

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

GABRIELA LETICIA SCHMIDT

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REFORÇO DE TALUDES COM
SOLO GRAMPEADO E SOLO REFORÇADO COM GEOTÊXTIL PARA CASCAVEL/PR**

**CASCAVEL - PR
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

GABRIELA LETICIA SCHMIDT

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REFORÇO DE TALUDES COM
SOLO GRAMPEADO E SOLO REFORÇADO COM GEOTÊXTIL PARA CASCAVEL/PR**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Professor Orientador: Me. Eng. Civil Maycon André de Almeida.

**CASCAVEL - PR
2018**

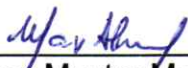
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

GABRIELA LETICIA SCHMIDT

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REFORÇO DE TALUDES
COM SOLO GRAMPEADO E SOLO REFORÇADO COM GEOTÊXTIL PARA
CASCAVEL/PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Mestre Engenheiro Civil Maycon André de Almeida.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Professor Mestre Maycon André de Almeida.
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil



Professor Mestre Guilherme Irineu Venson
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Engenheiro Civil



Professor Mestre Elenilton Jairo Dezengrini
Centro Universitário Assis Gurgacz
Analista de Sistemas

Cascavel, 06 de dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, por iluminar meu caminho, por me dar forças e por tornar tudo isso possível.

Agradeço aos meus pais, Ari e Fátima, pelo apoio durante estes cinco anos de graduação. A todos meus familiares, agradeço as palavras de encorajamento, principalmente neste último ano. Obrigada por me apoiarem e acreditarem em mim, e por estarem sempre dispostos incondicionalmente a ajudar-me em qualquer momento. A todos os meus amigos e colegas que estiveram presentes comigo nesta caminhada, por me darem forças e palavras de conforto para continuar nos momentos de dificuldade.

Minha gratidão ao meu professor orientador Maycon André de Almeida, pela completa dedicação durante este trabalho, por todo o conhecimento transmitido a mim, por todas as correções, sugestões, conselhos e críticas. Agradeço por me orientar e me inspirar.

À equipe dos laboratórios de solos do Centro Universitário Assis Gurgacz, pela ajuda nos ensaios, fornecimento de materiais e apoio sempre. Também agradeço a coordenação de Engenharia Civil, pelos incentivos e auxílios.

RESUMO

Com a crescente necessidade de expansão urbana e utilização de áreas consideradas de risco por parte do poder público, vêm tornando-se muito importantes tecnologias de reforço de solo para dar segurança aos taludes formados devido às escavações. Com a realização de cortes em maciços, caso as tensões cisalhantes ultrapassem a resistência ao cisalhamento do material, ocorrem movimentos de massa, ou seja, deslizamentos de taludes; por isso, é necessário que haja reforços que estabilizem os maciços. Sendo assim, o presente trabalho analisou a aplicabilidade de duas soluções para reforço de taludes: solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil auto envelopado, aplicando dados e parâmetros de resistência do solo de Cascavel obtidos no Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz, respectivamente por Zen e Almeida (2018) e Almeida e Oliveira (2018), através do *software Geoslope* 2018 R2, para obtenção do fator de segurança para os sistemas analisados. Os métodos de análise de equilíbrio limite utilizados foram os de Bishop Simplificado, Morgenstern-Price e Fellenius, sendo este o mais conservador para taludes hipotéticos com seis metros de altura e inclinação de 65° e 75° para análise em solo grampeado e um talude com 90° para solo reforçado com geossintéticos. Pelo método de Fellenius, os taludes com inclinação de 65° e 75° obtiveram um fator de segurança variado de 1,390 para 2,026 e 1,136 para 1,863, respectivamente. Para a simulação com o sistema de solo reforçado, com a utilização de cinco camadas de malhas geossintéticas o FS obtido foi de 1,863 pelo método de Fellenius e com seis camadas o valor foi de 2,035. Quando analisado o comprimento dos reforços, apenas a partir de seis metros de comprimento o talude atingiu o fator de segurança mínimo de 1,5.

Palavras-chave: solo grampeado, solo reforçado, fator de segurança.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Classificação dos solos quanto à granulometria.	16
Tabela 02: Classes de causas de deslizamentos de encostas.	25
Tabela 03: Principais tipos de obras de estabilização de taludes e encostas.	31
Tabela 04: Resumo das camadas de solo do CEEF.	48
Tabela 05: Parâmetros de resistência ao cisalhamento para o subsolo do CEEF.	48
Tabela 06: Fatores de segurança obtidos nos taludes antes e depois do reforço.	56
Tabela 07: Fatores de segurança obtidos no talude de 90° antes e depois do reforço.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Zona cisalhada e superfície de cisalhamento.	18
Figura 02: Aproximação das partículas devido à coesão.	18
Figura 03: Resistência entre partículas.	19
Figura 04: Equipamento de ensaio de cisalhamento direto.	20
Figura 05: Diagrama tensão x deformação.	21
Figura 06: Esquema de uma câmara de ensaio de compressão triaxial.	21
Figura 07: Envoltória de resistência.	22
Figura 08: Talude artificial de solo.	24
Figura 09: Efeito da inclinação nas forças (N: força de atrito, D: peso do corpo).	25
Figura 10: Padrões de inclinação para taludes estabelecidos empiricamente.	28
Figura 11: Ruptura por queda e tombamento.	28
Figura 12: Ruptura por escorregamento e espalhamento, respectivamente.	29
Figura 13: Ruptura por escoamento.	29
Figura 14: Movimento de massa baseado na velocidade.	30
Figura 15: Fluxograma para utilização dos tipos de obras de estabilização de taludes.	31
Figura 16: Superfície de ruptura pelo das fatias.	32
Figura 17: Esquema do grampeamento de solo.	34
Figura 18: Detalhamento dos grampos.	34
Figura 19: Fases da execução de uma obra em solo grampeado em talude escavado.	35
Figura 20: Face de talude verticalizado (a) e suave (b).	37
Figura 21: Sistema de solo grampeado concluído.	38
Figura 22: Esquema da composição de um sistema de solo reforçado com geotêxtil.	40
Figura 23: Processo executivo do solo reforçado.	42
Figura 24: Talude com solo reforçado com geotêxtil.	43
Figura 25: <i>Software</i> durante modelagem de talude.	44
Figura 26: Curvas granulométricas determinadas para o solo do CEEF com e sem defloculante.	46
Figura 27: Índices de consistência ao longo da profundidade.	46
Figura 28: Média do índice de resistência à penetração ao longo da profundidade.	47
Figura 29: Média do índice de resistência à penetração ao longo da profundidade.	50
Figura 30: Taludes aplicados no <i>software</i> Geoslope.	51
Figura 31: Superfície de ruptura natural dos taludes para o método de Bishop Simplificado.	54

Figura 32: Taludes de 65° e 75° em solo grampeado pelo método de Bishop Simplificado. .	55
Figura 33: Talude com cinco e seis camadas de reforço, respectivamente, pelo método de Bishop Simplificado.	57
Figura 34: Reforços com três, quatro e cinco metros de comprimento, respectivamente, pelo método de Bishop Simplificado.	58

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CD – *Consolidated drained* (tipo de ensaio triaxial, consolidado drenado).

CU – *Consolidated undrained* (tipo de ensaio triaxial, consolidado não drenado).

UU – *Unconsolidated undrained* (tipo de ensaio triaxial, não consolidado não drenado).

SPT – *Standart Penetration Test*.

LL – Limite de liquidez.

LP – Limite de plasticidade.

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

TRB – Sistema de Classificação *Transportation Research Board*.

CEEF – Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz.

FS – Fator de segurança.

Fy_k – Resistência característica ao escoamento do aço.

φ – Ângulo de atrito.

C – Coesão.

σ₃ – Tensão confinante, ou tensão principal menor.

σ₁ – Tensão axial, ou tensão principal maior.

μ – Pressão neutra.

γ – Peso específico.

τ – Resistência de cisalhamento.

σ – Tensão normal.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1.1 INTRODUÇÃO	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	14
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	14
CAPÍTULO 2	15
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.1 Solos	15
2.1.1.1 Solos lateríticos	16
2.1.1.2 Solos colapsíveis	17
2.1.2 Resistência ao cisalhamento do solo	17
2.1.2.1 Parâmetros de resistência: atrito e coesão	18
2.1.3 Ensaio para determinar a resistência ao cisalhamento	20
2.1.3.1 Ensaio de cisalhamento direto	20
2.1.3.2 Ensaio triaxiais	21
2.1.4 Taludes	23
2.1.5 Fatores que influenciam a instabilidade de taludes	24
2.1.5.1 Morfologia e ação do tempo	25
2.1.5.2 Água, vegetação e clima	26
2.1.5.3 Ações antrópicas	27
2.1.6 Modos de rompimento de taludes	28
2.1.7 Estabilização de taludes	30
2.1.8 Análise de estabilidade de taludes	31
2.1.9 Técnicas de reforço de solo	33
2.1.10 Solo grampeado	33
2.1.10.1 Processo executivo	35
2.1.10.2 Vantagens e desvantagens do solo grampeado	38
2.1.11 Reforço de solo com geotêxtil	39

2.1.11.1	Processo construtivo	42
2.1.11.2	Vantagens das estruturas em solo reforçado com geossintéticos	43
2.1.12	<i>Software Geoslope</i>	44
CAPÍTULO 3		45
3.1	METODOLOGIA.....	45
3.1.1	Tipo de estudo e descrição do método	45
3.1.2	Caracterização do solo de Cascavel	45
3.1.3	Aplicação dos sistemas de reforço no solo de Cascavel.....	49
3.1.4	Simulação em <i>software</i> das estruturas de reforço	50
CAPÍTULO 4		53
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1.1	Situação natural dos taludes	53
4.1.2	Reforço em solo grampeado.....	55
4.1.3	Solo reforçado com geotêxtil	56
CAPÍTULO 5		60
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
CAPÍTULO 6		62
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS		63

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente ocupação das áreas urbanas, as obras de estruturas de contenções estão cada vez mais presentes nos projetos de engenharia. É frequente a criação de subsolos para estacionamentos em edifícios, sendo necessárias escavações, realizadas geralmente na vertical, e precisam de reforço para manter seu equilíbrio (MEDEIROS e CUNHA, 2018).

De acordo com a ABGE (1998), devem ser tomadas medidas de estabilização de taludes quando suposta sua possível instabilidade a fim de evitar possíveis catástrofes. As medidas de estabilização devem ser tomadas de acordo com as condições existentes, sendo necessários estudos geotécnicos e geológicos para definir as características geotécnicas dos materiais existentes, e definir os mecanismos de ruptura.

Com a execução de cortes em maciços pode vir a ocorrer movimentos de massa, ou seja, escorregamento de taludes ao longo da superfície de ruptura, caso as tensões cisalhantes ultrapassem a resistência ao cisalhamento do material (ABGE, 1998).

De acordo com Magalhães e Azevedo (2016), as contenções são estruturas projetadas para resistir a empuxos de terra e/ou água, cargas estruturais e quaisquer outros esforços causados por estruturas ou equipamentos, gerando uma estabilidade ao maciço. As estruturas de contenção e estruturas de reforço devem prezar pela segurança estrutural, com a otimização de custos, durabilidade da obra e pela geração do menor impacto ambiental possível.

Com o desenvolvimento da ciência e tecnologia, estudos cada vez mais aprofundados são realizados em relação à análise da estabilidade de taludes, e nos dias de hoje é possível contar com o auxílio de *softwares*. Estes estudos são muito importantes, considerando que as consequências causadas pela ruptura de um talude são imensuráveis.

Uma técnica de reforço e estabilização de maciços muito utilizada é a de solo grampeado, que permite a contenção de taludes por meio da execução de chumbadores ou grampos, concreto projetado e drenagem. Os grampos geram a estabilização geral do maciço, o concreto projetado dá estabilidade local junto ao paramento e a drenagem age em ambos os casos (ZIRLIS *et al.*, 2014).

Outra opção para estabilidade de taludes é o sistema chamado de solo reforçado, que consiste na introdução de geotêxteis no maciço de solo. Esta técnica combina alguns componentes, sendo o solo compactado em camadas que envolvem as fibras poliméricas com alta resistência à tração, com capacidade de reforçar o solo (ERHLICH e BECKER, 2009).

Sendo assim, neste estudo foi analisada a aplicação de reforços de solo com solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil, a fim de estabilizar maciços com o solo da cidade de Cascavel, utilizando dados do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEFF) obtidos por Zen e Almeida (2018), e parâmetros de resistência do solo obtidos por Almeida e Oliveira (2018), sendo simulado em *software* o fator de segurança para os dois tipos de sistema.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a aplicabilidade de soluções de reforço de solo para taludes através de solo grampeado e de solo reforçado com geotêxtil no solo de Cascavel utilizando dados do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEFF) com o uso do *software Geoslope*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a aplicação de soluções de reforço de solo para taludes através de solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil;
- Verificar situações de taludes críticos para o solo de Cascavel considerando dados do Campo Experimental de Engenharia Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEFF);
- Propor soluções dos dois tipos de reforço de solo a fim de obter fatores de segurança aceitáveis para os taludes, com maior economia, através do *software Geoslope* 2018 R2.

1.3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa teve como objetivo realizar um estudo entre estruturas de reforço de taludes através de sistemas de solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil, utilizando parâmetros de resistência obtidos em ensaios triaxiais com o solo do CEEF, analisando o fator de segurança e a economia para cada solução.

A ocorrência de maciços de terra instabilizados, principalmente em áreas urbanas densamente povoadas, em cujas encostas a ocupação inadequada e irregular tem levado inúmeras pessoas à morte devido a deslizamentos, tragédias que poderiam ser impedidas ou minimizadas se sistemas de contenção tivessem sido utilizados.

É possível diminuir os desastres que ocorrem em virtude de escavações com a utilização de estruturas de contenções adequadas, definidos a partir de uma análise de fatores como disponibilidade de equipamentos, custo, tempo de execução, acessibilidade de equipamentos ao local, e, principalmente, conhecimento do solo a se conter.

Uma forma de reforço é o solo grampeado, ou seja, a introdução de elementos resistentes à flexão composta, normalmente barras de aço envolvidas com calda de cimento, denominados de grampos. Estes elementos de reforço não recebem protensão e sua distribuição na face do talude a ser estabilizado dependerá da sua geometria, das propriedades mecânicas do solo e dos próprios grampos.

Outra opção de reforço é o solo reforçado, onde são inseridos em uma massa compactada de solo, materiais geossintéticos resistentes à tração, gerando uma interação entre o solo e o material e estabilidade do maciço.

Estas técnicas têm por objetivo restringir movimentações de massas de solo, transferindo esforços de uma zona potencialmente instável para uma zona resistente, gerando a estabilização de taludes. O estudo dos aspectos de cada sistema de obras de reforço e aplicação em *software* para obtenção do fator de segurança para o solo de Cascavel pode vir a ajudar na escolha do método mais adequado de acordo com a necessidade.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Quais as soluções apresentadas pelos sistemas de reforço de taludes através de solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil para taludes com o solo da cidade de Cascavel, região oeste do Paraná?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

As causas e mecanismos responsáveis por deslizamentos são variados. Podem ocorrer devido à chuva (causando aumento no teor de umidade no solo), percolação de água, tipos e parâmetros do solo, descontinuidades, sobrecargas, escorregamentos devido à inclinação ou ainda erro no corte do talude.

De acordo com Cruden e Varnes (1996), os agentes deflagradores dos movimentos de massa podem ocorrer em função de causas internas (efeito de oscilações térmicas e diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo), causas externas (mudanças na geometria do talude, efeitos de vibrações, ausência de cobertura vegetal, precipitações), e ainda causas intermediárias (elevação do nível piezométrico, elevação da coluna de água, variações do lençol freático, erosões, diminuição da coesão do solo, entre outros fatores semelhantes).

Escavações para obras de subsolos são cada vez mais comuns em grandes centros urbanos, conseqüentemente alterando a condição de equilíbrio do solo, sendo necessária a utilização de algum tipo de estrutura de contenção com finalidade de conter os esforços gerados pelo solo.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo será limitado em analisar os dois sistemas de reforço de solo para taludes conforme dados de caracterização do solo de Cascavel retirados do CEEF de acordo com Zen e Almeida (2018), parâmetros de resistência do solo obtidos por Almeida e Oliveira (2018).

As obras de estabilização que serão analisadas são do tipo solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil, de acordo com os parâmetros de resistência do solo aplicados no *software Geoslope*, determinando o fator de segurança para os sistemas de melhoramento de solo estudados.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas algumas definições básicas do solo, o conceito de taludes e possíveis causas de instabilidade e deslizamentos, sistema de solo grampeado e solo reforçado com geotêxtil, e ainda a utilização do *software Geoslope* para obtenção do fator de segurança dos taludes.

2.1.1 Solos

De acordo com a NBR 650 (ABNT, 1995), o solo é um material proveniente de decomposição de rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ter matéria orgânica, ou não. Pode-se dizer também que é o produto da decomposição e desintegração de rochas pela ação de agentes atmosféricos.

Para Lima e Lima (2007), durante o desenvolvimento do solo, há a ação de diversos processos, como perdas, transformações, transportes e adições. Esses processos são responsáveis pela transformação da rocha em todos os tipos de solos existentes, de acordo com a variação dos fatores de formação.

Segundo Santos (2007), os solos são originados de uma rocha matriz, através da ação do tempo, condições de temperatura, ação do vento e da água. Esses fenômenos químicos fazem com que a rocha se desgaste, formando a parte mineral dos solos (areia, calcário e argila), e a parte orgânica, também chamada de húmus, que surge dos restos de animais e vegetação decomposta. Os tipos de partículas que formam o solo dependem da composição da rocha que lhe deu origem.

As quatro principais partículas que compõe são: areia, silte, argila e pedregulho. O reconhecimento dos solos pode ser complexo, pois eles são muito heterogêneos, devido às variadas partículas que os compõem. Por isso as denominações mais adequadas são feitas de acordo com a classificação da textura dos solos, em função do tamanho do diâmetro das partículas sólidas que constituem o material, como por exemplo, “argila siltosa”, “silte argiloso”, “areia argilosa”, entre outros. Os diâmetros das partículas que podem estar presentes na estrutura do solo podem ser vistos na Tabela 01 (CAMPOS, 2009).

Tabela 01: Classificação dos solos quanto à granulometria.

Tipos de Solo	Diâmetro dos grãos (mm)
Argila	Menor que 0,002
Silte	0,002 a 0,06
Areia fina	0,06 a 0,2
Areia média	0,2 a 0,6
Areia grossa	0,6 a 2,0
Pedregulho	Maior que 2,0

Fonte: NBR 6502 (ABNT, 1995).

De acordo com Teixeira e Figueiredo (2006), os diferentes tipos de granulometria e sedimentos influenciam o grau de porosidade do talude, e, conseqüentemente, absorção e retenção de água. Na composição mineralógica, essas misturas de composições geram comportamentos diferenciados em termos de erosão, dureza, coesão, etc.

O solo pode ser classificado como residual, laterítico, colapsível, transportado ou orgânico. Todos os solos se originam de deformações de rochas que constituíam a crosta terrestre, decorrente do intemperismo físico-químico, o qual dá origem aos solos residuais. O solo pode ser chamado de residual, transportado e orgânico, devido às suas formações (MIGUEL e TEIXEIRA, 1999).

Para Miguel e Teixeira (1999), o solo residual é o solo que permanece sobre a rocha de sua origem, apresentando uma grande heterogeneidade nos tamanhos das partículas em razão da decomposição dos materiais, que não é uniforme. Já o solo transportado se forma sobre a rocha matriz e então é removido por agentes transportadores, apresentando maior uniformidade no tamanho das partículas. Os solos orgânicos são formados pela mistura de organismos com sedimentos já existentes.

2.1.1.1 Solos lateríticos

Os solos lateríticos são os solos típicos da evolução em climas quentes e úmidos e invernos secos, encontrados principalmente nas regiões tropicais. Esses solos se apresentam na natureza, geralmente não saturados e com elevados índices de vazios, gerando pequena capacidade de suporte, mas quando compactados, tem essa capacidade elevada, sendo muito utilizados em aterros e pavimentações (MELFI, 1997 e PINTO, 2006).

O Brasil, por se tratar de um país predominantemente tropical, aproximadamente 60% do seu solo possui formação laterítica. Vários tipos de materiais lateríticos podem ser encontrados em diferentes regiões do país. Na região Sul, o solo possui formação laterítica

formada sobre rochas vulcânicas, tendo a hematita como o principal constituinte ferífero (MELFI, 1997).

2.1.1.2 Solos colapsíveis

Esse tipo de solo é comumente encontrado em estado não saturado, possuindo alto índice de vazios, o que indica sua baixa capacidade de carga. Quando é realizado o processo de compactação, sua capacidade de carga se eleva, sendo normalmente encontrado em pavimentação e em aterros (CAPUTO, 1996).

De acordo com Rebello (2008), denominam-se colapsíveis os solos com grande porosidade, formado por areias e/ou argilas que, ao entrar em contato com a água, causam o rompimento da ligação entre suas partículas, apresentando alteração imediata da sua estrutura, e consequentemente, ocasionando recalque bastante drástico e perigoso.

Para Caputo (1996), o solo colapsível é caracterizado por possuir elevada porosidade e quando umedecido, sua estrutura entra em colapso, gerando recalques nas obras. Esse colapso ocorre devido à destruição dos mecanismos capilares, responsáveis pela tensão de sucção, ou a um amolecimento do cimento natural, que mantém as partículas e as agregações de partículas unidas.

2.1.2 Resistência ao cisalhamento do solo

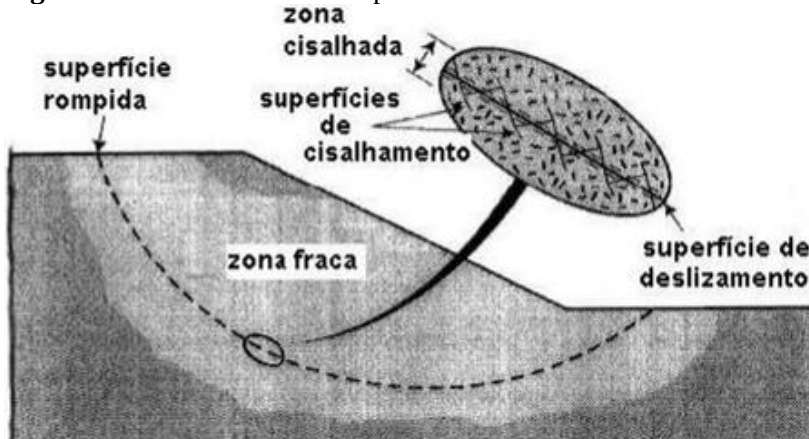
De acordo com Faro (2015), a resistência ao cisalhamento do solo é a máxima pressão de cisalhamento que o solo suporta sem sofrer ruptura, ou o valor da tensão de cisalhamento do solo no plano de ruptura no momento da ruptura. Essa resistência envolve dois componentes: atrito e coesão.

Para Das (2011) a resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e deslizamentos ao longo de qualquer plano no seu interior.

Segundo Borgatto (2006), os escorregamentos de taludes ocorrem quando há uma diminuição da resistência interna do solo, que é oposto ao movimento de terra, que ainda pode ter acréscimos de agentes externos sendo aplicados no local. A ruptura é caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo. Ou seja, existe uma

camada de solo em torno da superfície de cisalhamento que perde suas características durante a ruptura, formando a zona cisalhada, conforme apresentado na Figura 01.

Figura 01: Zona cisalhada e superfície de cisalhamento.



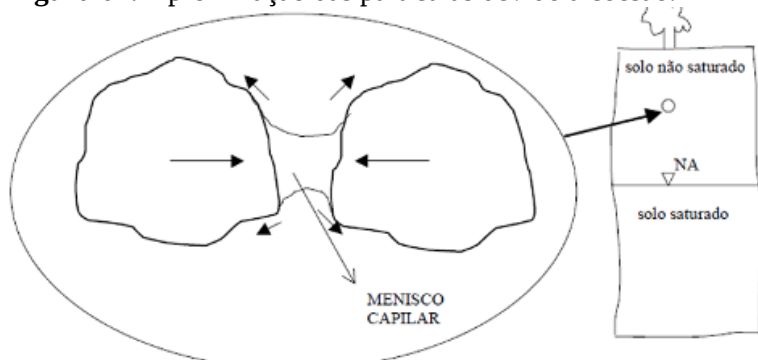
Fonte: Borgatto (2006).

2.1.2.1 Parâmetros de resistência: atrito e coesão

Usualmente empregado na geotecnia, ensaios de cisalhamento são utilizados para avaliar a resistência de taludes de terra a deslizamentos. As características de cisalhamento do solo são representadas pelo valor de intercepto de coesão e ângulo de atrito, que proporcionam ao solo a resistência ao cisalhamento (ORTIGÃO, 2007).

De acordo com Mitchell (1976), a coesão do solo é caracterizada pela atração entre suas partículas, ou seja, é uma força de atração entre os grãos, podendo ser real ou aparente. A coesão real é o resultado do efeito de agentes cimentantes em sua composição. Já a coesão aparente é o resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, fazendo com que as partículas se aproximem, conforme o esquema da Figura 02.

Figura 02: Aproximação das partículas devido à coesão.

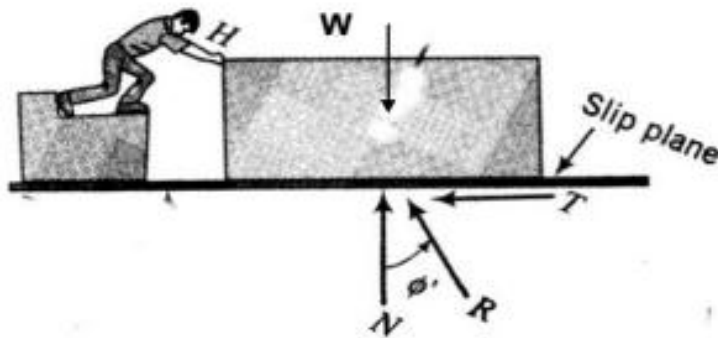


Fonte: Almeida (2014).

A argila é capaz de se manter em torrões ou blocos, pode ser cortada de diversas formas e continuar unida devido à coesão que esse tipo de solo possui, chamados de solos coesivos. Os solos que não têm essa propriedade são chamados de não coesivos, como as areias puras e pedregulhos, que se desmancham e perdem sua forma facilmente ao serem cortados ou escavados (VARGAS, 1977).

O ângulo de atrito é a força tangencial necessária para deslizar um plano sobre o outro, é o valor obtido entre a força normal e resultante das forças tangencial e normal sem que haja deslizamento. Na Figura 03 há um exemplo onde o peso do corpo gera uma carga sobre o plano e para que se desloque é necessário que haja uma força proporcional ao coeficiente de atrito entre os materiais e a carga normal (PINTO, 2006).

Figura 03: Resistência entre partículas.



Fonte: Pinto (2006).

Para Lebert e Horne (1991), nos solos com textura arenosa a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas. Já nos solos argilosos ela depende não só do atrito, mas também da coesão do solo.

Para Craig (2011), o ângulo de atrito entre os grãos de argila e areia é diferente por causa das forças transmitidas. Na areia a força de contato é maior e permite o contato direto entre os grãos, eliminando a água nos vazios, já na argila, a força de contato é menor e insuficiente para expulsar a água adsorvida pelos grãos.

Segundo Caputo (1988), a resistência ao cisalhamento do solo, ângulo de atrito e coesão é relacionada de acordo com a Equação 1.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

2.1.3 Ensaios para determinar a resistência ao cisalhamento

De acordo com Pinto (2006), costumeiramente há dois tipos de ensaios utilizados para determinar os parâmetros necessários para obter a resistência ao cisalhamento dos solos: ensaio de cisalhamento direto e ensaio de compressão triaxial.

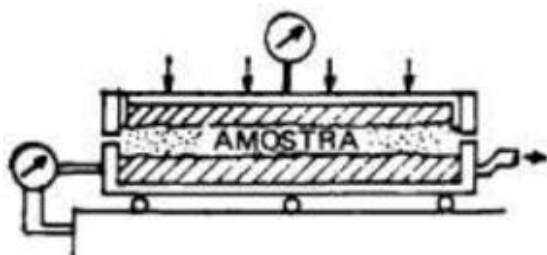
Segundo Kayadelen (2007), para avaliar a estabilidade de taludes em obras de terra (como barragens, cortes e aterros), são determinados parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto coesivo e ângulo de atrito), utilizando ensaios de cisalhamento direto, ou ensaios triaxiais. Esses ensaios podem ocorrer em condições saturadas ou não saturadas.

2.1.3.1 Ensaio de cisalhamento direto

Para Pinto (2006), o ensaio de cisalhamento direto é um dos primeiros procedimentos para determinar a resistência ao cisalhamento do solo, e tem como base o critério de Coulomb. O ensaio consiste na aplicação de um carregamento, chamado de tensão normal, em um plano e na determinação da tensão cisalhante que desencadeia a ruptura. A tensão cisalhante é dada em função do deslocamento horizontal (cisalhamento).

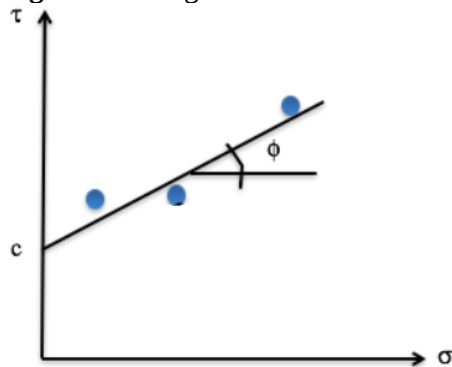
De acordo com Caputo (1988), a tensão de cisalhamento sob uma tensão normal, capaz de provocar a ruptura da amostra de solo, é colocada em uma caixa composta de duas partes deslocáveis entre si, conforme a Figura 04.

Figura 04: Equipamento de ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Caputo (1988).

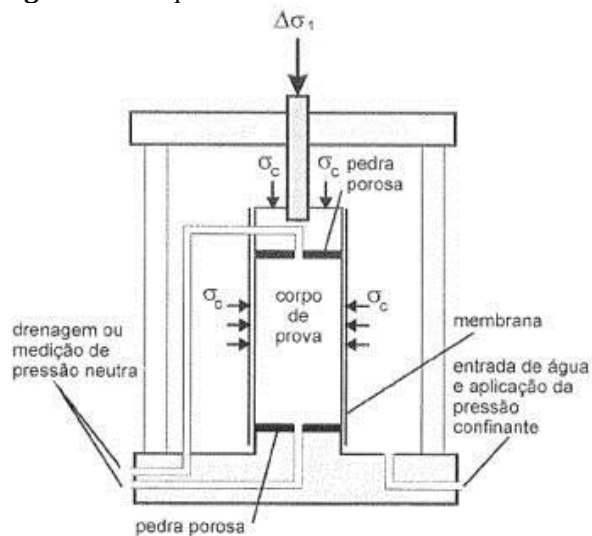
Esse tipo de ensaio pode ser realizado controlando a tensão, como também controlando a deformação aplicada, resultando sempre em pares de valores de tensão deformação, conforme Figura 05. Com esses pares ordenados, é definida uma reta em um sistema cartesiano, e assim determinando o ângulo de atrito (ϕ) e o intercepto de coesão (c).

Figura 05: Diagrama tensão x deformação.

Fonte: Google Imagens (2018).

2.1.3.2 Ensaios triaxiais

Para Dias (2007), o ensaio triaxial convencional tem o objetivo de medir as propriedades mecânicas do solo e seu procedimento consiste em: um corpo de prova indeformado (amostra de solo) revestido por uma membrana impermeável é colocado em uma câmara onde é submetido a condições de tensão confinante (σ_3 ou σ_c) e tensão axial (σ_1). A Figura 06 apresenta um esquema do equipamento utilizado em ensaios triaxiais.

Figura 06: Esquema de uma câmara de ensaio de compressão triaxial.

Fonte: Souza (2000).

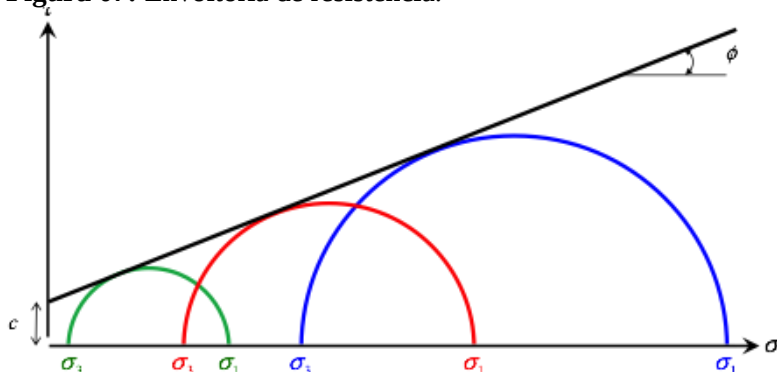
O procedimento, segundo Dias (2007), consiste na aplicação de uma tensão confinante na câmara, através de água, ou ar comprimido, transmitindo pressão para o corpo de prova. As tensões axiais são transmitidas por um pistão apoiado no cabeçote fixado no corpo de prova.

Pedras porosas são colocadas em cima e em baixo do corpo de prova, para permitir a passagem de água.

Para cada tensão confinante (σ_3), haverá uma tensão axial (σ_1) que provocará a ruptura. A diferença $\sigma_1 - \sigma_3$ definirá um estado de tensões de ruptura representado por um semicírculo no gráfico de Mohr, também chamado de tensão desviadora. A tangente aos diversos círculos definirá os parâmetros de atrito e coesão.

De acordo com Caputo (2011), os dois parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e coesão), podem ser obtidos através do círculo de Mohr-Coulomb, ou seja, um círculo gerado pelas tensões cisalhantes em função dos carregamentos normais, sendo tangenciado por uma reta, chamada de envoltória de resistência, em seus pontos máximos, onde a ruptura só acontecerá quando a tensão cisalhante ultrapassar o círculo. No ponto onde a reta tangenciar o eixo de tensão cisalhante, tem-se o valor de intercepto de coesão; o ângulo formado entre a tangente deste círculo e o eixo de tensões é o valor do ângulo de atrito, conforme a Figura 07.

Figura 07: Envoltória de resistência.



Fonte: IESB (2018).

O equipamento permite medir ou dissipar pressões neutras, medir variações de volume e drenar ou não drenar o corpo de prova durante o ensaio. Entre as diversas maneiras de conduzir o ensaio de compressão triaxial destacam-se três: Ensaio adensado drenado, adensado não drenado e ensaio não adensado e não drenado (DIAS, 2007).

No ensaio adensado drenado, ou *consolidated drained* (CD) a drenagem do corpo de prova é permanente. É aplicada a pressão confinante e espera-se que a amostra adense, dissipando a pressão neutra e aumentando lentamente a tensão axial, deixando a água sob pressão sair. Assim, a pressão neutra durante todo o carregamento é considerada nula e as tensões efetivas são indicadas pelas tensões totais aplicadas. Esse ensaio também é conhecido

como ensaio lento, pois, para argilas, o carregamento axial requer 20 dias ou mais (PINTO, 2006).

Já no ensaio adensado não drenado, ou *consolidated undrained* (CU), como no CD, é aplicada a tensão confinante e deixa-se dissipar a pressão neutra, porém, é aplicada a carga axial sem drenar a amostra. Se as pressões neutras forem medidas, podem-se determinar as pressões efetivas e a envoltória de resistência em um prazo muito menor que no CD. Por isso, também é chamado de ensaio rápido pré-adensado (PINTO, 2006).

E no ensaio não adensado não drenado, ou *unconsolidated undrained* (UU), o corpo de prova é submetido à tensão de confinamento e à carga axial, sem drenagem. O teor de umidade permanece constante e tendo a amostra saturada, não possui alteração no volume, ou seja, o adensamento. Como não requer tempo para drenagem, também é chamado de ensaio rápido (PINTO, 2006).

2.1.4 Taludes

Segundo Griffiths (2004) e Adriano (2009), quando a superfície de solo, ou rocha, forma um ângulo com o plano horizontal referido, pode ser chamado de talude, cuja origem é natural, como em encostas, ou artificial, como taludes de corte e aterro.

As encostas e taludes naturais são as superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou ainda mistos, quando formados por solo e rocha, originados por processos geológicos e geomorfológicos variados, com modificações antrópicas, como cortes, desmatamentos, sobrecargas, entre outros (FILHO e VIRGILI, 1998).

Para Filho e Virgili (1998), o termo “encosta” distingue dois tipos de taludes, sendo o talude de corte, que é formado a partir de escavações diversas, e talude artificial, formado pelo declive de aterros com materiais de diversas granulometrias e origens, possuindo ainda rejeitos industriais, urbanos ou de mineração em sua composição.

Cruden e Varnes (1996) distinguem os taludes naturais e artificiais de forma simples. Os originados por fenômenos naturais, como atividades tectônicas, formações rochosas, fenômenos erosivos, entre outros, formam inclinações naturais. A partir do momento em que ocorre a intervenção humana, como as construções civis, os taludes classificam-se como artificiais (escavações em minas, aterros e outras obras), como pode ser visto na Figura 08.

Figura 08: Talude artificial de solo.



Fonte: Fonseca (2014).

É verificada uma constante progressão inata para dissipação de energia na natureza, ou seja, para atingir o equilíbrio. Em taludes não é diferente; essa aptidão para atingir um estado de equilíbrio está sempre presente, afetando, a estabilidade dos taludes (KELLER, 2012).

Segundo Carmignani e Fiori (2009), um talude é submetido a três diferentes campos de forças: força pelo escoamento de água, peso dos materiais, e à resistência ao cisalhamento. Essas forças precisam estar em equilíbrio, pois o peso dos materiais e a percolação de água tende a levar a massa de solo para o escorregamento vertical, e a tensão ao cisalhamento tende a frear isso.

2.1.5 Fatores que influenciam a instabilidade de taludes

De acordo com Caputo (2000), geralmente as causas de escorregamentos são devido ao aumento de peso do talude (incluindo as cargas aplicadas), chamadas de causas externas, e a diminuição da resistência ao cisalhamento do material (causas internas).

São vários fatores que influenciam a instabilidade de taludes. Fatores que afetam a dinâmica das forças e interações do sistema, podendo ser internos ou externos, ou seja, inerentes ao talude, ou resultado de outros fenômenos. A composição geológica, a morfologia, o clima, a vegetação, a água, o tempo e a atividade do homem são alguns fatores que contribuem para a instabilidade de taludes (PRESS e SIEVER, 2001).

Na Tabela 02, criada por Cruden e Varnes (1996) e adaptada por Bandeiras (2003), são divididas as classes das causas de deslizamentos das encostas.

Tabela 02: Classes de causas de deslizamentos de encostas.

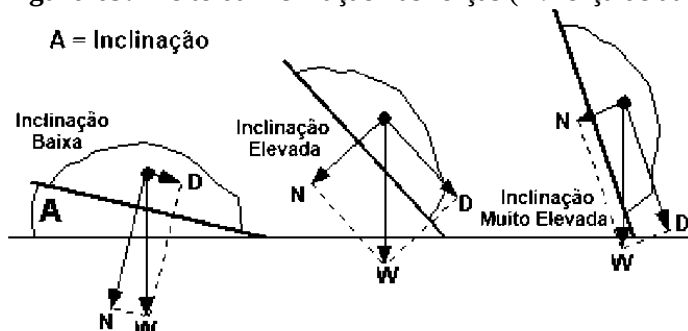
Causas Geológicas	Perfil geotécnico; Orientação desfavorável da descontinuidade de massa (falhas); Contraste na permeabilidade e seus efeitos na poro pressão; Contraste na rigidez; Material de preenchimento de juntas alteradas (fissuras).
Causas Morfológicas	Geometria, inclinação e forma da encosta; Atividades geológicas: terremotos, vulcões; Carregamentos no topo do talude; Remoção da vegetação (por causas naturais); Erosão superficial ou subterrânea.
Causas Físicas	Chuvas intensas em períodos curtos; Chuvas intensas de longa duração; Inundações; Contração ou expansão de solos expansíveis.
Causas Antrópicas	Escavação na base da encosta; Sobrecarga na encosta ou no topo; Remoção vegetal; Vibração artificial (tráfego, máquinas pesadas); Falta de manutenção de drenagem.

Fonte: Bandeiras (2003).

2.1.5.1 Morfologia e ação do tempo

A morfologia dos taludes é influenciada basicamente pela topografia e altitude das encostas, como visto na Figura 09. Um fator importante para a estabilidade de taludes é a cota e altura (PRESS e SIEVER, 2001).

Figura 09: Efeito da inclinação nas forças (N: força de atrito, D: peso do corpo).



Fonte: ISU (2014).

Taludes em repouso, com grande altitude possuem valor elevado de energia potencial gravitacional, associada à sua massa. Com isso, a tendência natural é transferir energia para atingir o equilíbrio, através da queda, explicando porque taludes com grandes alturas geram consequências desastrosas com movimentos de massa, pois a energia cinética e a velocidade de queda são maiores (ENGINEERING, 1995).

De acordo com Varnes (1984), o fator “tempo” é fundamental na instabilidade de taludes, pois, simplesmente, com o passar do tempo todos os fatores influentes irão se acumulando no talude, podendo gerar efeitos danosos.

Grande parte dos processos geológicos, alterações de composição, deformações, rupturas causadas por agentes erosivos, ou fenômenos tectônicos podem levar muito tempo para ocorrer, aumentando as chances de danos com o passar do tempo (KELLER, 2012).

2.1.5.2 Água, vegetação e clima

O clima influencia a instabilidade de taludes, pois implica a incidência de agentes erosivos sobre o talude, e conseqüentemente gera alterações geomorfológicas sobre eles (ZÊZERE e TRIGO, 2008).

Alguns fatores notáveis para o estudo de instabilidade de taludes são ações de agentes erosivos e transportadores (vento e água), com variação de frequência, intensidade, sazonalidade, e local de incidência (ZÊZERE e TRIGO, 2008).

Pode-se dizer que a existência de vegetação em taludes é vantajosa, pois o enraizamento de plantas na massa do talude contribui, de forma positiva, na coesão e estabilização do solo, funcionando como um ponto de ancoragem. Também há determinados tipos de vegetações, como aquelas com folhagem ampla e densa, que impedem o impacto da chuva no talude, diminuindo o potencial erosivo (TEIXEIRA e FIGUEIREDO, 2006).

De acordo com Engineering (1995), a água atua como agente erosivo, transportador e influencia diretamente e indiretamente a estabilidade de taludes. Ela tem grande potencial para infiltrar na massa do talude, provocando alterações químicas, mineralógicas, físicas e estruturais no talude, comprometendo sua estabilidade.

Para Santos e Guimarães (1992), é comum e equivocado considerar que toda a água proveniente de chuvas incidindo na superfície do terreno pode ser captada pelo solo. Para um solo natural, a infiltração máxima de água na superfície do terreno é o coeficiente de permeabilidade saturado do solo, podendo ser um valor baixo. Caso a superfície do terreno

seja inclinada, a camada superficial pode se tornar saturada e ter um coeficiente de permeabilidade maior que o da camada inferior. Com isso, a água escoar na camada superior do talude, não penetrando totalmente na camada inferior do solo.

Como agente transportador, a água também pode ser problemática. Com o excesso de infiltração em profundidade no solo, originam-se movimentos de massa, pois ocorrem rupturas na superfície do talude (CHAMINÉ e AFONSO, 2010).

A principal causa do aumento da instabilidade é o grau de saturação elevado do solo, provocado pela infiltração da água da chuva. Consequentemente, aumentando o nível do lençol freático, o peso dos materiais, e com determinada declividade, resulta no aumento das forças desestabilizadoras. Além disso, a água é prejudicial na existência de fendas, pois se preenchidas criam-se pressões hidrostáticas (CAMPBELL, 1975).

2.1.5.3 Ações antrópicas

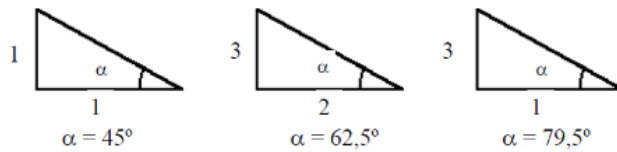
A expansão do território devido ao crescimento demográfico constante, faz com que muitas vezes seja ignorada a política de planejamento e segurança do local, ou normas regulamentadoras (CHAMINÉ e AFONSO, 2010).

Para Bateria (2001), com o desenvolvimento o homem está afetando os taludes naturais existentes, ao executar construções que geram sobrecargas elevadas em encostas e taludes. Essas construções, muitas vezes, alteram a geomorfologia do local, como por exemplo, quando são feitas escavações, cortes longitudinais, entre outros fatores que comprometem a estabilidade de local.

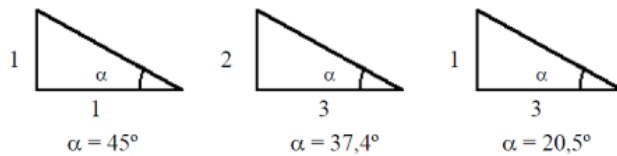
De acordo com Teixeira e Figueiredo (2006), outro problema causado por atividades antrópicas, é a construção de taludes artificiais, originados da execução de alguns tipos de fundações, aterros, escavações, e outras obras. A Figura 10 mostra alguns padrões usuais de ângulos de inclinações para melhor e pior estabilidade, estabelecidas empiricamente, como referência inicial.

Figura 10: Padrões de inclinação para taludes estabelecidos empiricamente.

*Cortes * Condição melhor de estabilidade*



*Aterros * Condição pior de estabilidade*



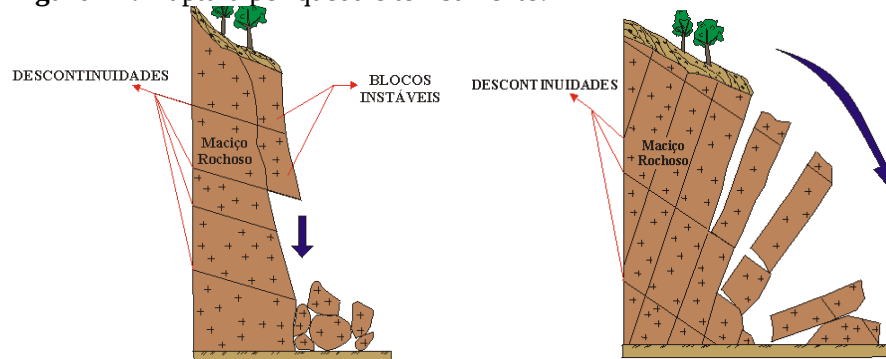
Fonte: Bassaneli *et al.* (2015).

2.1.6 Modos de rompimento de taludes

De acordo com Cruden e Varnes (1996), os taludes artificiais e naturais podem romper-se de várias formas; os autores classificam as rupturas dos taludes em cinco categorias: queda, tombamentos, escorregamentos, espalhamento e escoamento.

A primeira categoria é a queda, que ocorre quando o solo se desprende, ou quando fragmentos de rocha caem do talude. Outro modo de ruptura são os tombamentos que acontecem quando há movimento de rotação à frente do solo ou rochas, aproximadamente no eixo abaixo do centro de gravidade do material deslocado. A Figura 11 representa a ruptura por queda e tombamento respectivamente (CRUDEN e VARNES, 1996).

Figura 11: Ruptura por queda e tombamento.



Fonte: UNESP (2016).

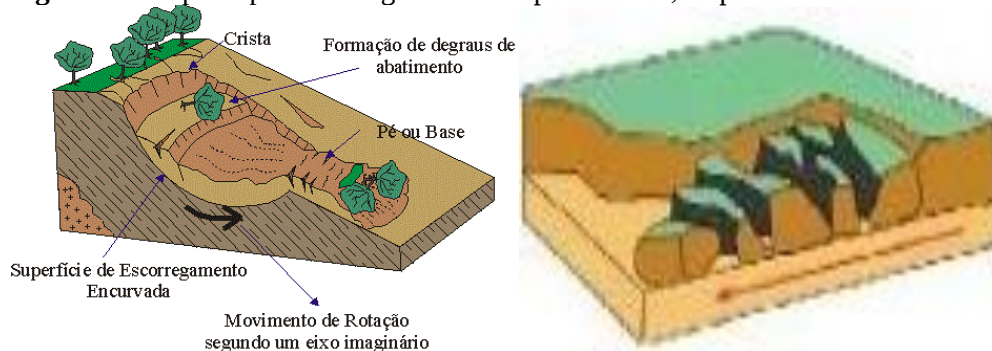
Para Selby (1993), escorregamento, também chamado de deslizamento, é o movimento coletivo de massa e material sólido encosta abaixo, com influência direta da gravidade, podendo ocorrer com terremotos ou grande volume de precipitações. Chuvas

intensas de curta e longa duração (contínuas) geram condições propícias para a diminuição da resistência do solo, sendo um dos principais motivos de movimentos em encostas.

Os deslizamentos considerados fenômenos naturais extremos, são responsáveis por inúmeras vítimas e grandes prejuízos, como em 1967, na Serra das Araras no Rio de Janeiro e Caraguatatuba (São Paulo), que resultou na morte de 1320 pessoas e a destruição de centenas de edificações (MARCELINO, 2003).

As expansões laterais ou espalhamento, são uma forma de deslizamento que ocorre por translação, ou seja, é o movimento de uma parte de areia ou silte que está recoberta por argila retentora de água, ou ainda sobrecarregada por aterro. A Figura 12 representa rompimentos de talude por escorregamento e espalhamento, respectivamente (DAS, 2011).

Figura 12: Ruptura por escorregamento e espalhamento, respectivamente.



Fonte: UNESP (2016) e Geobook (2015).

De acordo com Heidemann (2011), a ruptura por escoamento, representada na Figura 13, é um movimento complexo. Quando a massa de solo coesivo ou rocha está localizada sobre um material mais frágil, se torna bastante fraturada e esse solo ou rocha fraturada pode sofrer movimentos de subsidência, rotação e translação sobre o material menos resistente, até que se desintegre, e o material que está por baixo flua de forma ascendente através de fraturas. São movimentos lentos que podem se desenvolver por muitos quilômetros.

Figura 13: Ruptura por escoamento.



Fonte: Highland e Bobrowsky, adaptado (2008).

Segundo Varnes (1978), os movimentos de solo são separados em três categorias, de acordo com sua velocidade: desmoronamentos, escorregamentos e rastejos, apresentados na Figura 14. Nos desmoronamentos, nos quais ocorrem movimentos rápidos através da ação da gravidade sobre a massa de solo que diferencia do restante do talude que vem a desmoronar. Já nos escorregamentos, ocorre a separação do solo que irá escorregar do restante do maciço. Os rastejos são movimentos lentos e ocorrem na superfície de maciços, diferente de escorregamentos, pois não existe um local que separa nitidamente a parte que se desloca, e a parte que fica presa ao maciço.

Figura 14: Movimento de massa baseado na velocidade.

		Velocidade →		
Material	Natureza do Movimento	Lento (1 cm/ano) Baixo conteúdo de água	Moderado (1 km/hora) Alto conteúdo de água	Rápido (5 km/hora) Alto conteúdo de ar
Rocha	Fluxo			 Avalanche de rocha
	Deslizamento ou queda		 Deslizamento de rocha	 Queda de bloco
Material inconsolidado	Fluxo	 Rastejo de solo	 Fluxo de lama	 Fluxo de detritos
	Deslizamento ou queda	 Escorregamento	 Corrida de lama	 Deslizamento de detritos
				 Avalanche de detritos

Fonte: Freeman (2004).

2.1.7 Estabilização de taludes

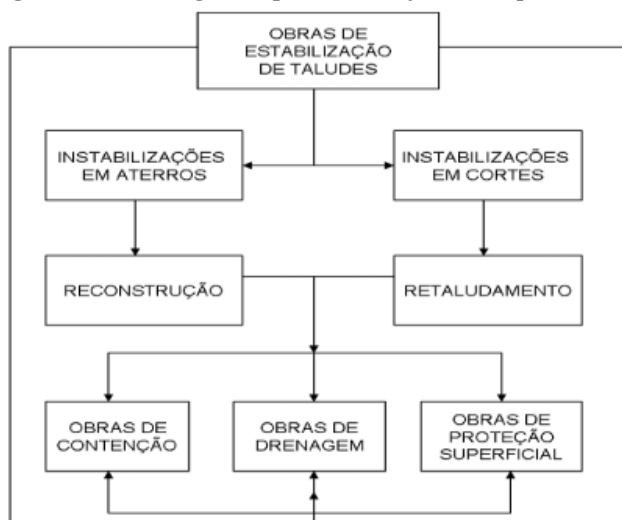
Para Filho e Virgilli (1998), as alternativas de projeto de estabilização deverão, preferencialmente, partir de soluções mais simples e baratas, conforme necessário. Na Tabela 03 encontram-se os principais grupos e tipos de obras de estabilização de taludes e encostas.

Tabela 03: Principais tipos de obras de estabilização de taludes e encostas.

GRUPOS	TIPOS
Obras sem estrutura de contenção	Retaludamentos (corte e aterro); Drenagem (superficial subterrânea); Proteção superficial (naturais e artificiais).
Obras com estrutura de contenção	Muros de gravidade; Solo grampeado; Solo reforçado; Aterros reforçados; Estabilização de blocos.
Obras de proteção	Barreiras vegetais; Muros de espora.

Fonte: Filho e Virgili (1998).

Filho e Virgili (1998) propõem um fluxograma, visto na Figura 15, pela utilização desses grupos de obras e tipos de estabilização, levando-se em conta os tipos de instabilização em aterros e taludes de corte e o princípio da utilização de soluções mais simples para as mais complexas, conforme necessidade.

Figura 15: Fluxograma para utilização dos tipos de obras de estabilização de taludes.

Fonte: Filho e Virgili (1998).

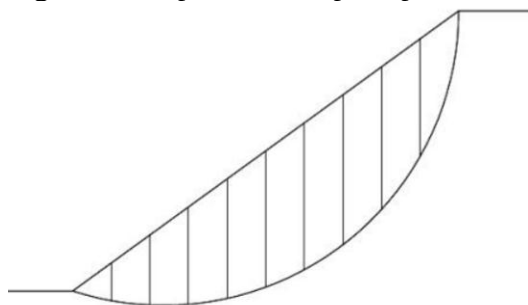
2.1.8 Análise de estabilidade de taludes

A análise de estabilidade de taludes é feita através do método do equilíbrio-limite. Para isso, o solo em estudo deve possuir um comportamento rígido-plástico, as equações de equilíbrio estático devem ser válidas até a iminência da ruptura, apesar de o processo ser

dinâmico e o coeficiente de segurança constante ao longo da linha de ruptura (MASSAD, 2003).

O método de equilíbrio-limite apresenta diversas variações como o círculo de atrito, método das cunhas e método sueco, sendo este último dividido ainda em método de Fellenius, método de Bishop Simplificado e método de Morgenstern-Price. Tanto para o método de Fellenius quanto para o método de Bishop simplificado, admite-se que a linha de ruptura seja uma circunferência e a massa de solo é subdividida em fatias ou lamelas, conforme Figura 16 (MASSAD, 2003). Caputo (2000) esclarece que os solos que possuem atrito e intercepto coesivo ($\phi \neq 0$ e $c \neq 0$), como solos argilosos, é aplicado mais frequentemente o método das fatias.

Figura 16: Superfície de ruptura pelo das fatias.



Fonte: Ferreira (2012).

O método de Bishop é o mais utilizado na prática da engenharia. Sua popularidade se deve ao fato de que produz resultados confiáveis, sua precisão e ao esquema não muito complexo de cálculos (MANUAL DE GEOTECNIA, 1991).

Nos métodos das fatias, o fator de segurança é definido como a razão entre a tensão cisalhante de ruptura e a tensão cisalhante atuante na base de cada fatia. O fator de segurança é admitido como constante ao longo da superfície de ruptura, o que implica que o valor do fator de segurança que definirá a relação dos esforços na base de uma fatia será representativo da segurança de toda a superfície, ou seja, como um média (SANTOS, 2004).

De acordo com Santos (2004), para determinar o valor do fator de segurança, é utilizado fundamentos da estática, ou seja, o equilíbrio de forças nas duas direções e o equilíbrio de momentos, além do critério de ruptura. O problema é indeterminado, sendo necessárias algumas hipóteses para resolver o problema.

A superfície de ruptura mais crítica não é necessariamente sempre circular e a sua forma passa a depender do modo como a resistência ao corte se distribui em profundidade. Na maioria dos casos a geometria da superfície crítica é condicionada pela existência de estratos

de baixa resistência e de reduzida espessura, portanto a adoção de superfícies circulares pode proporcionar resultados não relevantes. A análise de estabilidade realizada pelo método das fatias é, neste caso, mais complexa que para a de superfícies circulares. Isto deve-se ao fato de que qualquer que seja o ponto em relação ao qual se expressem as equações de momentos é sempre necessário considerar as forças normais à base, pois o braço do momento deixa de ser nulo e o braço do momento das forças tangenciais deixa de ser constante. O problema é indeterminado, sendo necessário assumir algumas hipóteses para definir o fator de segurança associado ao talude. São essas hipóteses que constituem a principal diferença entre os vários métodos de análise (FREITAS, 2011).

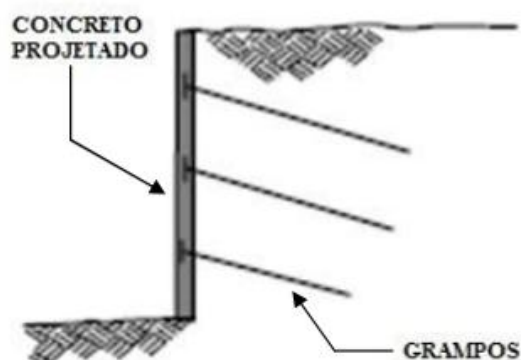
2.1.9 Técnicas de reforço de solo

As técnicas para reforço de solo são elementos ou estruturas que têm por objetivo principal contrapor-se a empuxos ou tensões geradas em um maciço de solo, cujas condições de equilíbrio foram alteradas, seja por escavação, corte ou aterro. Assim, essas estruturas são implantadas nos taludes, a fim de garantir sua estabilidade, seja oferecendo resistência à movimentação ou à ruptura, ou ainda reforçando o maciço de modo a resistir a solicitações que possam levar a instabilidade. (RANZINI e NEGRO, 1998).

2.1.10 Solo grampeado

De acordo com Conceição (2011), o grampeamento do solo é uma técnica moderna e comprovadamente eficaz utilizada para a estabilização de taludes naturais, artificiais ou escavados. O método consiste no reforço do solo através da introdução de elementos passivos, que só atuam quando o terreno se movimenta, envoltos por calda de cimento ou argamassa, em furos realizados por uma perfuratriz. Esses elementos de reforço podem ser barras de aço ou sintéticas, chamadas de grampo, conforme esquema da Figura 17.

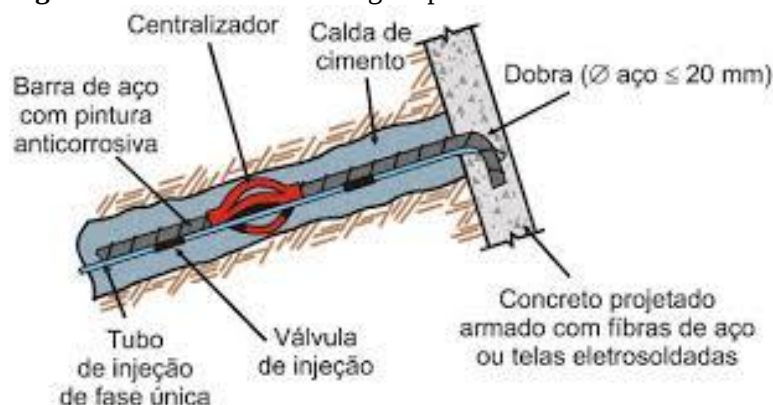
Figura 17: Esquema do grampeamento de solo.



Fonte: Mendonça (2015).

A técnica do solo grampeado consiste em introduzir elementos semirrígidos resistentes à flexão composta, denominados de grampos, que podem ser barras de aço, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular ou ainda micro estacas. Os grampos, detalhados na Figura 18, são posicionados horizontalmente ou inclinados (variando entre 5° e 30°) no maciço por processo de cravação (grampos cravados) ou injeção (grampos injetados), introduzindo esforços resistentes à tração e cisalhamento (ORTIGÃO, PALMEIRA e ZIRLIS, 1993).

Figura 18: Detalhamento dos grampos.



Fonte: Magalhães e Azevedo (2016).

De acordo com Abramento (1998), este sistema é utilizado em solos firmes em razão de a terra escorrer por entre os grampos. A sequência de execução inicia-se com o corte parcial, seguido da perfuração e inserção da barra de ferro. A barra centralizada no furo é fixada com a injeção de nata de cimento pela extensão do tirante, garantindo a estabilização do solo por associar a zona ativa (potencialmente instável) à zona resistente do talude.

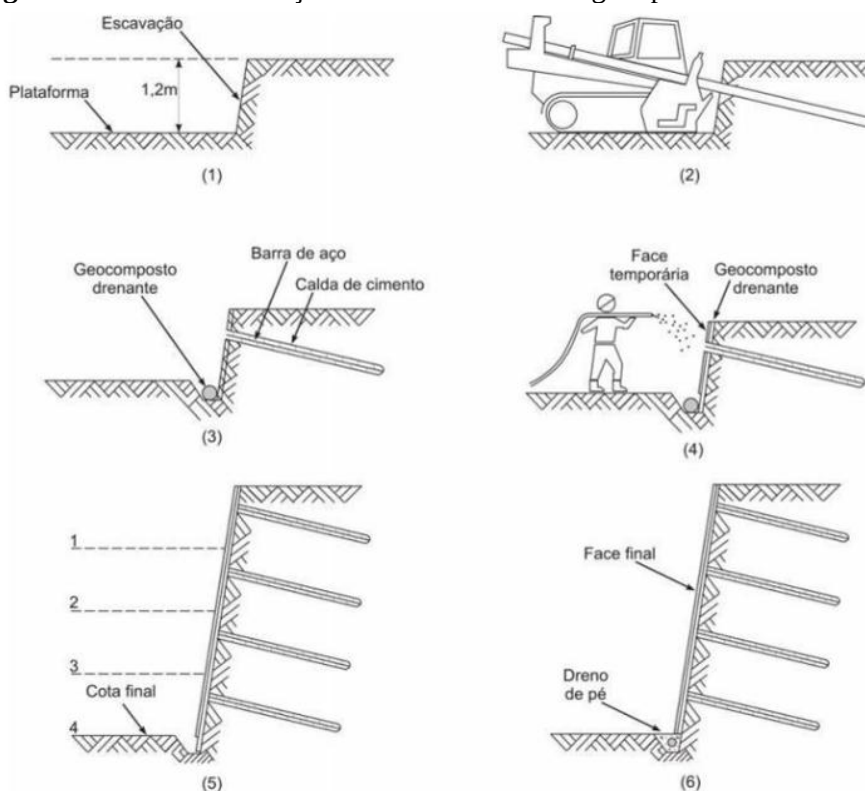
Para Silva (2009), a aplicação de reforço do solo através do grampeamento abrange situações de estabilização de taludes e escoramentos de escavações em ampla variabilidade de

solo. Em solos finos e rígidos com baixa plasticidade e em solos granulares compactos com coesão aparente, é uma solução muito viável e econômica. Já em solos granulares fofos, sem coesão, mal graduados, de baixa densidade relativa, assim como em solos com elevado teor de umidade e com tendência expansiva, esta técnica não se adapta muito bem.

2.1.10.1 Processo executivo

A construção de uma estrutura de solo grampeado em taludes escavados ocorre em fases sucessivas, que se repetem até que atinja a cota desejada: escavação com altura limitada, execução dos grampos, proteção da face do talude e implantação de um sistema de drenagem adequado, conforme pode ser visto na Figura 19 (SILVA, 2009).

Figura 19: Fases da execução de uma obra em solo grampeado em talude escavado.



Fonte: Silva (2009).

A altura da escavação normalmente fica limitada entre um ou dois metros, dependendo da resistência ao cisalhamento do solo. O material de escavação que apresentar uma resistência aparente não drenada ao cisalhamento inferior a 10kPa não oferece resistência

suficiente para execução de uma escavação estável. Portanto, quando o material for argila mole ou areia seca sem nenhuma coesão, ou seja, cimentação entre os grãos, não poderá ser realizado o grampeamento de solo (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

De acordo com Ortigão *et al.* (1993), a segunda fase é o de grampeamento, em que se faz uma perfuração sub-horizontal no talude e introduzem-se grampos ao mesmo tempo que se injeta a calda de cimento. O método da perfuração deverá ser escolhido de forma que permaneça estável até a conclusão da injeção.

As perfurações são geralmente executadas por equipamentos de pequeno porte, de fácil acesso e instalação. Pode-se utilizar água, ar ou lama bentonítica para limpeza do furo, ou ainda, trados helicoidais, dispensando materiais para limpeza do furo. O diâmetro dos furos normalmente varia entre 75 e 100 mm, permitindo a instalação das barras e injeção da calda de cimento (ORTIGÃO *et al.*, 1993).

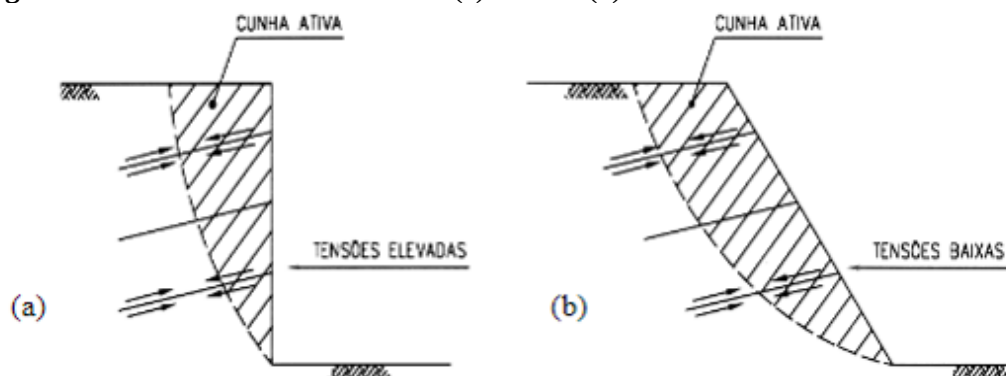
Ainda de acordo com Ortigão *et al.* (1993), logo depois de realizada a perfuração, a fim de evitar movimentações resultantes do alívio de tensão local, podem-se instalar os grampos. Costumam-se instalar dispositivos ao longo para centralizar as barras de aço, garantindo recobrimento da calda de cimento. Em barras metálicas deve-se fazer um tratamento anticorrosivo adequado para que não haja comprometimento da resistência destas peças.

Para Solotrat (2009), as barras de aço, normalmente utilizadas no reforço, possuem diâmetro entre 10 e 25 mm. Para diâmetros até 20 mm, dobra-se a extremidade em 90°. Como em diâmetros maiores há mais dificuldade para realizar este dobramento, é rosqueada a extremidade, colocando-se uma placa metálica entre a porca e a face do talude, gerando maior tensão nos grampos nesta região. Em seguida, é iniciada a injeção da calda de cimento através de um tubo auxiliar removível, a partir do fundo do furo até que se preencha toda a cavidade.

A próxima etapa é a proteção da face do talude, ou seja, revestimento aplicado ao longo de toda a face de escavação, podendo ser feito com concreto projetado e tela de aço ou ainda cobertura vegetal, a fim de minimizar rupturas localizadas e processos erosivos (EHRLICH, 2003).

Em taludes mais verticalizados, as tensões junto à face podem se apresentar mais elevadas no pé da escavação, necessitando um revestimento da face mais resistente, como concreto projetado. Em taludes mais suaves, as tensões são menores, podendo-se utilizar apenas revestimento por cobertura vegetal, como demonstrado na Figura 20.

Figura 20: Face de talude verticalizado (a) e suave (b).



Fonte: Ehrliche (2003).

Ainda de acordo com Ehrliche (2003), a execução do concreto projetado nas obras de solo grampeado é favorecida pela rapidez do procedimento. O concreto projetado consiste na mistura de cimento, areia, pedrisco, água e aditivos, impulsionados por ar comprimido desde o equipamento de projeção até o local aplicado.

Na face do concreto projetado são utilizadas telas de aço como elemento resistente à tração, podendo ser instalada em uma ou duas camadas, conforme projeto. Devem-se ter alguns cuidados no cobrimento destas telas, e caso sejam instaladas antes do concreto, é necessário evitar vazios atrás da ferragem. Podem-se utilizar fibras como armação do concreto, sendo de aço ou sintéticas, adicionadas ao concreto ainda na betoneira ou caminhão. Estas fibras reduzem a permeabilidade do concreto e melhoram a resistência à tração (ZIRLIS *et al.*, 1992).

De acordo com Conceição (2011), a última etapa na execução do reforço de solo é a utilização de dispositivos de drenagem superficiais e sub superficiais, devendo ser instalados adequadamente para proteger a estrutura grampeada de possíveis erosões. Para isso, é necessário determinar a posição e o fluxo do lençol freático durante a execução.

Em drenagens profundas são utilizados drenos sub-horizontais profundos, que têm por função captar as águas distantes da face do talude antes que nele aflorem, conduzindo-as através do paramento e despejando-as nas canaletas. Já em drenagens superficiais são utilizadas canaletas e descidas d'água, ou ainda drenos tipo barbacã, que promovem um adequado fluxo à água que chega ao paramento vindo do talude. Na Figura 21 pode ser observado um talude contido através do sistema de solo grampeado concluído (CONCEIÇÃO, 2011).

Figura 21: Sistema de solo grampeado concluído.



Fonte: Ehrliche (2018).

2.1.10.2 Vantagens e desvantagens do solo grampeado

Existem muitas vantagens relacionadas ao uso de estruturas de reforço de taludes através do grampeamento do solo, sendo as principais referentes ao custo, equipamentos, velocidade de execução, adaptação ao local, flexibilidade, e possibilidade de associar-se a diferentes sistemas, não precisando de escavações, fôrmas, escoramentos ou andaimes (ABREU, BORGES *et al.*, 2017).

De acordo com Mitchell e Villet (1987), relacionado ao custo, o sistema de grampeamento de solos apresenta um gasto baixo, devido a pouca quantidade de materiais necessários. Em relação aos equipamentos, estes são poucos e leves, podendo ser apenas sondas para inserir as barras e equipamentos para injetar e projetar a argamassa, e caso tenha todos disponíveis a velocidade da execução é significativa. Este método pode ser utilizado em diferentes tipos de solo e inclinações, podendo mesclar-se com outros sistemas.

De acordo com uma análise técnica e econômica de soluções para estabilização de taludes realizada por Naresi Jr, Aguiar *et al.* (2018), a técnica de contenção em solo grampeado mostra-se bastante econômica em diferentes alturas da estrutura estudada, sendo um dos sistemas com menor custo linear. Outro aspecto importante é a utilização de equipamentos leves e de fácil manuseio, facilitando a mobilização e execução.

Porém, algumas adversidades relacionadas ao solo podem ser encontradas, como o nível do lençol freático que limita o sistema, uma vez que a água presente em camadas a serem retiradas do talude pode dificultar o serviço, inviabilizando o processo, a menos que seja realizado um rebaixamento permanente do nível da água. Outro cuidado é em relação à drenagem, que caso não seja executada corretamente, tensões adicionais podem ser geradas, causando a ruptura dos grampos (MITCHELL e VILLET 1987).

Ainda de acordo com Mitchell e Villet (1987), alguns tipos de solos sem coesão aparente, como areias, ou ainda com elevados teores de argila, em que a umidade local pode aumentar após a construção, podendo perder resistência e diminuir o contato entre solo e grampo, não sendo, por isso, recomendado o sistema.

Argilas moles com limite de liquidez maior que 20% e resistência não drenada menor que 50 kPa, não são indicadas para receber os sistemas de grampeamento por causa do fenômeno da fluência, muito comum nesses tipos de solos (ABRAMSON, 1996).

2.1.11 Reforço de solo com geotêxtil

De acordo com Racana (2011), o solo reforçado é um sistema composto de inclusões de diferentes materiais, capazes de resistir a tensões de tração, inseridas em uma massa compactada de solo. Devido a isso, a interação entre o solo e o reforço é essencial para uma boa transmissão de esforços, e consequentemente, o sucesso da estrutura.

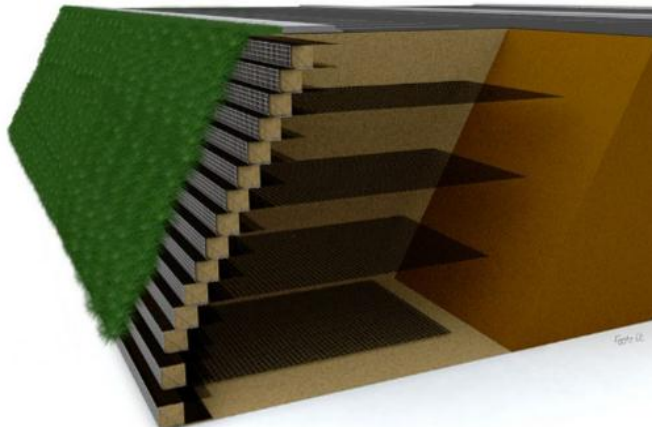
As estruturas de solo reforçadas com geotêxtil são soluções para execução de aterros em que materiais geossintéticos são utilizados como função de reforço, em que o comportamento tensão-deformação do geossintético melhora o comportamento mecânico do solo. O efeito da inclusão de geotêxtis em maciços de solo compactado gera um compósito de maior resistência e deformabilidade. Essas estruturas são construídas com a execução de camadas de solo compactado e controlado rigorosamente, intercaladas com a disposição dos materiais geossintéticos, que geralmente são geotêxteis (KOERNER 2012).

Podem ser chamados de geossintético os materiais poliméricos utilizados na geotecnia; morfologicamente a palavra geossintético é formada por “geo”, referindo-se à terra e “sintético” relacionado à matéria-prima com a qual os materiais são feitos. Eles podem ter outra função além de reforço, como de separação de camadas, drenagem, filtração e barreira impermeável, conforme pequenas modificações realizadas na fabricação (KOERNER, 2012).

De acordo com Portelinha (2012), a interação solo-geossintético promove a melhora do comportamento mecânico do solo, permitindo que as tensões transferidas pelo solo sejam mobilizadas completamente pelas inclusões, tornando dispensável uma face com função estrutural. Porém, é recomendado que haja um faceamento da estrutura, que assume outras funções, como evitar erosões, degradação dos geossintéticos, vandalismo, ou mesmo pela estética, podendo ser adotada uma cobertura vegetal ou placas de concreto sem função estrutural.

De acordo com Koerner (2012), é comum o uso de materiais metálicos e de geossintéticos em obras de solo reforçado, devido ao alto desempenho destes materiais aliado ao baixo custo. No caso de materiais metálicos, o comum é a sua utilização em tiras dentro da massa de solo, presas em uma face de blocos ou escamas, compondo sistemas semelhantes ao da Terra Armada. O uso de geossintéticos é semelhante ao de fitas metálicas, porém, não com elementos lineares, mas com planares. São utilizadas camadas de geotêxteis e geogrelhas, envelopadas ou fixas em faces de blocos, capazes de criar junto da massa de solo uma estrutura de gravidade resistente e estável, conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 22: Esquema da composição de um sistema de solo reforçado com geotêxtil.



Fonte: Equilibrium (2017).

No solo reforçado com geossintético podem ser utilizados materiais como geotêxtil tecido e não tecido, geogrelhas, entre outros. Geogrelhas são geossintéticos fabricados em formato de grelha, e sua interação com o solo ocorre também pelas aberturas, promovendo a união do solo, sendo mais rígida, e tendo como principal função justamente o reforço do solo. Já o geotêxtil é fabricado com outras funções além do reforço, como separação e filtragem, sendo flexível e poroso com formato de um plano. A diferença entre o geotêxtil do tipo tecido e não tecido é de acordo com o modo de entrelaçamento das fibras durante a confecção. O tecido é fabricado de forma que as fibras fiquem alinhadas em duas direções principais,

favorecendo a rigidez do material, mas diminuindo a capacidade de drenagem, enquanto o não tecido tem na sua fabricação o arranjo das fibras de forma aleatória, favorecendo a drenagem, mas diminuindo a rigidez (PORTELINHA, 2012).

De acordo com Benjamin (2006), para escolher o melhor tipo de reforço a ser utilizado, deve ser avaliado o local, o tipo de solo e as dimensões do muro, pois em cada situação determinados tipos de reforço são economicamente mais interessantes que outros. As geogrelhas são mais indicadas para muros com altura superior a quatro metros, enquanto geotêxteis apresentam vantagens econômicas para muros menores, porém apresentam limitação de resistência e rigidez (EHRLICH e BECKER, 2009).

Para o faceamento da estrutura existem algumas técnicas, como autoenvelopamento ou a utilização de blocos pré-moldados intertravados. De acordo com Ehrlich e Becker (2009), os muros envelopados geralmente são executados com geotêxteis, mas geogrelhas também podem ser utilizadas, desde que tenha algo que impeça a passagem do solo fino através da face.

As fibras sintéticas de alta resistência utilizadas nas obras de reforço têm como principais característica a elevada resistência à tração associada à baixa deformação, elevada resistência a micro-organismos e elementos químicos presentes no solo, bem como à radiação ultravioleta e aos danos de instalação. É preciso que haja boa interação com o solo, ser flexível, fácil, leve de instalar e ainda ter boa resistência nas direções longitudinais e transversais (EHRLICH e BECKER 2009).

O solo utilizado como material de aterro apenas suporta compressão e tensões de cisalhamento, sendo o objetivo dos reforços resistirem a tensões tangenciais induzidas no solo quando se deforma. Portanto, o funcionamento do sistema consiste na existência de atrito entre o solo e as fibras sintéticas, sendo importante que o material de aterro tenha um elevado ângulo de resistência ao corte, não sendo recomendada a utilização de solos finos e não coesos (SILVA, 2012).

Porém, o uso de solos finos não significa necessariamente o colapso da estrutura, mas é necessário que o projeto seja dimensionado de acordo e que haja controle apropriado na execução da obra. O efeito do tipo do solo no maciço também se deve à perda de resistência pela presença de água no solo, o que é mais frequente em solos finos, pois possui menor permeabilidade em relação a solos granulares (KOERNER, 2013).

Portanto, solos reforçados funcionam da seguinte forma: ao solo, por ter baixa resistência à tração, é adicionado um reforço que trabalha juntamente, e, conseqüentemente, a massa de solo e reforços tende a agir como um corpo monolítico coeso, suportando o peso

próprio e cargas externas para as quais foi projetado. Os reforços possuem alta resistência à tração e são colocados em camadas horizontais, aumentando a resistência do maciço devido ao atrito na interface com os elementos longitudinais (EHRLICH e BECKER, 2009).

2.1.11.1 Processo construtivo

De acordo com Geofort (2018), a construção do sistema de solo reforçado é simples e não necessita mão de obra especializada. Os principais cuidados que devem ser levados em conta são relacionados à compactação do solo, uma vez que os parâmetros de resistência do solo são levados em conta no projeto.

A execução do solo reforçado é realizada simultaneamente com a construção do aterro, conforme pode ser visto na Figura 23. O processo construtivo é constituído pela implantação de dispositivos de drenagem, conforme especifica o projeto, seguido da construção de um paramento externo como apoio, como formas de madeira. A primeira manta sintética é disposta no solo e perfeitamente esticada sobre a superfície do aterro, para ser submetida a estados uniformes de tensão e deformação (GEOFORT, 2018).

Figura 23: Processo executivo do solo reforçado.



Fonte: Maccaferri (2018).

O solo deve ser espalhado sobre a manta geotêxtil, com espessura média de 50 cm, e em seguida compactado (solos coesivos) ou vibrado (solos granulares), com equipamentos de pequeno, médio ou grande porte, conforme tamanho da estrutura. Depois de finalizada a compactação de cada camada, é escavada uma pequena vala a aproximadamente 50 cm da face do muro, na qual a extremidade livre do geossintético será dobrada e encaixada. A sequência de execução é sucessiva até atingir a altura de projeto, conforme Figura 24, em que a estrutura está concluída (GEOFORT, 2018).

Figura 24: Talude com solo reforçado com geotêxtil.



Fonte: Bidim (2018).

2.1.11.2 Vantagens das estruturas em solo reforçado com geossintéticos

A principal vantagem técnica que pode ser obtida com o uso deste sistema é o baixo custo do método, quando comparado a outros métodos tradicionais. Análises comparativas entre os custos de obras de contenção podem ser encontradas em Mitchell e Villet (1987), DER (1986), Jones (1988). Essa vantagem é devido ao preço das matérias primas utilizada e da facilidade e rapidez de execução (AZAMBUJA *et al.*, 2001).

De acordo com Azambuja *et al.*, (2001), a inserção de fibras sintéticas no aterro permite a utilização de estruturas mais íngremes e com menor volume de aterro compactado. Com a utilização de reforço podem ser empregados solos locais, mesmo com qualidade inferior, que seriam inadequados para uma estrutura de contenção. Com isso, não é necessário transportar solos mais adequados para o local da obra, diminuindo muito o custo.

O processo construtivo é simples e não exige mão de obra qualificada e equipamentos específicos. Como a execução é fácil, pode ser realizada em locais de difícil acesso e o tempo de execução é reduzido, geralmente. Outra vantagem é em relação à estética, pois os diversos tipos de acabamento das faces possibilitam maiores opções, como concreto projetado, vegetação, geomanta, blocos pré-moldados, gabiões e até pneus, que quase não são utilizados, mas que possuem grande vantagem econômica (AZAMBUJA *et al.*, 2001).

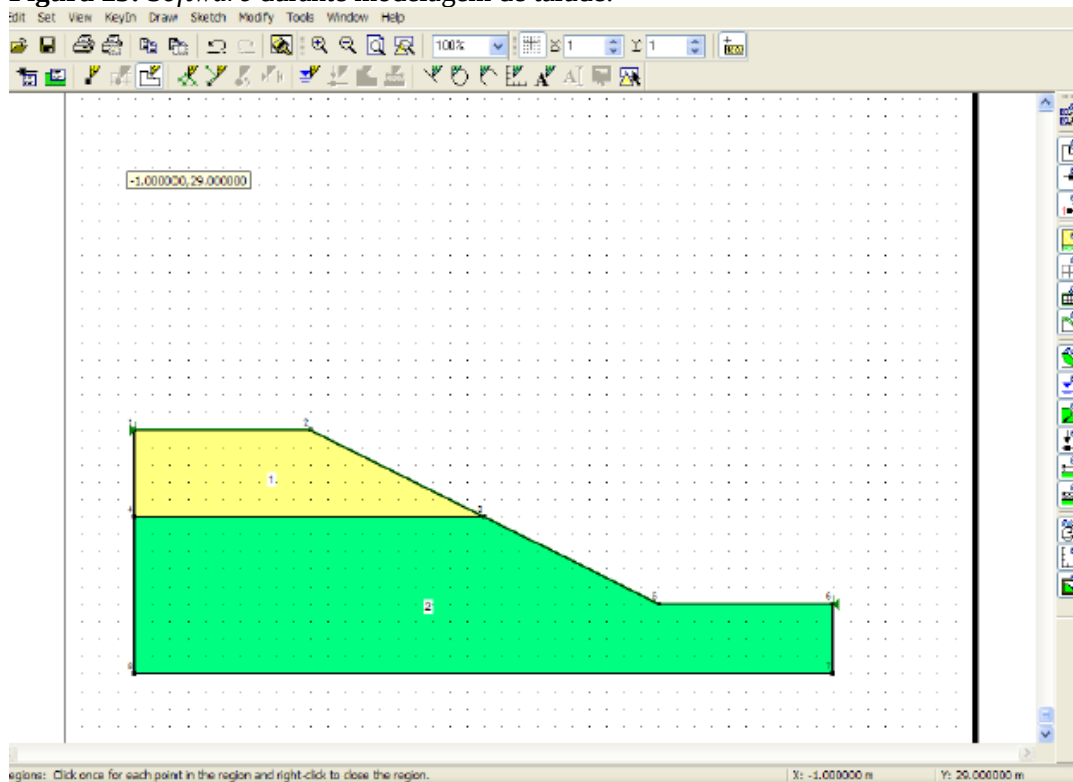
2.1.12 Software Geoslope

Para calcular a estabilidade de taludes pode ser utilizado um programa computacional chamado de *Slope/W*, da *Geoslope*TM que pode analisar várias superfícies, condições de poro pressão da água, condições de cargas, propriedades do solo, etc. (FUSCALDI, 2010).

Ainda segundo Fuscaldi (2010), o *software* pode modelar os tipos de solo heterogêneo, condições de geometria de superfícies deslizantes, análise de estabilidade de taludes, dentre outras muitas funções e ferramentas favoráveis para área de engenharia geotécnica, civil e de mineração. Esta ferramenta é muito utilizada mundialmente e principalmente por profissionais da área de Geotecnia, o *software SLOPE/W*, que traduzido, significa “Taludes para *Windows*”, do pacote de *softwares* da *GeoStudio*TM 2018 R2. Além do fator de segurança, também podem ser visualizadas as forças atuantes em cada fatia da superfície de ruptura.

De acordo com Silva (2004), o Programa *Slope/W* utiliza a teoria do equilíbrio limite para calcular o fator de segurança de taludes, sendo possível modelar diferentes tipos de solos, com ou sem contenções, detalhamento complexo das camadas, além da geometria completa da superfície de escorregamento. Na Figura 25 é possível visualizar a interface do programa durante a modelagem de um talude.

Figura 25: Software durante modelagem de talude.



Fonte: Marangon (2018).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo e descrição do método

Tratou-se de uma análise dos sistemas de reforço de solo com solo grampeado e solo reforçado. Este estudo foi realizado através de revisões bibliográficas e utilização de dados referentes à caracterização do solo de Cascavel por Zen e Almeida (2018) e parâmetros de resistência do solo obtidos por Almeida e Oliveira (2018), aplicados no *software Geoslope* para verificação do fator de segurança entre os sistemas.

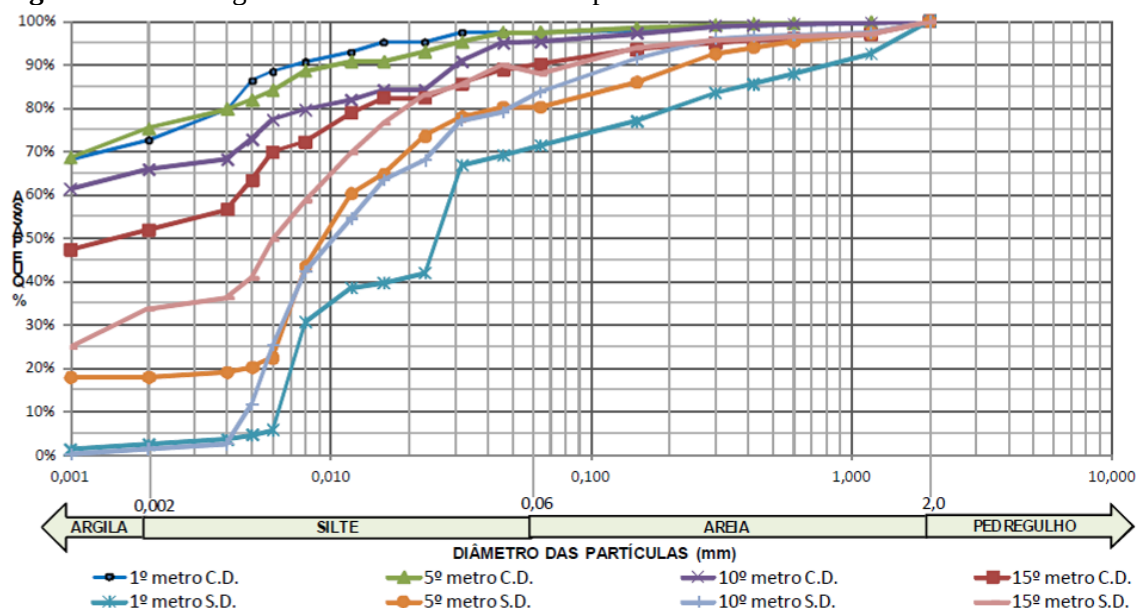
O estudo realizado teve uma abordagem mista, sendo uma pesquisa qualitativa, de natureza básica, e com objetivos explicativos e descritivos, pois foi fundamentada em revisões bibliográficas. A abordagem da pesquisa e fundamentação bibliográfica também é quantitativa, de natureza prática e com objetivo exploratório, pois foram aplicados os sistemas de reforço de solo no *software Geoslope* para obtenção do fator de segurança.

3.1.2 Caracterização do solo de Cascavel

De acordo com a EMBRAPA (2015), a região de Cascavel é constituída por solos lateríticos. É um solo muito poroso e permeável, sendo a principal classe de solo encontrada no Paraná, com cerca de 30% do território. Apresenta alta estabilidade, baixo risco de erosão e grande capacidade para suportar estradas e construções e é favorável para instalação de aterros sanitários.

Para Zen e Almeida (2018) a classificação do solo de Cascavel, segundo ensaios de caracterização realizados com solo do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEFG), com e sem o uso de defloculante (a fim de avaliar a diferenciação da textura), ao longo da profundidade, é de argila silto arenosa, sendo composto de 64,63% de argila, 29,01% de silte e 6,36% de areia, com a utilização de defloculante, como pode ser visto na Figura 26. Os ensaios para obtenção dos dados foram realizados ao longo da profundidade e de acordo com a norma NBR 7181(2016).

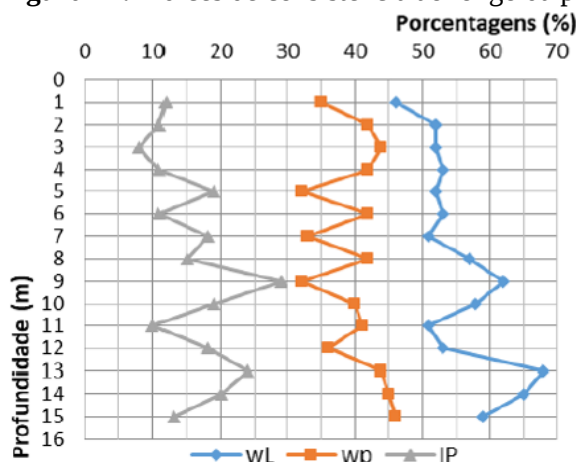
Figura 26: Curvas granulométricas determinadas para o solo do CEEF com e sem defloculante.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Os resultados obtidos por Zen e Almeida (2018) referentes aos índices de consistência mostram um comportamento uniforme do solo ao longo da profundidade, conforme Figura 27. A classificação do solo quanto à plasticidade é definida como solo de média plasticidade. O limite de liquidez (wl) apresentou valor médio de 55%, limite de plasticidade (wp) de 40% e o índice de plasticidade (ip) de 16%. O alto valor do wl indica um solo compressível, ou seja, quando este solo estiver sob carregamento pode sofrer adensamento, característica de solos lateríticos, restringindo uso de fundações rasas.

Figura 27: Índices de consistência ao longo da profundidade.



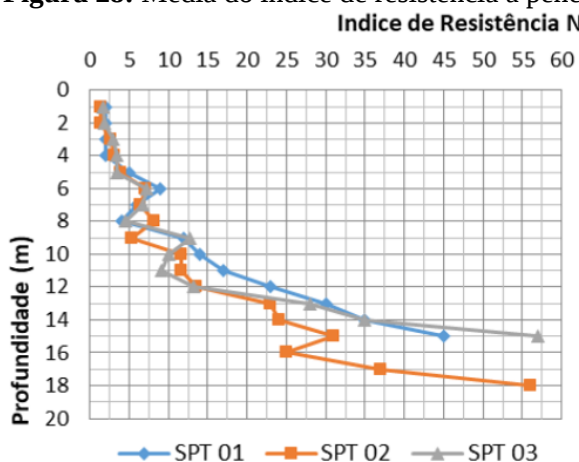
Fonte: Zen e Almeida (2018).

Com relação à classificação pelo Sistema Unificado de Solos (SUCS), obteve-se que o solo é de argila muito compressível (CH). Já pelo Sistema Rodoviário – *Transportation*

Research Board (TRB), o solo foi classificado como argila siltosa, medianamente plástica (A-7-6), que são solos com aplicação de regular a má para pavimentação por terem alta porcentagem de finos. O solo de Cascavel é classificado quanto à plasticidade como medianamente plástico, com pouco ou nenhum material grosso (ZEN e ALMEIDA, 2018).

A resistência do solo ao longo da profundidade, verificada através de três ensaios de sondagem a percussão, do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), foi realizada no CEEF por Zen e Almeida (2018) e pode ser observada na Figura 28.

Figura 28: Média do índice de resistência à penetração ao longo da profundidade.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Segundo Zen e Almeida (2018), o solo de Cascavel também é caracterizado como residual, devido à variação de resistência ao longo da profundidade, apresentando um comportamento de resistência crescente conforme aumenta a profundidade. Com os ensaios realizados para caracterização do solo pode-se confirmar que o solo também é laterítico, comprovando que há cimentação, ou seja, há coesão entre as partículas.

Na Tabela 04 encontram-se os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais para determinação de índices físicos realizados por Zen e Almeida (2018), resumindo-se as camadas de solo do CEEF.

Tabela 04: Resumo das camadas de solo do CEEF.

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1 à 9 metros	CAMADA 2 10 à 15 metros
w (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
IP (%)	15	17
γ_d (KN/m ³)	12	12
γ_s (KN/m ³)	27	27
γ_{sat} (KN/m ³)	17	16
Sr (%)	55	60
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole à média	Rija à dura
Índice de vazios (e)	1,22	1,55

Fonte: Zen e Almeida (2018).

A capacidade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade depende da resistência ao cisalhamento do solo. Toda massa de solo se rompe quando esta resistência é excedida (CAPUTO, 1988).

Através de ensaios de compressão triaxial é possível determinar as envoltórias de resistência e obter os parâmetros de resistência característicos do solo de Cascavel, ou seja, ângulo atrito interno (ϕ) e intercepto de coesão (kPa). Na Tabela 05 encontram-se os valores obtidos para cada metro analisado do subsolo do CEEF, de acordo com Almeida e Oliveira (2018). É possível perceber o crescimento dos valores ao longo da profundidade.

Tabela 05: Parâmetros de resistência ao cisalhamento para o subsolo do CEEF.

Cota	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito
1 m	2 kPa	14,2°
2 m	2 kPa	15,5°
3 m	13 kPa	17,4°
4 m	12 kPa	16,4°
5 m	22 kPa	14,1°
6 m	56 kPa	13,4°
7 m	17 kPa	19,2°
8 m	12 kPa	26,6°
9 m	31 kPa	26,2°
10 m	49 kPa	24,8°
11 m	24 kPa	30,4°
12 m	27 kPa	22,5°
13 m	64 kPa	19,7°
14 m	32 kPa	26,4°

Fonte: Almeida e Oliveira (2018).

3.1.3 Aplicação dos sistemas de reforço no solo de Cascavel

O local de aplicação para as estruturas de solo grampeado e solo reforçado com geossintético pode variar muito, sendo específico de cada obra que implanta o sistema. Ambas as estruturas não necessitam de amplo espaço, se adequando a pequenos locais de trabalho, sendo até recomendadas em casos assim.

Em relação ao tipo de solo, para solo grampeado é recomendado que a resistência ao cisalhamento seja superior a 10 kPa, para que ofereça estabilidade e que haja coesão durante a execução. Para estruturas em solo reforçado é importante que o material do aterro também tenha elevado ângulo de resistência ao cisalhamento, e não sejam utilizados solos finos e não coesos, porém, podem ser utilizados outros tipos de solo, desde que previstos em projeto.

Os equipamentos utilizados para o solo grampeado são de pequeno porte, podendo ser utilizados trados helicoidais ou sondas para a execução dos furos e um mangote de alta pressão para projeção do concreto. No sistema de solo reforçado com geossintéticos, também não há muitas ferramentas específicas, sendo as principais os equipamentos para transporte de material para aterro, quando de maior volume, como caminhões caçamba. Ambos os equipamentos podem ser encontrados na cidade de Cascavel ou região.

Os principais materiais utilizados para realização do solo grampeado são os grampos e o concreto projetado. Como grampo, é utilizada uma barra de aço com diâmetro e dobra conforme projeto, juntamente com centralizadores para não haver contato entre as paredes do furo. O concreto utilizado é dosado conforme projeto, podendo ser feito em indústrias de concreto usinado.

Para o solo reforçado com geossintético, o principal material utilizado é a malha sintética, que precisa ser dimensionada e escolhido o tipo mais adequado, conforme suas especificações. Também há o material para o aterro que preferencialmente precisa ser selecionado.

Em ambas as estruturas é necessário que sejam construídos drenos para drenagem da água, conforme sugestão do projetista, levando em consideração o local de aplicação, entre outros fatores do talude a ser contido.

A mão de obra utilizada para os sistemas de reforço não necessita ser especializada, podendo ser realizado pelos funcionários da empresa que executar a estrutura. Porém, além de projetos específicos para as estruturas, é necessário que, durante a execução, haja acompanhamento de um engenheiro com conhecimento nos sistemas de reforço.

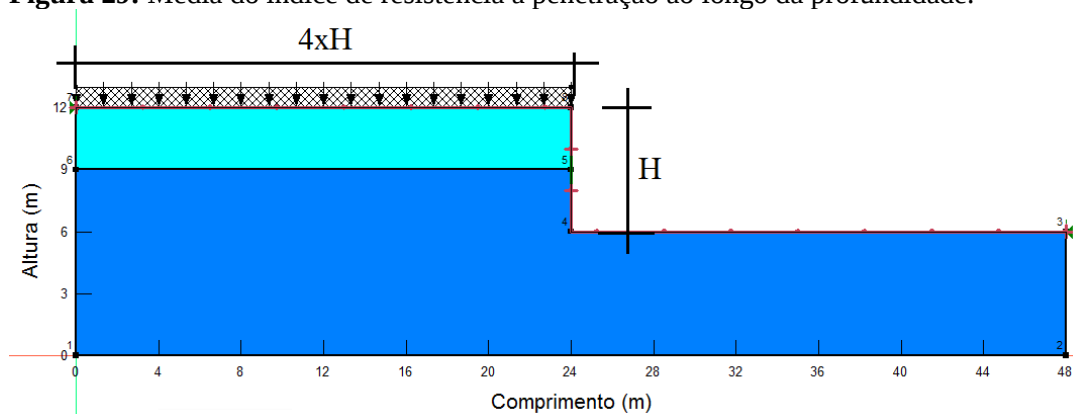
Ambos os sistemas de reforço de solo possuem vantagens econômicas em relação aos demais métodos de contenção. Os custos são parecidos, aumentando conforme a altura da estrutura, o solo utilizado no aterro, ou o sintético utilizado no caso do solo reforçado.

3.1.4 Simulação em *software* das estruturas de reforço

Com os parâmetros de resistência do solo de Cascavel obtidos por Almeida e Oliveira (2018), ensaios triaxiais foram modelados através do *software Geoslope* 2018 R2, taludes hipotéticos para analisar a estabilidade e a tendência a deslizamentos de acordo com o fator de segurança obtido.

As simulações realizadas foram de taludes fictícios criados para escavação de subsolos com seis metros de altura, inclinações variadas e com o comprimento a superfície de quatro vezes a altura, ou seja, 24 metros, para que o *software* consiga calcular uma superfície de ruptura completa, como pode ser visto na Figura 29.

Figura 29: Média do índice de resistência à penetração ao longo da profundidade.



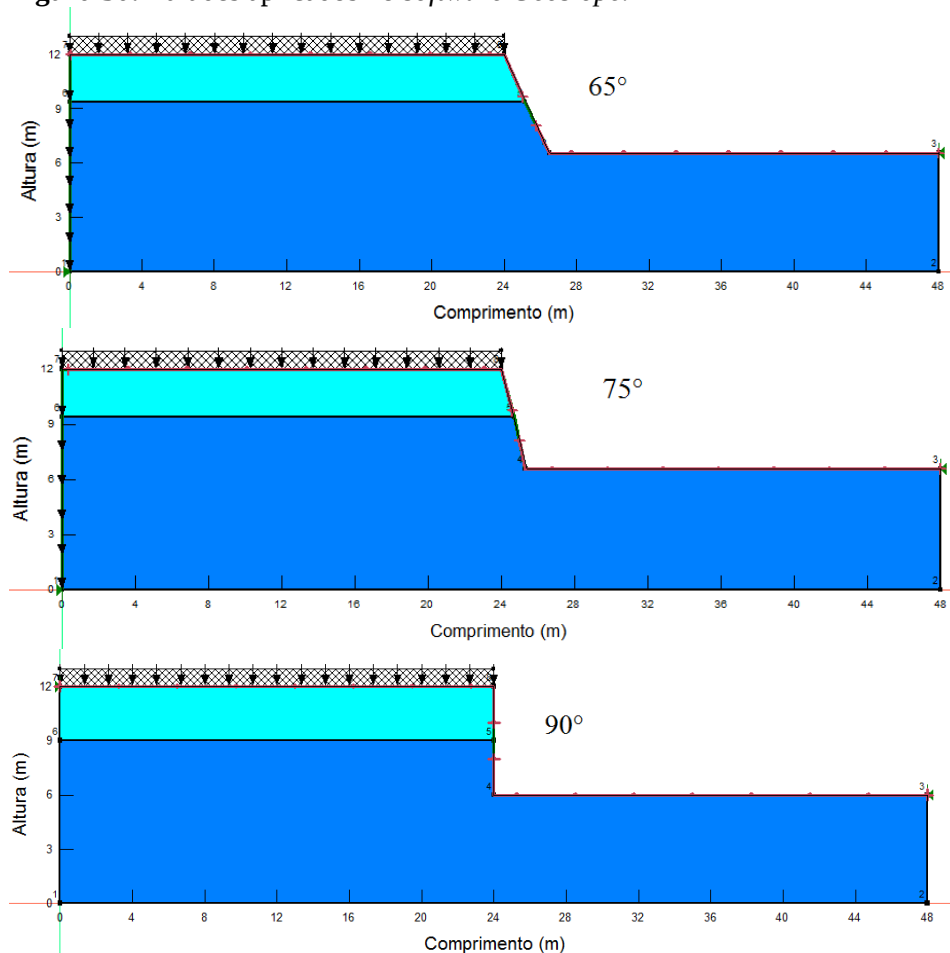
Fonte: Autora (2018).

O solo foi dividido em duas camadas de três metros cada, utilizando a média do valor do ângulo de atrito para a camada de $15,7^\circ$ e o valor de coesão 5,67 kPa para a primeira camada. Já para a segunda camada de solo, o valor do ângulo de atrito utilizado foi de $14,63^\circ$ e o valor de coesão 30 kPa. O peso específico do solo adotado para ambas as camadas foi de 17 kN/m^3 , e não foi considerado o nível d'água para esta altura de talude.

De acordo com especificações de segurança da NBR 11682 (ABNT, 2006), o fator de segurança deve ser de no mínimo 1,5 para garantir a estabilidade do talude.

Para analisar a estabilidade do talude através do programa computacional, primeiramente foram desenhados três taludes com seis metros de altura, simulando taludes para subsolos, com inclinação de 65° e 75° para solo grampeado e 90° para solo reforçado, todos com sobrecarga de 8 kN/m^2 , conforme a Figura 30.

Figura 30: Taludes aplicados no *software Geoslope*.



Fonte: Autora (2018).

O programa utilizou a teoria do equilíbrio-limite para calcular o fator de segurança dos taludes. Essa teoria se baseia na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de solo, tomada como corpo rígido, com a possibilidade de entrar em processo de escorregamento. Os métodos de análise de estabilidade utilizados foram o método proposto por Bishop, conhecido como método de Bishop simplificado, método de Morgenstern-Price e o método de Fellenius.

De acordo com o *software Geoslope*, estes métodos são similares, e as diferenças dependem de quais equações estáticas são consideradas e satisfeitas, quais forças entre fatias são incluídas e qual é a relação considerada entre as forças cisalhante normal entre as fatias.

Dentre esses métodos, o de Fellenius é o mais rigoroso, pois inclui todas as forças entre as fatias e satisfaz todas as equações de equilíbrio estático.

Os taludes fictícios criados possuem seis metros de altura e inclinações variadas e foram divididos em duas camadas de três metros cada. Utilizou-se para a primeira camada a média do valor do ângulo de atrito dos três primeiros metros de $15,7^\circ$ e o valor de coesão de 5,67 kPa, sendo de argila siltosa mole. Já para a segunda camada, cujo solo é de argila siltosa média, o valor do ângulo de atrito utilizado foi de $14,63^\circ$ e o valor de coesão 30 kPa. O peso específico do solo adotado para ambas as camadas foi de 17 kN/m^3 , de acordo com ensaios de caracterização realizados por Zen e Almeida (2018).

Para o solo grampeado, baseado no dimensionamento realizado por Gondin (2018), utilizaram-se na simulação barras de aço CA 50 com 20 mm de diâmetro, espaçamento entre as linhas de grampos de dois metros, inclinação dos chumbadores de 15° , resistência ao arrancamento de 300 kPa (relação força/área) com fator de redução de 1,5, comprimento dos grampos de 4 e 5 metros, com diâmetro de 100mm. Estes dados, como o espaçamento horizontal, vertical e o ângulo dos tirantes podem variar conforme projeto.

A resistência à tração das barras de aço foi calculada através da multiplicação do valor da tensão admissível do aço ($f_{yk} \text{ CA } 50 = 500 \text{ Mpa}$) pela área da seção bruta, resultando em 136,6 kN. A tensão de cisalhamento mobilizada dentro do reforço utilizado foi de 150 kN, de acordo com Byrne *et al.* (1998), que diz que para solos coesivos do tipo argilas, a resistência ao cisalhamento deve variar entre 100 e 200 kN. Utilizou-se então a média dos valores.

Para o sistema de solo reforçado com geossintéticos foi simulado um talude com inclinação de 90° com as cargas de reforço através das mantas geossintéticas com comprimento e espaçamento variado, baseado no dimensionamento realizado por Silva (2005). A resistência ao arrancamento (relação força/área) utilizada foi de 190 kPa, com fator de redução de 1,5. A resistência à tração aplicada foi de 250 kN com 1,5 de redução.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

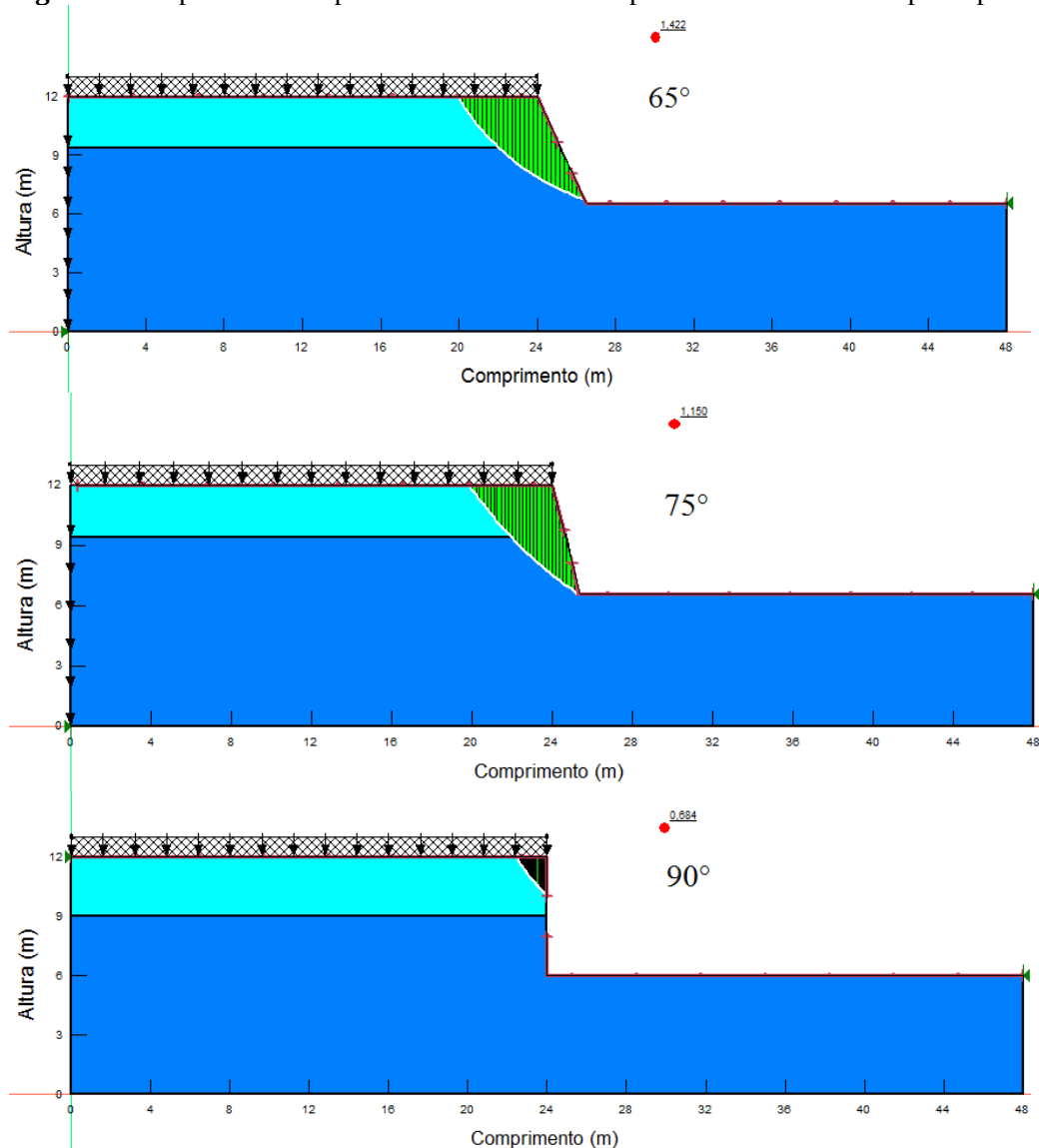
Através de revisões bibliográficas foi possível realizar um estudo sobre reforços de sistemas de solo grampeado e solo reforçado com geossintético.

Com o ângulo de atrito e coesão do solo de Cascavel, obtidos através de ensaios triaxiais realizados por Almeida e Oliveira (2018), foi possível aplicar no *software* os métodos de reforço de solo em três simulações de taludes com inclinações diferentes, a fim de obter-se o fator de segurança para cada e assim analisá-los, conforme os métodos de equilíbrio-limite.

4.1.1 Situação natural dos taludes

O fator de segurança encontrado para a superfície de ruptura mais crítica através do método de Bishop Simplificado foi de 1,422, 1,409 e 0,684 para os taludes com 65°, 75° e 90°, respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 31.

Figura 31: Superfície de ruptura natural dos taludes para o método de Bishop Simplificado.



Fonte: Autora (2018).

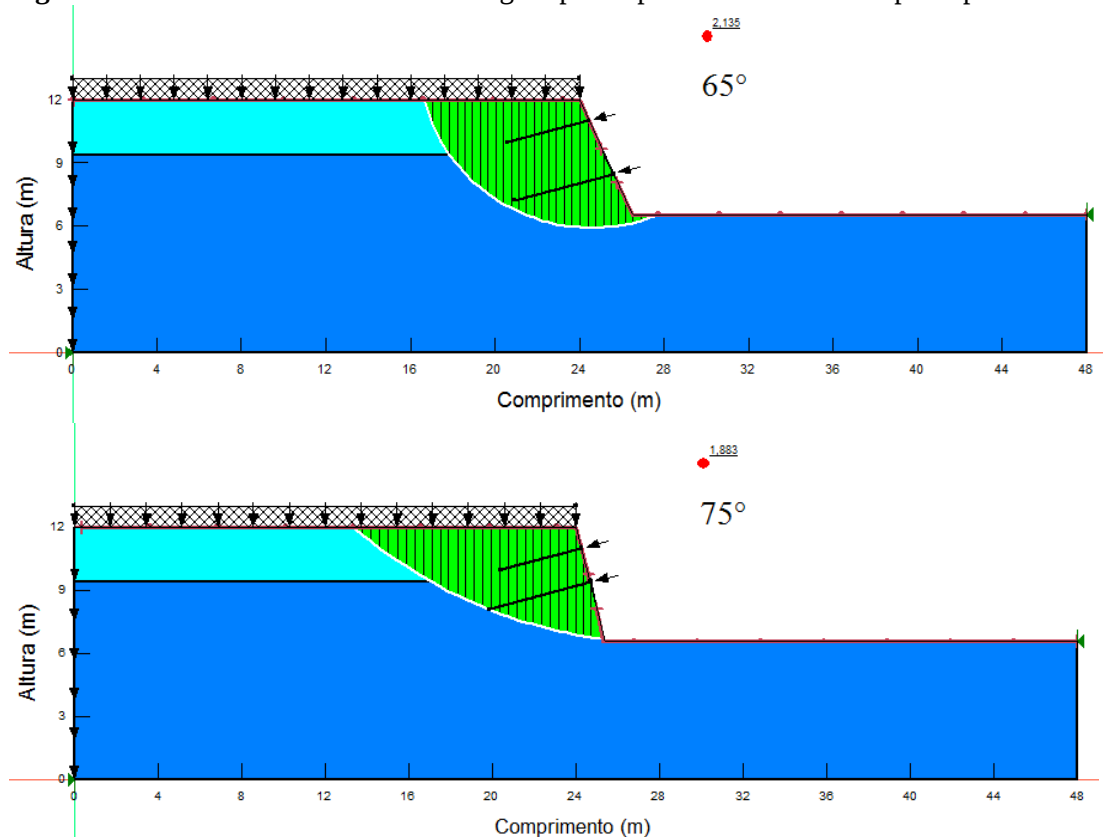
Para o método de Morgenstern-Price, o fator de segurança obtido foi de 1,412, 1,143 e 0,686 para os taludes com 65°, 75° e 90°, respectivamente, em sua situação natural. Já para o método de Fellenius, o talude com 65° obteve um FS de 1,390, o talude com 75° obteve um FS de 1,136 e o talude com 90° obteve um FS de 0,584 na superfície de ruptura natural do talude. As superfícies de ruptura foram todas semelhantes.

Pode-se observar que nem todos os taludes em sua situação natural, de acordo com o método de análise atendem às especificações de segurança determinadas pela NBR 11682/2006, que determina que para um grau de segurança alto e garantia de estabilidade, o fator de segurança deverá ser de no mínimo 1,5, ou seja, é necessário reforçar a estrutura dos taludes.

4.1.2 Reforço em solo grampeado

Com a simulação do reforço de solo na estrutura de solo grampeado dos taludes de 65° e 75° houve uma considerável alteração no fator de segurança. Com o método de Bishop Simplificado, o FS aumentou para 2,135 e 1,883, respectivamente, apenas com a inserção de duas camadas de grampos. Na Figura 32 podem ser observados os taludes com a utilização do solo grampeado para a situação padrão de reforço que foi analisada inicialmente.

Figura 32: Taludes de 65° e 75° em solo grampeado pelo método de Bishop Simplificado.



Fonte: Autora (2018).

Já com o método de Morgenstern-Price o FS passou de 1,412 para 2,123 no talude com 65° . No talude com 75° passou de 1,143 para 1,880. No método de Fellenius os fatores de segurança dos taludes alteraram de 1,390 para 2,026 e 1,136 para 1,863 nos taludes com 65° e 75° , respectivamente. As superfícies de ruptura de ambos foram semelhantes ao método de Bishop Simplificado mostrado anteriormente. Na Tabela 06 encontra-se um resumo dos fatores de segurança obtidos antes e depois da análise de grampeamento do solo, conforme método de equilíbrio utilizado.

Tabela 06: Fatores de segurança obtidos nos taludes antes e depois do reforço.

Inclinação	Bishop Simplificado		Morgenstern-Price		Fellenius	
	Sem grampo	Com grampo	Sem grampo	Com grampo	Sem grampo	Com grampo
65°	1,422	2,135	1,412	2,123	1,390	2,026
75°	1,409	1,883	1,143	1,880	1,136	1,863

Fonte: Autora (2018).

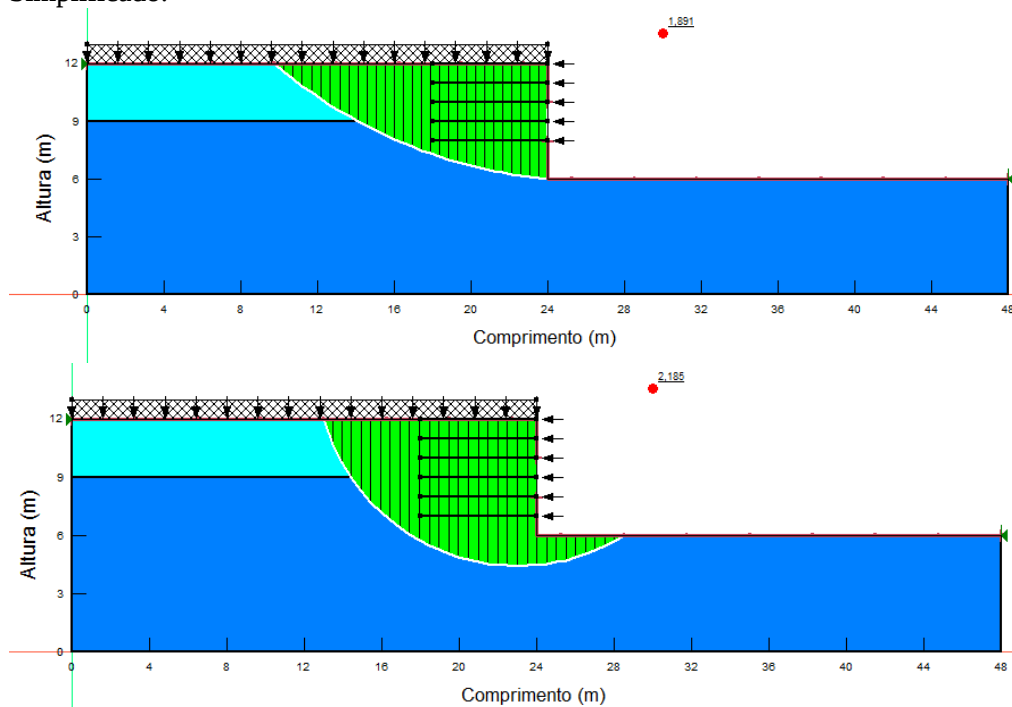
4.1.3 Solo reforçado com geotêxtil

Na análise do talude estabilizado com solo reforçado com geotêxtil não foi considerada a compactação do aterro. Em prática, devido à compactação das camadas de solo, o ângulo de atrito e a coesão da área compactada tendem a aumentar, aumentando a resistência ao cisalhamento do solo. Por isso, podem ser utilizados solos com baixos parâmetros de resistência neste método, pois com a compactação esses valores tendem a aumentar.

As malhas geossintéticas utilizadas como reforço de solo no talude com inclinação de 90° foram analisadas de acordo com o comprimento e a quantidade. Primeiramente as malhas foram dispostas metro a metro, com seis metros de comprimento, totalizando cinco malhas, o que gerou um fator de segurança de 1,891 pelo método de Bishop Simplificado, estando acima da especificação de segurança.

Porém, foi inserida mais uma camada de malha sintética como reforço na cota -5m para análise. Com a inserção de apenas uma camada da manta geossintética, o coeficiente de segurança passou de 1,891 para 2,185, pelo método de Bishop Simplificado. Pode-se perceber a capacidade de reforço de apenas uma camada da manta sintética. Na Figura 33 pode ser visto o talude com cinco e seis camadas de reforço.

Figura 33: Talude com cinco e seis camadas de reforço, respectivamente, pelo método de Bishop Simplificado.

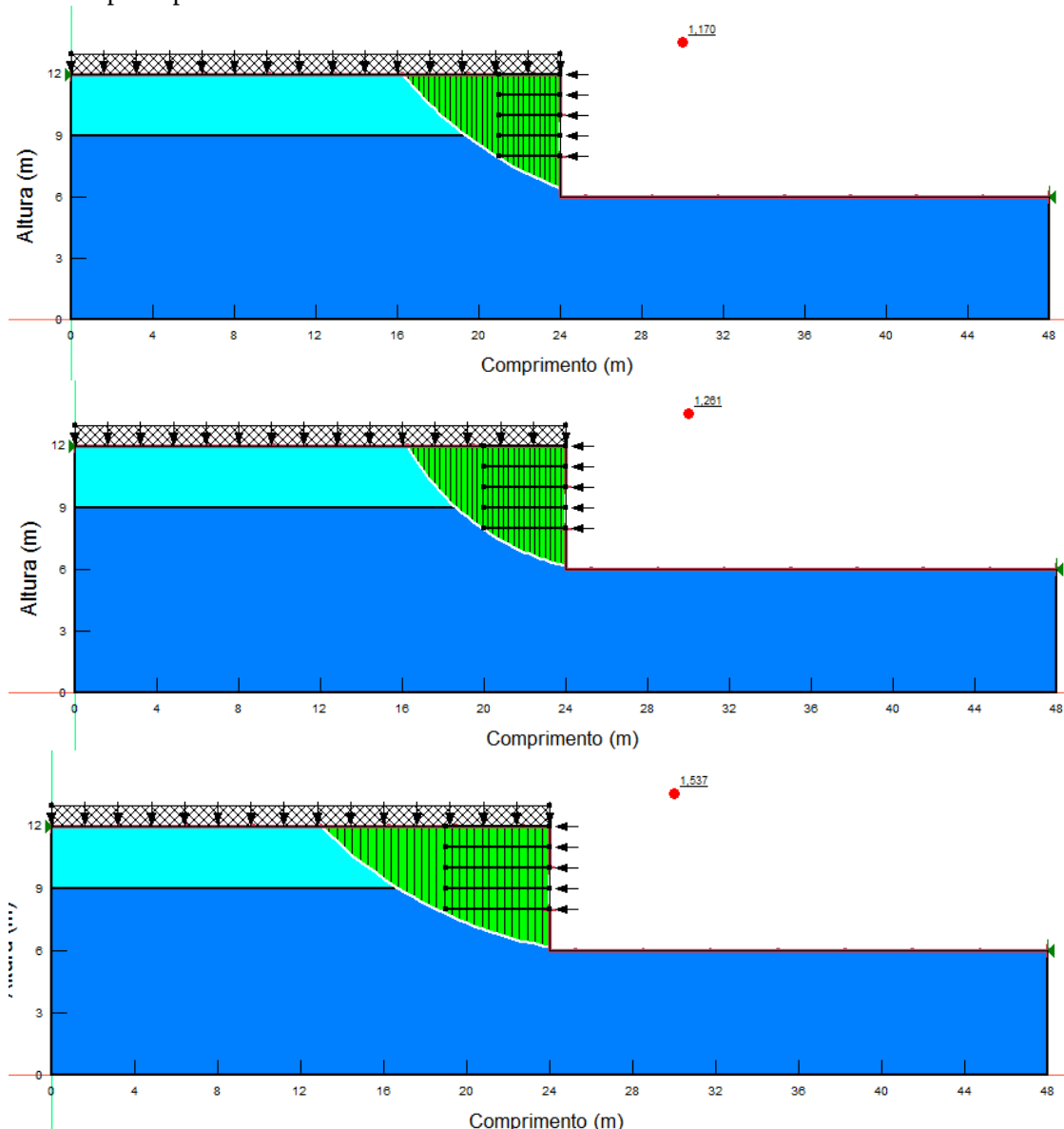


Fonte: Autora (2018).

Já pelo método de Morgenstern-Price, o talude com cinco camadas de reforço obteve um fator de segurança de 1,888, enquanto que com seis camadas o FS foi de 2,176. Pelo método de Fellenius, o talude com cinco camadas de reforço obteve um fator de segurança de 1,863. Ao ser inserida a sexta camada de reforço, este fator de segurança passou a ser de 2,035. Pode-se perceber que o método de Fellenius é o mais conservador, pois com cinco tiras e em todos os métodos, o talude já era considerado estável.

O comprimento dos geotêxteis também foi analisado. A partir de três metros de comprimento o fator de segurança obtido foi de 1,170 pelo método de Bishop Simplificado. O FS do talude com reforços de quatro metros foi de 1,261, já com cinco metros foi de 1,537. As duas primeiras análises de comprimentos obtiveram fatores de segurança abaixo do mínimo, sendo adequado o uso apenas de mantas com cinco metros de comprimento ou mais. Na Figura 34, pode ser vista a superfície de ruptura e o fator de segurança para geossintéticos com três, quatro e cinco metros, respectivamente, através do método de Bishop simplificado.

Figura 34: Reforços com três, quatro e cinco metros de comprimento, respectivamente, pelo método de Bishop Simplificado.



Fonte: Autora (2018).

Através do método de Morgenstern-Price, o talude com os reforços com três metros obteve um FS de 1,166, com quatro metros um FS de 1,254 e com cinco metros um FS de 1,533. Neste método também se atingiu o fator de segurança mínimo apenas com cinco metros de comprimento, sendo adequado o uso com mantas de cinco metros ou mais.

Pelo método de Fellenius também foi analisado o comprimento dos reforços. Com três metros o fator de segurança foi de 1,158, com quatro metros o FS obtido foi de 1,237, e com cinco metros foi de 1,518, estando também todos abaixo do recomendado. A superfície de ruptura para o método de Mosgenstern-Prince e Fellenius são semelhantes ao método de Bishop Simplificado.

Através da simulação dos comprimentos pelos três métodos de equilíbrio pode-se perceber mais uma vez que o método de Fellenius é o mais conservador. Para esta análise, o talude mais adequado, em favor da segurança seria dimensionado pelo método de Fellenius, com cinco camadas de reforço, com no mínimo cinco metros de comprimento ou mais. Na Tabela 07 encontra-se um resumo dos fatores de segurança obtidos antes e depois da análise do reforço do solo e variação da quantidade de camadas e comprimento das mantas geossintéticas.

Tabela 07: Fatores de segurança obtidos no talude de 90° antes e depois do reforço.

	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price	Fellenius
Antes do reforço	0,684	0,686	0,584
Cinco camadas com 6m	1,891	1,888	1,863
Seis camadas com 6m	2,185	2,176	2,035
Comprimento 3m	1,170	1,166	1,158
Comprimento 4m	1,261	1,254	1,237
Comprimento 5m	1,537	1,533	1,518

Fonte: Autora (2018).

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo realizar uma verificação de taludes hipotéticos criados a partir de escavações para subsolos no solo de Cascavel, utilizando dados do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), aplicando estruturas de reforço em solo grampeado e solo reforçado com geossintético.

Ambos os sistemas de contenção de reforço de solo são do tipo muro de gravidade, em que as estruturas verticais resistem ao seu próprio peso, devido ao atrito entre seus componentes e o solo, evitando o deslizamento e o desmoronamento. As estruturas de solo reforçado envolvem um aterro selecionado contido por geossintéticos aderentes e o autoenvelopamento da estrutura. Já o solo grampeado consiste na inserção de chumbadores de aço no solo com a projeção de concreto na superfície.

O solo reforçado e o solo grampeado são estruturas semelhantes, mas diferem no método de execução: o solo grampeado é executado em corte, podendo ser realizado em taludes existentes ou não. Já nos muros de solo reforçado são executados aterros, onde as camadas são compactadas alternadamente com a disposição dos reforços sintéticos, impossibilitando a execução em encostas naturais.

O solo de Cascavel, do tipo laterítico e residual, poroso e permeável, é caracterizado como argila silto arenosa com elevado ângulo de atrito e coesão entre suas partículas e alta resistência ao cisalhamento, de acordo com Zen e Almeida (2018) e Almeida e Oliveira (2018). Essas características são adequadas para implantar os sistemas de reforço.

Ambos os sistemas destacam-se por serem considerados muito eficientes para estabilização de taludes e possuem baixos custos quando comparados a métodos de contenções tradicionais. Os custos envolvidos na construção de muros de gravidade aumentam de maneira mais expressiva com a elevação dos desníveis de contenção.

Com o uso do *software Geoslope* 2018 R2 foram obtidos fatores de segurança através dos métodos de equilíbrio-limite de Bishop simplificado, Morgenstern-Price e Fellenius para inclinações variadas com e sem o uso dos reforços para três taludes hipotéticos e instáveis, com seis metros de altura, com inclinações de 65° e 75° para solo grampeado e 90° para muros de solo reforçado.

Pode-se perceber que o método de Fellenius é o mais conservador, com fatores de segurança menores, sendo mais adequado seu uso para o dimensionamento de estruturas de

reforço. Por este método, os taludes com inclinação de 65° e 75° obtiveram um fator de segurança variado de 1,390 para 2,026 e 1,136 para 1,863, respectivamente. Pelo método de Bishop Simplificado o FS variou de 1,422 para 2,135 e 1,409 para 1,883, nos taludes com 65° e 75° , respectivamente. Já por Morgenstern-Price o FS dos taludes de 65° e 75° , variou de 1,412 para 2,123 e 1,143 para 1,180, respectivamente.

Para a simulação com o sistema de solo reforçado, foi analisada a variação da quantidade de reforços para um talude com inclinação de 90° . Com a utilização de cinco camadas de malhas geossintéticas, sendo uma a cada metro, o FS obtido foi de 1,863 pelo método de Fellenius. Com a inserção de uma sexta camada no quinto metro de profundidade, o fator de segurança atingiu o valor de 2,035. Pelo método Morgenstern-Price, com cinco camadas o FS foi de 1,888, enquanto que com seis camadas o FS foi de 2,176. Já pelo método de Bishop Simplificado, com cinco camadas o FS obtido foi de 1,891, e com seis camadas passou para 2,185.

Também foi analisada a variação do fator de segurança de acordo com o comprimento dos reforços. Apenas a partir de cinco metros de comprimento o talude atingiu o fator de segurança mínimo de 1,5. Quando analisado o comprimento das mantas para três e quatro metros, ou menos, o fator de segurança não atingia o valor mínimo.

Com isso, constatou-se que ambos os sistemas são eficientes para a estabilização de taludes com parâmetros de resistência do solo de Cascavel, possuem inúmeras vantagens sobre outros sistemas e ambos são economicamente viáveis. Também se concluiu que pelo método de Fellenius a análise de estabilidade do talude é mais conservadora, sendo o método mais adequado para analisar o fator de segurança dos taludes.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de um dimensionamento mais detalhado dos métodos de reforço de solo através de solo grampeado e solo reforçado com geossintético, ou ainda uma pesquisa em relação a outros métodos de contenção aplicados para o solo de Cascavel. Sugere-se que seja realizada uma pesquisa mais aprofundada sobre a influência dos tipos de geossintéticos no sistema de solo reforçado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7181**: Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ADRIANO, P.R.R. **Análise Tridimensional de Estabilidade de Talude utilizando o Método de Equilíbrio Limite Aperfeiçoado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2009.

ALMEIDA, A. D. C.; **Propostas Para Estabilização De Talude Na Rodovia Br-230, Km 19**, Trabalho de Conclusão de Curso, João Pessoa, 2016.

ALMEIDA. M. A.; OLIVEIRA. R. M. M.; Estimativa do Ângulo de Atrito e Coesão Através de Índices de Resistência Obtidos pela Sondagem SPT em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2018, Salvador, Bahia. COBRAMSEG, ABMS, 2018.

BATEIRA, C. **Movimentos de Vertente no NW de Portugal, Susceptibilidade Geomorfológica e Sistemas de Informação Geográfica**. 2001. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Letras da Universidade do Porto.

BISHOP, A.W.; BJERRUM L. **A relevância do ensaio triaxial para solução de estabilidade de problemas**: Procedimentos. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, P. A. S. **Manual de geotecnia**: taludes de rodovia: orientação para diagnóstico e solução de seus problemas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Ed. LTC. Rio de Janeiro 1996.

_____. **Mecânica dos solos e suas aplicações**: Fundamentos. 6.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volumes 1 e 2, 2000.

CARDOZO DE ALMEIDA, A. D. **Avaliações Orçamentárias Para Estabilização De Talude Na Rodovia BR-230**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, 2016.

_____. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra.** Disponível em < http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_Unid04EstabilidadeTaludes01.pdf> Acesso em março de 2018.

CARMIGNANI, L.; FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** 2ª Edição, rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

CRUDEN, D. M.; D. VARNES, J. **Landslide Types and Processes. Landslides: Investigation and Mitigation.** Washington D.C.: S. R. Transportation Research Board, 1996.

DAMIN, E. **Aplicação do modelo CAM-CLAY modificado ao solo de Cascavel-Pr.** Trabalho de Conclusão de Curso da Faculdade Assis Gurgacz, Cascavel, 2012.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Cengage Learning, 2011.

EHRlich, M.; AZAMBUJA, E.; “**Muros de solo reforçado**”, In: IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, volume único, pp. 81-100, Porto Alegre/RS, 2003.

EHRlich, M., BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução.** Oficina de Textos, 2009.

ENGINEERING, R. A. **Landslides Hazard Mitigation with Particular Reference to Developing Countries.** Great Britain, 1995.

FARO, V. P. **Trabalho de Mecânica dos Solos.** Disponível em < http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/TC_035Mec%C3%A2nica_dos_Solos/Aula_3_Resist%C3%A2ncia_ao_Cisalhamento.pdf> Acesso em 10 de março de 2018.

FILHO, O. A.; VIRGILI, J. C. **Estabilidade de Taludes.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

FUSCALDI, F. **Tutorial Geo-Slope.** Disponível em <<https://filipefuscaldi.wordpress.com/20-10/04/11/tutorial-geo-slope/>> Acesso em: 15 de março de 2018.

GEOFORT. **Estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil não tecido.** Disponível em <<http://www.obergeio.com.br/catalogo/Geofort-Solo-Reforcado.pdf>> Acesso em 28/10/2018.

GEORSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Departamento de estruturas e fundações, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Mecânica dos solos I.1.ed.,** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GONDIN, A. **Dimensionamento geotécnico de solo grampeado.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – BH, 2018.

GUERRA, Antonio José Teixeira; BOTELHO, Rosângela Garrido Machado. **Características E Propriedades Dos Solos Relevantes Para Os Estudos Pedológicos E Análise Dos Processos Erosivos.** Anuário do Instituto de Geociências - V.19 – 1996.

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações: teoria e prática**. 2ª Edição. São Paulo/SP: Pini LTDA, 1998.

HELDER I.; CHAMINÉ, M. J. A. **Da teoria à prática em geotecnia urbana de maciços rochosos: o exemplo da zona ribeirinha de Gaia**. Tecnologia e Vida – Revista da Secção Regional do Norte da ANET (6): 39-45, 2010.

KELLER, E. A. **Introduction to Environmental Geology**. Pearson Education, 2012.

LEBERT, M.; HORN, T. A. **Method to predict the mechanical strength of agricultural soils**. Soil Till. Res., 1991.

LEMONS & SANTOS. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 53 edição revista e ampliada. Viçosa, 2005.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R. **O solo no meio ambiente**. 1º Edição. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007.

MAGALHÃES. T. A.; **Análise Técnica e Econômica de Estruturas de Contenção de Taludes. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. COBRAMSEG, ABMS,

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MIGUEL, M. G.; TEIXEIRA, R. S. **Notas de Aula: Mecânica dos Solos**. Disciplina de Mecânica dos Solos. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, 1999.

MITCHELL, J. K., VILLET, W. C. B. **Reinforcement of Earth slopes and embankments**, 1987.

MOLINA, M. D.; GANDIN R. M. **Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento Através do ensaio de compressão triaxial rápido (CU) do subsolo da FAG em Cascavel (PR)**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, Cascavel – PR, 2015.

NARESI JR. L.A.; AGUIAR, M.F.P.; MAGALHÃES T.A.M.; AZEVEDO C.O.B.; **Análise técnica e econômica de soluções para estabilização de talude**. – 2018.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução À Mecânica Dos Solos Dos Estados Críticos**. 3º edição. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ: Terratek, 2007.

OLIVEIRA, R.M.; **Estimativa do ângulo de atrito e coesão através de índices de resistência obtidos pela sondagem SPT em solo laterítico e colapsível característico de Cascavel – PR**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, Cascavel – PR, 2016.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, Oficina de Textos, 2000.

PORTELINHA, F.H.M. **Avaliação experimental da influência do avanço do umedecimento no comportamento de muros de solos finos reforçados com geotêxteis não tecidos**. 2012. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo 2012.

PRESS, F.; SIEVER, R. **Understanding Earth**. W. H. Freeman and Company, 2001.

RANZINI, S.M.T.; NEGRO, A. J.; **Obras de contenção: tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas**. Fundações: Teoria e prática. São Paulo: PINI, 1998, p.497-515, cap. 13.

SANTOS, C. R.; **Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado**. 2004. Dissertação (Mestre em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos –SP, 2004.

SILVA, T. P.; **Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaíse**. 2005. (Dissertação de Mestrado). Rio de Janeiro: PUC – Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

SOLOTRAT. **Solo grampeado**. Disponível em <http://www.solotrat.com.br/dados/pt_ManSoloGrampeado.pdf> Acesso em 27 de outubro de 2018.

SUWIDAN, R. **Determinação Dos Parâmetros De Compressibilidade Em Amostras De Solo Mole Reforçadas Com A Incorporação De Colunas De Areia**. 2012. 58. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

TEIXEIRA, I. J. R, **Estudo comparativo de duas alternativas para contenção de taludes verticais: solo grampeado e cortina atirantada**. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil - Universidade Federal de Feira de Santana (Departamento de Tecnologia), Feira de Santana/BA, 2011.

TEIXEIRA, M. A. C.; FIGUEIREDO, F. G. **Inventário das Ocorrências de Movimentos de Vertente no NW de Portugal**, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 2006.

VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: A review of principles and practice - Natural Hazards**. UNESCO, 1984.

ZEN. B. A. B.; ALMEIDA M. A.; Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/Pr. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2018, Salvador, Bahia. COBRAMSEG, ABMS, 2018.

ZÊZERE, J. L. R.; TRIGO, M. M. **Rainfall - Triggered Landslides Occurred in the Lisbon Region**, 2008.

ZIRLIS, A. C.; PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T. **Manual de serviços geotécnicos** – Solotrat Engenharia Geotécnica, São Paulo/SP, 4ª Edição, 92p, 2014.