mín	0,5 m
	adotado	1,5 m

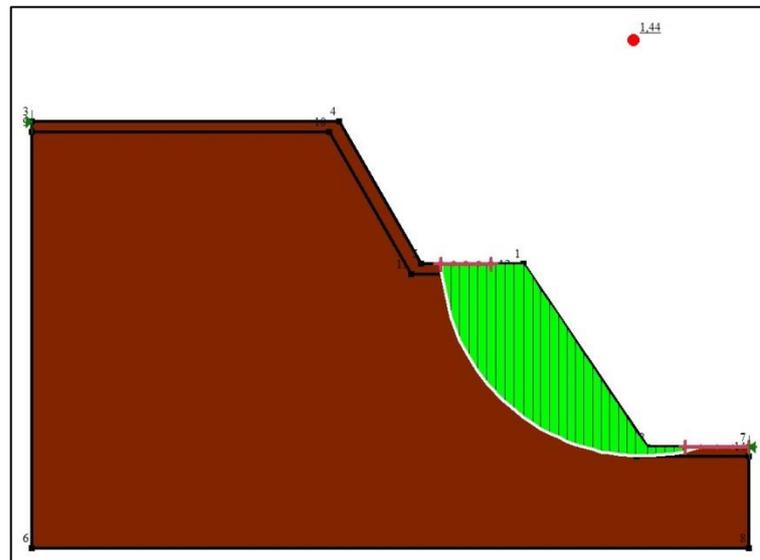
Fonte: Autor (2019)

Em ambos os casos optou-se por utilizar o mesmo solo no preenchimento das geocélulas. Além disso, também foi optado em se utilizar o mesmo comprimento de ancoragem tanto no pé quanto na crista dos taludes. O número de grampos por comprimento de talude foi 5, pois foi o mínimo suficiente para garantir a estabilidade como será mostrado a seguir.

4.2.2.1 Verificação da estabilidade

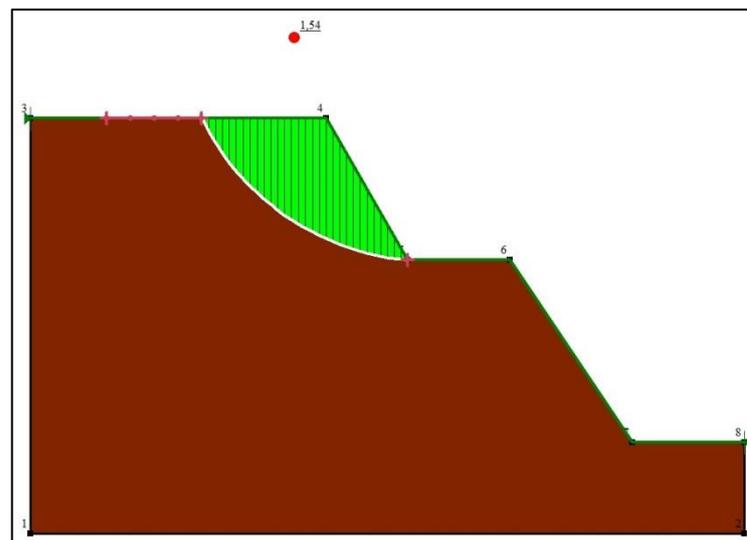
Foram analisadas as situações de cada berma antes da simulação do reforço no talude, conforme figura 39 e figura 40.

Figura 38 Estabilidade talude berma inferior



Fonte: Autor (2019)

Figura 39 Estabilidade berma superior

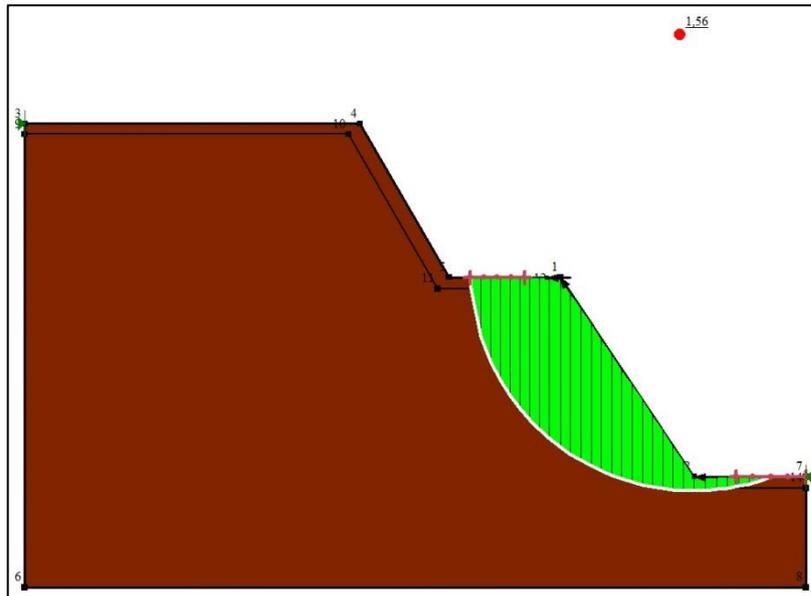


Fonte: Autor (2019)

A berma inferior encontra-se instável ($FS = 1,44$) e a berma superior, apesar de estável ($FS = 1,54$) apresenta um fator de segurança muito pouco conservador, levando em consideração que as informações geotécnicas foram obtidas a partir de correlações empíricas e retroanálise.

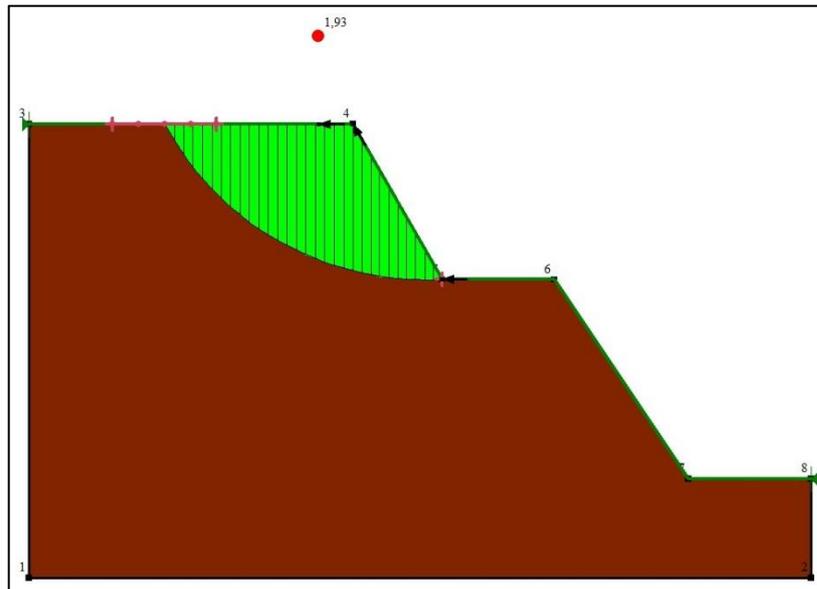
Como o que aumenta a estabilidade do talude com o uso de geocélula é basicamente uma força de atrito oposta ao sentido do deslizamento (Figura 25) e essa força é determinada no dimensionamento no pé, crista e corpo do talude, representou-se essa força como sendo uma carga concentrada em cada componente e bermas analisada (pé, corpo e crista). Dessa forma houve um acréscimo considerável na estabilidade das bermas, conforme figura 41 e figura 42.

Figura 40 Estabilidade berma inferior reforçada com geocélula



Fonte: Autor (2019)

Figura 41 Estabilidade berma superior reforçada com geocélula



Fonte: Autor (2019)

Na berma inferior, o fator de segurança teve um acréscimo 8,33%, de 1,44 passou a ser 1,56, enquanto a berma superior obteve um acréscimo de 25,32%. A estabilidade na berma superior, já estava em condição de estabilidade e ainda teve um acréscimo maior devido ao melhor comprimento (L) do corpo do talude. Isso faz com que a força atuante nessa parte do talude seja menor, ou seja, é necessária uma menor força resistente para conter os esforços.

No dimensionamento, os fatores de segurança na verificação de estabilidade da berma inferior e superior, respectivamente, foram 1,84 e 1,76. Essa diferença em relação ao obtido no SLOPE/W se dá porque no dimensionamento é levado em consideração apenas o equilíbrio das forças atuantes, enquanto no software, por utilizar o método Morgenstern-Price de equilíbrio limite, são levados em consideração forças e momentos atuantes, bem como um fator de escala λ .

5 CONCLUSÕES

Após análises dos dimensionamentos e dos fatores de segurança obtidos, pode-se observar que, quando não se tem informações geotécnicas suficientes para análise de um talude, ainda é possível fazer um estudo para sua estabilização através de modelagem numérica computacional e correlações empíricas encontradas na literatura.

Em relação à estabilidade, tanto a cortina atirantada quanto a geocélula preenchida com solo trouxeram um acréscimo na estabilidade suficientes para que o fator de segurança fosse atendido o padrão das normas ABNT NBR 11682 (2011) e ABNT NBR 5629 (2006). A discussão que deve ser levada em consideração, então, deve ser o custo benefício da execução de cada método de estabilização, pois a cortina atirantada exige que seja feita um corte vertical no talude existente, além de utilizar concreto e aço, já a geocélula pode ser executada com o solo existente, porém é um sistema ainda pouco difundido na região de Palmas, pode ser que se haja pouca disponibilidade de fabricantes por perto e ainda mão de obra especializada para aplicação apropriada.

Por fim, este trabalho apresentou uma maneira de definir um roteiro de ensaios de campo e de laboratório. A partir da retroanálise utilizadas para estimar o ângulo de atrito e coesão do solo e do modelo gerado, é possível estabelecer quais ensaios realmente são cruciais para verificação da estabilidade de um talude e, conseqüentemente para o dimensionamento das soluções de engenharia para sua estabilização. A partir desse trabalho, estas análises podem ser refeitas de maneira mais eficientes e precisas, principalmente de posse de dados topográficos mais precisos. O método escolhido neste trabalho pode servir, então, como uma etapa que antecede a realização dos ensaios de campo e laboratório, otimizando custos e tempo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Maria Margarida de. **Como preparar trabalhos para cursos de pós-graduação**: noções práticas. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 165 p., il.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: estabilidade de encostas: apresentação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629**: execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10318**: geossintéticos: termos e definições. Rio de Janeiro, 2018.

AUGUSTO FILHO, O; VIRGILI, J. C. **Estabilidade de taludes**. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (Eds.) Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 243-269

AVESANI, N. J. O.; BUENO, B. S. **Estabilização de Encostas com Muros de Gravidade de Geocélula**. ABMS. Disponível em: <<https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobrae/2009-avesanineto.pdf>>. Acesso em 10 out 2018.

BARBOSA, Carla Alexandra Fernandes. **Soluções para Estabilização de Taludes Sujeitos a Erosão Superficial**. 2008. 133f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro, 2008.

BARROS, P. L. A. **Obra de contenção**: Manual técnico. Jundiaí: MACCAFERRI, 2014

BENJAMIN, Carlos Vinícius dos Santos. **Avaliação Experimental de Protótipos de Estruturas De Contenção Em Solo Reforçado Com Geotêxtil**. 2006. 326 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, An Engineering Methodology, São Carlos, 2006.

BISHOP, A. W. **The use of slip circle in the stability analysis of slopes**. Géotechnique, London, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Volume 1: Fundamentos. 6.ed. São Paulo: LTC. 1996.

CAPUTO, Homero Pinto, CAPUTO, Armando Negreiros, RODRIGUES, J. Martinho A. **Mecânica dos Solos e suas aplicações** Volume 2: Mecânica das Rochas, Fundações e Obras de Terra. 7.ed. São Paulo: LTC. 2015.

CARVALHO, P. A. S. de Manual de geotecnia: **Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas**. São Paulo: Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológicas, 1991. 388 p. (Publicação IPT; n.1843).

CIDRAL, João Daniel Vanelli. **ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO DE UM TALUDE NA REGIÃO DE BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS**. 2018. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188173>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

FELLENIUS, W. **Calculation of stability of earth dams**. In: TRANS. 2nd CONGRESS ON LARGE DAMS, 4; 1936, Washington, v. 4, 445 p.

FERREIRA, João Luís Ferrás. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELOS MÉTODOS DE JANBU E SPENCER**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

FIAMONCINI, Charles Marcondes. **ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ATRAVÉS DA TÉCNICA DE CORTINA ATIRANTADA: Estudo de caso**. 2009. 111 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

GEO-SLOPE International Ltd. **Stability Modeling with SLOPE/W: An Engineering Methodology**. Canada, 2012.

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

GERSCOVICH, Denise M. S.; DANZIGER, Bernadette R.; SARAMAGO, Robson. **Contenções: teoria e aplicações em obras - Capítulo 7**. – São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINE, G.; NIEBLE, M.C. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

_____. **Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2007. 160 p., il.

_____. **Manual Técnico**. OBER Geossintéticos. Disponível em: <<http://www.obergeo.com.br/catalogo/Manual-Tecnico-FortCell.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

MARQUES, AFONSO C.M; GEROTO, R.E. **Aplicações em Controle de Erosão Superficial**. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. **The analysis of the stability of general slip surfaces**. In: The Institution Of Civil Engineers. Londres, 1965.

REMÉDIO, Flávio Henrique. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERRO DE RESÍDUOS URBANOS UTILIZANDO PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE PROPOSTAS BIBLIOGRÁFICAS E CORRELAÇÕES COM NSPT**. 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

SILVA, Nadine Henriques da. **MUROS DE TERRA ARMADA: VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Estrutura e Geotecnia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

_____. **Tirantes**. Solotrat. Disponível em:
<<http://www.solotrat.com.br/assets/pdf/tirantes.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

_____. **Uso de Geocélulas em Obras de Engenharia**. GeoAcademy. Disponível em:
<<https://geoacademy.com.br/p/uso-de-geocelulas-em-obras-de-engenharia>>. Acesso em: 10 out. 2018.

_____. **Utilização de Geocélula para correção de solo e proteção de taludes**. Fundação LAN. Disponível em:< <https://sites.google.com/site/geotecniaefundacaolan/149-utilizacao-de-geocelula-para-correcao-de-solo-e-protecao-de-taludes>>. Acesso em: 10 out. 2018.

VARNES, D.J. **Slope Movement Types and Processes**. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences. Washington D.C.: 1978.

VASCONCELOS, L. Y.; YOSHITAKE, M.; FRANÇA, M. S; SILVA, da F. G. **Método de Estudo de Caso como Estratégia de Ensino, Pesquisa e Extensão**. *UNOPAR Cient., Ciênc. Human. Educ.*, Londrina, v. 16, n. 1, p. 49-59, Jan. 2015

VEDPATHAK, S.; DALMIA, G.; BAGLI, S. **Protecting Slopes Through Geocells – An Innovative Paradigm**. Three Decades of Geosynthetics in India. New Deli: 2015.

WALTHAM, A. C. **Foundations of Engineering Geology**, Second Edition. E & FN SPON, New York:1994

ZÁRUBA, Q.; MENCL V. **Landslides and Their Control, Volume 31**. 2 ed. Netherlands: Elsevier Science, 1982.

Arquivo de entrada: TCC_II_7_05.docx (8209 termos)

Arquivo encontrado		Total de termos	Termos comuns	Similaridade (%)
uenf.br/cct/teciv/fi...	Visualizar	10760	141	0,74
cudell.pt/sites/cude...	Visualizar	9913	96	0,53
bvsm.s.saude.gov.br/b...	Visualizar	32726	202	0,49
ibc.gov.br/images/co...	Visualizar	5278	55	0,4
fdci.br/arquivos/13/...	Visualizar	639	12	0,13
tecnica.com/conteud...	Visualizar	2211	11	0,1
forumdaconstrucao.co...	Visualizar	1749	10	0,1
faculdadesja.com.br/...	Visualizar	130	4	0,04
t4h.com.br/instituic...	Visualizar	138	2	0,02
ulbra-to.br/	Visualizar	372	1	0,01