

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ERICO RAFAEL DA SILVA

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE COM VARIAÇÃO
GEOMÉTRICA E APLICAÇÃO DE CONTENÇÃO EM SOLO
GRAMPEADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

ERICO RAFAEL DA SILVA

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE COM VARIAÇÃO
GEOMÉTRICA E APLICAÇÃO DE CONTENÇÃO EM SOLO
GRAMPEADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dsc. Ronaldo Luiz dos Santos Izzo

CURITIBA

2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE COM VARIAÇÃO GEOMÉTRICA E APLICAÇÃO DE CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO

Por

ERICO RAFAEL DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 10 de dezembro de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador - Ronaldo Luís dos Santos Izzo, D.Sc.
UTFPR

Profa. Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
UTFPR

Prof. Petrônio Mello Montezuma, Dr.
UTFPR

Aos meus queridos pais,
que com apoio e carinho, não
mediram esforços pela conclusão
desta etapa em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro ao meu bom Deus, por ter me dado forças e nunca desistir dessa jornada e ultrapassar os obstáculos.

Em especial minha mãe Aurea, que sempre esteve presente e fez do ensino algo primordial em minha vida. Mãe, obrigado pela paciência, pelas palavras de carinho e pelo seu amor inconstante.

Ao meu pai Lucindo e aos meus irmãos Marcelo e Alex, sou grato por ter vocês sempre ao meu lado partilhando de momentos tão agradáveis

Durante a jornada acadêmica, foram muitas as pessoas que fizeram parte dessa fase em minha vida, e peço desculpas por não as mencionar em tão breves palavras, mas tenham certeza que serão sempre lembrados como grandes amigos e saibam que minha gratidão é imensa.

Sou grato aos meus queridos professores que sempre estavam disponíveis para compartilhar de seu conhecimento, foram muitas as dificuldades, muitas provas, mas sei o quanto isso foi importante para o meu crescimento. Em especial agradeço aos mestres que fizeram parte da elaboração dessa pesquisa, professores Ronaldo Izzo e Petrônio Montezuma, o apoio de vocês foi essencial na realização desse trabalho.

E por fim, agradeço a todos os demais colaboradores, colegas de trabalho e amigos. Gostaria que soubessem que foi muito bom contar com cada um de vocês. Meu sincero obrigado.

RESUMO

SILVA, E. R. (2015). Estudo da estabilidade de um talude com variação geométrica e aplicação de contenção em solo grampeado. Campo Mourão, 2015. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem do estudo de estabilidade de taludes com a aplicação do grampeamento do solo. O emprego de reforços em taludes se faz necessário quando há possibilidade de rupturas, ou seja, quando as tensões atuantes superam as tensões de resistência do solo, acarretando em possíveis perdas de vidas humanas ou materiais. A análise de estabilidade foi realizada seguindo os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e com a utilização dos métodos de Bishop e Spencer com o auxílio do *software GeoStudio 2012*. Para a modelagem do talude, foi necessário determinar a coesão e o ângulo de atrito do solo. Tais parâmetros geotécnicos foram obtidos na execução de ensaios de cisalhamento direto, que possibilitou a construção da envoltória de ruptura. Foram feitos também ensaios de umidade e granulometria, a fim de caracterizar o solo que compõe o maciço em estudo. Os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do talude original e nas demais variações geométricas não atenderam o critério especificado pela norma técnica brasileira NBR 11682 (2006) - Estabilidade de encostas. Segundo essa norma, para garantir um alto nível de segurança, é necessário que o fator de segurança mínimo seja de 1,50, o que implica na necessidade de execução de um sistema de contenção adequado que impeça a ruptura. Para determinar a resistência ao arrancamento e conseqüentemente dimensionar os grampos, foi necessário a utilização de uma equação empírica que relaciona a força de arrancamento com o número SPT do solo. Os métodos de Bishop e Spencer empregados nessa pesquisa, são baseados na subdivisão da massa instável em fatias, apresentaram valores muito próximos entre si para o fator de segurança. Com a aplicação do grampeamento do solo, pode-se observar uma mudança significativa no fator de segurança do talude original e em todas as suas variações geométricas estudadas, classificando o talude como estável conforme os critérios adotados pela norma brasileira.

Palavras-chave: Estabilidade. Talude. Análise. Grampeamento do Solo.

ABSTRACT

SILVA, E. R. (2015). Study of the stability of a slope with geometric variation and application of containment in nailed soil. Campo Mourão, 2015. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão.

This research presents a study approach on slopes stability with application of nailed soil. The use of reinforcements on slopes is required when there is possibility of ruptures, that is, when the acting tensions exceed the strength of the soil tensions, resulting in possible loss of human life or materials. The stability analysis was conducted following the Mohr-Coulomb rupture criteria and with use of the Bishop and Spencer methods with help of the GeoStudio Software 2012. For the modeling of the slope, it was necessary to determine the cohesion and the soil friction angle. Such geotechnical parameters were obtained during direct shear tests, which enabled the construction of the rupture envelopment. Humidity and granulometry tests were also performed, in order to characterize the soil which composes the mass under study. The safety factors obtained through the stability analysis of the original slope and of the others geometric variations did not meet the criteria specified by Brazilian technical norm NBR 11682 (2006) - slope stability. According to this standard norm, in order to ensure a high level of security is required for the safety factor to be 1.50, which implies the need for execution of an adequate containment system to prevent rupture. In order to determine the resistance to tearing and consequently to dimension the nail, it was necessary the use of an empirical equation which relates the peeling force with the SPT number of the soil. The methods of Bishop and Spencer applied in this research which are based on the subdivision of the unstable mass in slices, presented values very close to one to another for the safety factor. With the application of the nailed soil, one can observe a significant change in the safety factor of the original slope and all of its geometric variations studied, classifying the slope as stable according to the criteria adopted by the Brazilian Standard Norm.

Keywords: Stability. Slope. Modeling. Nailed Soil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	23
Figura 2 - Envoltória de Ruptura	24
Figura 3 - Circulo de Mohr - envoltória de ruptura.....	25
Figura 4 - Tentativa de superfície de ruptura.....	26
Figura 5 - Forças atuantes na n-ésima fatia	26
Figura 6 - Polígono de forças para o equilíbrio.....	26
Figura 7 - Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer.....	28
Figura 8 - Determinação gráfica do fator de segurança pelo Método de Spencer	30
Figura 9 - Desenho esquemático dos elementos do grampo.....	32
Figura 10 - Fases típicas de execução de uma obra em solo grampeado.....	34
Figura 11 - Ruptura interna por esforço de tração nos grampos	37
Figura 12 - Modos de ruptura interna	38
Figura 13 - Modos de ruptura externa	39
Figura 14 - Talude original de estudo.....	40
Figura 15 - Perfil do talude de estudo	41
Figura 16 a - Bloco de solo coletado	42
Figura 16 b - Anél metálico amostrador	42
Figura 17 - Equipamento de ensaio	43
Figura 18 - Curva granulométrica do solo	45
Figura 19 - Esquema de ensaio de arrancamento em solo grampeado	49
Figura 20 - Modelo do talude de estudo (GeoStudio).....	54
Figura 21 - Análise talude original (Bishop).....	54
Figura 22 - Análise talude original (Spencer)	55
Figura 23 - Variação V1 do talude.....	56
Figura 24 - Análise talude variação V1 (Bishop).....	57
Figura 25 - Análise talude V2 (Spencer).....	57

Figura 26 - Variação V2 do talude.....	58
Figura 27 - Análise talude variação V2 (Bishop).....	58
Figura 28 - Análise talude variação V2 (Spencer)	59
Figura 29 - Variação V3 do talude.....	59
Figura 30 - Análise talude variação V3 (Bishop).....	60
Figura 31 - Análise talude variação V3 (Spencer)	60
Figura 32 - Talude original com aplicação do grampeamento	62
Figura 33 - Talude variação V1 com aplicação do grampeamento	63
Figura 34 - Talude variação V2 com aplicação do grampeamento	64
Figura 35 - Talude variação V2 com nova configuração dos grampos	65
Figura 36 - Talude variação V3 com aplicação do grampeamento	66
Figura 37 - Talude variação V3 com nova configuração dos grampos	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de umidade antes e após o ensaio de cisalhamento direto.....	44
Tabela 2 – Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	47
Tabela 3 – Parâmetros mecânicos das barras de aço.....	48
Tabela 4 – Dados de projeto dos grampos	50
Tabela 5 – Fator de segurança de estabilidade	61
Tabela 6 – Resultados dos fatores de segurança das análises de estabilidade.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas

c	coesão
c'_d	coesão que se desenvolve ao longo da superfície potencial de ruptura
d	diâmetro do grampo
F	força atuante
F_c	fator de segurança em relação à coesão
F_s	fator de segurança em relação à resistência
F_ϕ	fator de segurança em relação ao atrito
H	altura
H_{cri}	altura crítica
L	largura
L_n	largura da fatia de solo
N_a	componente normal da força peso W
N_r	componente normal da força de reação R
q_s	resistência ao cisalhamento do grampo
R	força de reação
r	raio
T_a	componente tangencial da força peso W
T_r	componente tangencial da força de reação R
W	peso do solo
W_n	peso da fatia de solo

Letras gregas

α	ângulo de inclinação da fatia de solo
α_n	ângulo de inclinação da n -ésima fatia de solo
β	ângulo de inclinação do talude em relação à horizontal
γ	peso específico do solo

γ_{sat}	peso específico saturado do solo
Δ	variação
θ	ângulo de inclinação do plano de ruptura em relação à horizontal
θ_{cr}	ângulo crítico de inclinação do plano de ruptura em relação à horizontal
σ'	tensão normal efetiva média
σ'_1	tensão normal efetiva máxima
σ'_3	tensão normal efetiva mínima
τ'	tensão de cisalhamento média
τ_d	tensão de cisalhamento média desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura
τ_f	resistência média ao cisalhamento do solo
ϕ'	ângulo de atrito
ϕ'_d	ângulo de atrito que se desenvolve ao longo da superfície potencial de ruptura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 Justificativa	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Reforço de Solo	19
2.2 Estabilidade de Taludes.....	20
2.3 Categorias de Ruptura.....	21
2.4 Resistência ao cisalhamento	21
2.5 Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes.....	22
2.5.1. Método de Mohr-Coulomb	23
2.5.2 Método das Fatias Simplificado de Bishop.....	25
2.5.3 Método de Spencer.....	27
2.6 Solo Grampeado.....	30
2.6.1 Grampos	31
2.6.2 Revestimento de Face	32
2.6.3 Metodologia Construtiva	33
2.6.4 Viabilidade	35
2.7 Análises De Estruturas de Solo Grampeado	36
2.7.1 Ruptura Interna.....	37
2.7.2 Ruptura Externa.....	38
2.7.3 Ruptura Mista	38
3 METODOLOGIA	40
3.1 Caracterização do local de retirada das amostras.....	40
3.2 Ensaios Realizados	41
3.2.1 Ensaio de cisalhamento direto	41
3.2.2 Ensaio de Teor de Umidade.....	43
3.2.3 Ensaio de granulometria	44
3.3 Análise Estabilidade.....	45
3.2.1 Fator de segurança.....	46
3.3.2 Propriedades do grampo.....	48

4. RESULTADOS	51
4.1 Parâmetros geotécnicos	51
4.2 Análise de estabilidade do talude.....	53
4.3 Análise de estabilidade com variação geométrica do talude	55
4.3.1 Primeira variação geométrica do talude (V1)	56
4.3.2 Segunda variação geométrica do talude (V2)	57
4.3.3 Terceira variação geométrica do talude (V3).....	59
4.4 Análise de estabilidade com aplicação do solo grampeado	62
4.4.1 Aplicação do grampeamento no talude original.....	62
4.4.1 Primeira variação geométrica com aplicação do grampeamento (V1).....	63
4.4.1 Segunda variação geométrica com aplicação do grampeamento (V2).....	64
4.4.1 Terceira variação geométrica com aplicação do grampeamento (V3).....	65
5. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Um talude pode ser definido como uma superfície inclinada delimitado por um maciço de solo podendo ser terroso ou rochoso. São popularmente conhecidas pelo seu baixo valor aquisitivo uma vez que não utilizam nenhum material para garantir sua estabilidade além do próprio solo. Um dos critérios necessários para garantir sua estabilidade está relacionada ao seu ângulo de inclinação que não deve ultrapassar o seu ângulo de ruptura.

A aplicação dos taludes é comum em obras geotécnicas de rodovias, aterros sanitários e hidroelétricas. O estudo de estabilidade consiste no levantamento de informações que impeçam sua ruptura. Em casos em que o solo não é capaz de resistir aos esforços atuantes, faz-se necessária a adição de reforços. Dentre as obras de contenção mais conhecidas estão a cortina atirantada, terra armada, gabiões, estacas e aplicação de geotêxtil.

O solo grampeado é uma técnica de contenção que tem ganhado destaque por apresentar grandes vantagens, principalmente pelo seu baixo custo e rapidez na execução. O método também conhecido como solo pregado, foi empregado no Brasil na construção de túneis no ano de 1970 e em seguida na França, ganhando sua aceitação na engenharia geotécnica em todo o mundo. (ORTIGÃO; ZIRLIS; PALMEIRA, 1993).

O grampo é a estrutura fundamental no método de grampeamento. Normalmente os grampos são constituídos por barras de aço inseridas no talude sob uma inclinação mínima que garante que a nata de cimento envolva todo o grampo. Para isso, são inseridos centralizados nas barras que possibilita a total cobertura do aço e uma melhor aderência ao solo.

A estabilização de encostas se faz necessária para restringir movimentações indesejadas no maciço de solo garantindo o equilíbrio. Para Silva (2006, p. 4), “análises de movimentos de massa consistem em identificar as causas e as consequências dos processos condicionantes”. Os estudos detalhados dos métodos de contenção proporcionam o levantamento de dados e informações

importantíssimas, propondo soluções para problemas ligados à área geotécnica, impedindo que ações naturais interfiram no meio ocasionando grandes danos.

O processo de execução do método de contenção em solo grampeado, consiste na escavação, instalação dos grampos e revestimento da face do talude. Uma análise correta do processo executivo auxilia na otimização do processo, contribuindo para o aperfeiçoamento de novas técnicas construtivas.

Com a realização de ensaios geotécnicos é possível definir parâmetros utilizados na modelagem e na execução das obras de contenção. Em ensaios de cisalhamento direto e triaxial, são determinados principalmente a coesão e o ângulo de atrito, já em ensaios de granulometria, é realizada a caracterização do solo.

Com a aplicação de métodos de análise de estabilidade é possível determinar o fator de segurança do talude levando em conta as tensões atuantes no solo e suas tensões admissíveis. As zonas de ruptura surgem quando as tensões atuantes são maiores que as tensões a qual o talude resiste, nesse caso considera-se que o maciço é instável.

Um dos fatores que devem ser levados em conta em uma análise de estabilidade é a geometria do talude. Determinar as dimensões do maciço é uma das etapas necessárias que antecedem o dimensionamento de qualquer estrutura contenção e interferem diretamente na escolha do tipo de reforço a ser executado. Além disso, a análise correta do solo e a determinação dos fatores geotécnicos são fundamentais no estudo de estabilidade.

Sendo assim, esta pesquisa tem como objetivo realizar a análise de estabilidade de um talude com o emprego do grampeamento do solo através do *software GeoStudio 2012*, além disso, avaliar a variação do fator de segurança com alteração das dimensões do maciço em análise.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo visa à realização da análise da estabilidade de um talude com sua variação geométrica e aplicação do grampeamento do solo através da modelagem computacional utilizando um software.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar os parâmetros geotécnicos do solo através de ensaios de cisalhamento direto e teor de umidade;
- Avaliar a influência da variação geométrica do talude para as condições de estabilidade através do programa computacional *GeoStudio 2012* na estabilização do talude estudado;
- Estudar o comportamento mecânico do solo sob a aplicação do grampeamento.

1.2 Justificativa

Os problemas relacionados à instabilidade de taludes causam danos à sociedade em geral e preocupações na área da engenharia geotécnica.

Os métodos de estabilização de solo, tanto para taludes naturais ou escavados, consistem em garantir condições de equilíbrio ao maciço impedindo que fenômenos de deslizamento, escorregamento, tombamento e outros ocorram. Tais fenômenos influenciados tanto pela ação humana como também os naturais impulsionam o aumento de pesquisas nesta área a fim de conter, ou até mesmo impedir suas ocorrências.

Apesar da existência de vários estudos sobre o uso de grampos como reforço de solos, esta técnica de solo grampeado ainda carece de maiores informações e detalhamentos a respeito de sua aplicação em distintos tipos de solos, como também, a determinação de alguns parâmetros de análise na busca da minimização de custos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reforço de Solo

Resultante do processo natural do intemperismo ou também meteorização das rochas pela sua desintegração mecânica e decomposição química, o solo possui propriedades variadas para cada região. Seu estudo consiste na determinação destas características para um conhecimento técnico e específico do local em análise (CAPUTO, 1987).

Segundo Caputo (1987), a identificação e determinação destas propriedades físicas demandam grande trabalho, levando em consideração que há a interferência de vários fatores atuantes, tais como os minerais constituintes, estrutura, textura, condições químicas e físicas resultantes do intemperismo, dentre outras. No entanto, seu conhecimento é de extrema importância para o desenvolvimento de soluções aos problemas relacionados à área geotécnica. Ensaio laboratoriais são capazes de resultar características tais como: peso específico aparente, porosidade, resistência a compressão, resistência a tração, resistência ao cisalhamento e fluência.

Tendo posse destes dados, o reforço se faz necessário quando a associação de outros materiais ao solo contribui para melhorias destas características. Segundo Ehrlich e Becker (2009, p. 25), o solo quando em seu estado compactado, em geral, apresenta notáveis resistência à compressão e ao cisalhamento, porém, a resistência a tração é considerada nula. A partir daí, surgiram tais técnicas de reforço a fim de suprir esta e outras deficiências.

Outras ocasiões importantes para a utilização de reforços são devido a ação de agentes naturais, como vento, chuva e erosão. Silva e Lana (2012), afirmam que a variação dos índices físicos influenciados tanto pela ação da água como também por ações mecânicas está diretamente relacionada à resistência do maciço rochoso, ocasionando uma possível ruptura.

Em muitos casos, a solução pode ser considerada simples. Para Lemes (2001) a aplicação de vegetação adequada em taludes, por exemplo, pode suprir tais deficiências do solo auxiliando em sua estabilidade e impedindo tais efeitos.

Em casos extremos como em areias onde a coesão é praticamente nula, há uma limitação do ângulo do talude, próximo aos 40°. Quando aplicadas técnicas de reforços tendo como objetivo a estabilidade externa e interna do solo, ocorre o surgimento de uma zona estável onde antes era considerável instável, o que impede a ruptura. Pode-se obter assim taludes verticais (EHRlich; BECKER, 2009).

2.2 Estabilidade de Taludes

Uma superfície de solo exposta, inclinada com o plano horizontal, podendo ser natural, caso das encostas, ou feita pelo homem, cortes e aterros, é denominada de talude (DAS, 2011, p. 469).

Os taludes são contenções particularmente famosas pelo seu baixo valor aquisitivo, pois não utiliza nenhum outro material além do próprio solo que garante sua estabilidade. No entanto, algumas exigências são necessárias, dentre elas o tipo de solo e seu ângulo de inclinação, que não deve ser superior ao ângulo de ruptura.

No estudo da estabilidade dos taludes, estão relacionados aos agentes naturais, que intervêm ao meio, ocasionando possíveis danos e rupturas. Estas condições estão relacionadas aos agentes de formação da rocha de natureza geológica, hidrológica e geotécnica, aumentando ainda mais a complexidade do caso.

Os estudos que abrangem a estabilização de taludes, por meio dos diferentes tipos de reforços, garantem um aumento gradativo no levantamento de informações necessárias para melhorias efetivas nos métodos já existentes, como também, no surgimento de novas técnicas.

Conforme Ferreira et al. (2004), a movimentação de encostas tem causado danos em várias cidades brasileiras. Uma das possíveis causas são os altos índices pluviométricos, erosões, tipos de relevos e características climáticas que contribuem para a movimentação do solo.

2.3 Categorias de Ruptura

Tendo como problema a instabilidade do talude, a ruptura pode ocorrer de várias maneiras diferentes. Para Caputo (1987, p. 382), os movimentos são classificados em 3 grandes grupos:

- Desprendimento de terra ou rocha: é o destacamento ou “deslocamento” de solo ou rocha de um talude. O desprendimento ocorre em um ponto abaixo do centro de gravidade da massa deslizante com a rotação da massa de solo ou rocha.
- Escorregamento: é o deslocamento rápido de uma grande massa de solo que se desliza para baixo ao longo da superfície de deslizamento;
- Rastejo: considerado um deslocamento do maciço lento e contínuo das camadas superficiais. Este fenômeno pode ser observado devido a inclinação da vegetação localizada nessa superfície.

Já para Das (2011, p. 469), as definições das categorias de ruptura são as já citadas anteriormente adicionadas de 2 novas classificações:

- Tombamentos: ocorre o movimento de rotação de um maciço de solo a frente do talude.
- Expansões Laterais (ou espalhamentos): é um tipo de deslizamento que acontece pelo movimento de translação.

2.4 Resistência ao cisalhamento

Normalmente, as causas de fenômenos como os escorregamentos estão relacionados ao aumento de carga sobre o talude, classificada como ocorrência externa, e o decréscimo da resistência ao cisalhamento do material, neste caso considerada como interna.

A resistência ao cisalhamento pode ser definida segundo Das (2011) e Caputo (1988), como uma força interna capaz de resistir a deslizamentos e rupturas ao longo

de seu plano e conservar sua estabilidade. A determinação correta deste parâmetro é um artifício fundamental na análise de pressões laterais, capacidade de carga, dentre outras funções.

A análise da estabilidade segue a seguinte metodologia:

- Recolhimento de amostras indeformadas;
- Realização de ensaios laboratoriais;
- Determinação de parâmetros de comportamento (tensão x deformação x resistência);
- Utilização de dimensionamentos garantindo a estabilidade

A variação de fatores internos e externos aliados as condições climáticas de chuva, onde há um aumento do peso específico do material (saturação) e o excesso de umidade devido ao aumento da pressão neutra diminuem a resistência ao - cisalhamento do material, esclarecem a ocorrência de problemas de escorregamento em períodos de grandes precipitações (CAPUTO, 1987, p. 384).

Outra causa comum, é a escavação inadequada próxima ao pé do talude. Essa prática, sem o conhecimento prévio e técnico necessário, contribui para a ocorrência de escorregamentos.

2.5 Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes

Os métodos de estudo de taludes, teoricamente submetidos a três distintos campos de força, peso, escoamento de água e à resistência ao cisalhamento, são baseados no cálculo de tensões em todos seus planos e na comparação com as tensões admissíveis. Seguindo este tipo de análise, denominado método de análise de tensões, aparecerão zonas de rupturas quando as tensões a qual o montante de solo estiver submetido forem maiores que as tensões que ele resiste, caso contrário estará em equilíbrio (CAPUTO, 1987).

2.5.1. Método de Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb, equação (1), afirma que a ruptura do material ocorre através da combinação de forças normais e cisalhantes, e não por forças isoladas máximas, seja de cisalhamento ou normal. Na mecânica dos solos, vale aproximar a tensão de cisalhamento ao plano, formando uma função linear da tensão normal (DAS, 2011).

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg}\phi \quad (1)$$

Onde:

c	coesão
ϕ	ângulo de atrito interno
σ	tensão normal do plano de ruptura
τ_f	resistência média ao cisalhamento do solo

Conforme descreve Craig (2007), a resistência ao cisalhamento é desenvolvida por forças internas entre as partículas de solo e seu estado de tensão no plano pode ser representado pela relação entre a tensão de cisalhamento (τ) e a tensão normal efetiva (σ'). Sejam essas tensões representadas num plano *ab*, a Figura 1 define as forças de equilíbrio para esse estado do solo conforme o critério de Mohr-Coulomb.

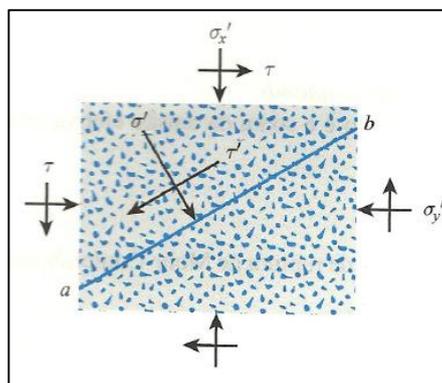


Figura 1 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb
 Fonte: Das (2011 p. 332)

Em solos saturados, a equação (1), deve ser expressa em termos de tensão efetiva. Sabendo que a tensão efetiva (σ') corresponde a tensão total menos poropressão (u), pode-se escrever a seguinte equação:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (2)$$

Na figura 2, o gráfico da envoltória de ruptura definida pela Equação 2. Se o ponto *A* representa a magnitude da relação das tensões atuantes nesse estado de tensão, podemos afirmar que a ruptura não ocorrerá ao longo do plano. Para o caso das tensões normal e de cisalhamento quando representadas pelo ponto *B*, que se localiza sobre a envoltória de ruptura, a ruptura por cisalhamento ocorrerá ao longo do plano. Já para um estado de tensão cuja representação seja o ponto *C*, considere-se que não poderá existir, pois se encontra acima da envoltória de ruptura, que possivelmente já teria ocorrido.

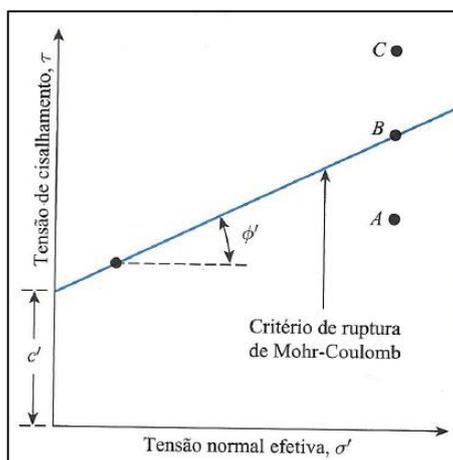


Figura 2 - Envoltória de Ruptura
Fonte: Das (2011 p. 332).

A envoltória de ruptura é representada pela linha reta definida pela Equação 2, da qual são obtidos os denominados parâmetros tangentes, que são a coesão e ângulo de atrito do solo, válidos apenas para um intervalo limitado de tensões. Se a linha de ruptura passar pela origem, a coesão é considerada nula ($c' = 0$). Na figura 3, *fgh* é a envoltória de ruptura. A linha radial *ab* define o plano principal maior e a linha radial *ad* o plano de ruptura.

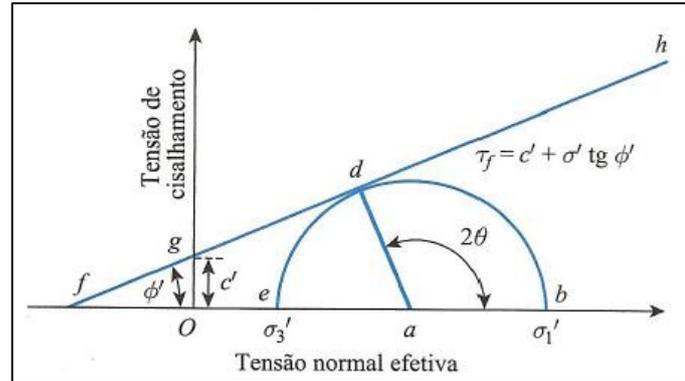


Figura 3 - Círculo de Mohr - envoltória de ruptura
 Fonte: Das (2011 p. 333).

Pode-se definir que as tensões σ_1 e σ_3 são dadas pela seguinte equação:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 tg^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' tg \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

2.5.2 Método das Fatias Simplificado de Bishop

Como o próprio nome diz, o método de fatias sugere que o solo acima da superfície de ruptura seja dividido em fatias verticais. Este método, que leva o nome de seu autor, foi proposto no ano de 1955 e segundo Das (2011), é provavelmente o mais utilizado por apresentar resultados satisfatórios quando incorporado a recursos computacionais.

Na análise da estabilidade através do método de fatias (figura 4), onde AC é um arco de círculo que representa a superfície de ruptura, o solo acima da curva é dividido em fatias verticais de largura não necessariamente iguais. Na aplicação do método as forças nas faces de cada fatia (figura 5), nem sempre são levadas em conta e como forma de simplificação, assume-se que a poropressão é nula.

Segundo Conceição (2011), deve-se admitir que a superfície de ruptura seja circular e considerar que as forças nas laterais das fatias são apenas horizontais. As forças tangenciais entre elas devem ser desprezadas. O equilíbrio de forças se dá na direção vertical, satisfazendo ambas as condições, de momentos e forças na direção do eixo vertical (figura 6).

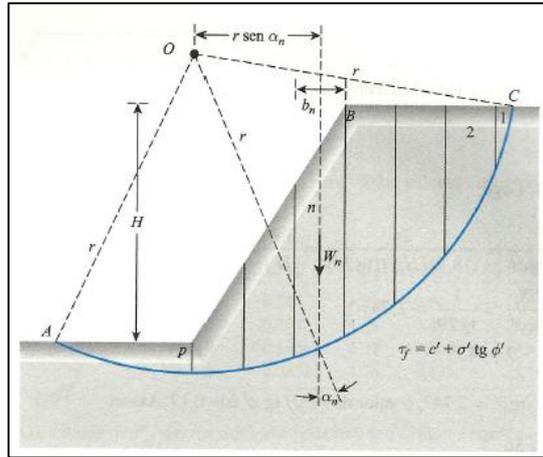


Figura 4 - Tentativa de superfície de ruptura
 Fonte: Das (2011 p. 498).

Conforme descreve Das (2011), podemos deduzir as seguintes equações:

$$T_r = N_r(tg\phi'_d) + c'_d\Delta L_n = N_r \frac{(tg\phi'_d)}{F_s} + \frac{c'\Delta L_n}{F_s} \quad (4)$$

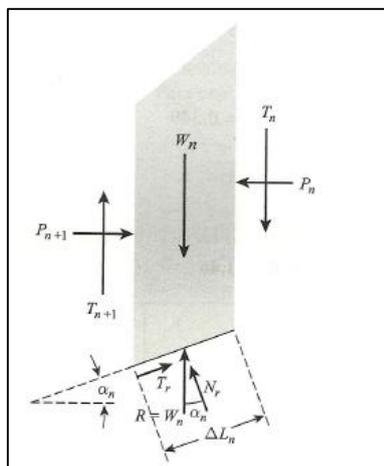


Figura 5 - Forças atuantes na n-ésima fatia
 Fonte: Das (2011 p. 498).

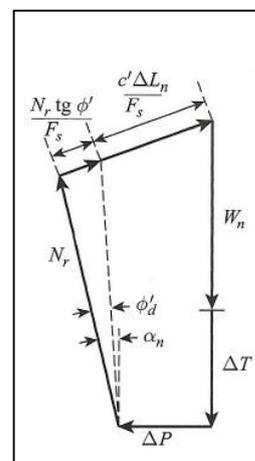


Figura 6 - Polígono de forças de equilíbrio
 Fonte: Das (2011 p. 501).

As forças que compõem a n-ésima fatia são dadas pela soma das forças verticais, onde se obtém:

$$W_n + \Delta T = N_r \cos \alpha_n + \left[\frac{N_r \operatorname{tg} \phi'_d}{F_s} + \frac{c' \Delta L_n}{F_s} \right] \operatorname{sen} \alpha_n \quad (5)$$

Onde: $\Delta T = T_n - T_{n+1}$ e $\Delta P = P_n - P_{n+1}$

Calculando-se os momentos em relação à O (figura 7), teremos o equilíbrio da cunha ABC segundo a seguinte equação:

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \operatorname{sen} \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} T_r r \quad (6)$$

Onde:

$$T_r = \frac{1}{F} (c' \Delta L_n + N_r \operatorname{tg} \phi') \quad (7)$$

Substituindo as equações (5) e (7) na equação (6), tem-se:

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \operatorname{tg} \phi' + \Delta T \operatorname{tg} \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \operatorname{sen} \alpha_n} \quad (8)$$

Onde:

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\operatorname{tg} \phi' \operatorname{sen} \alpha_n}{F_s} \quad (9)$$

Adotando $\Delta T = 0$, a equação (8) se torna:

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \operatorname{tg} \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \operatorname{sen} \alpha_n} \quad (10)$$

O fator de segurança nesse método é obtido através de iterações, uma vez que F_s está presente em ambos os lados da equação 10.

2.5.3 Método de Spencer

Considerado um dos métodos mais rigorosos de equilíbrio limite, o método de Spencer foi desenvolvido para superfícies circulares e posteriormente, adaptado para outros tipos de superfície. Este método diferentemente do proposto por Bishop, satisfaz todas as condições de equilíbrio estático, sendo aplicado também em superfícies não circulares. Ele assume que as forças das fatias são paralelas entre si,

todas inclinadas sobre um mesmo ângulo. Através de um processo de iteração, o cálculo é realizado supondo dados como o fator de segurança e ângulo de inclinação até que se obtenha o equilíbrio das forças na fatia (TONUS, 2009, p. 51).

Spencer considerou que as forças X_i , Y_i , e X_{i+1} , Y_{i+1} fossem substituídas por uma única força Q_i , com inclinação δ_i com a horizontal. A força Q_i deve passar pelo ponto médio de base da fatia onde ocorre a intercessão com as forças N_i , T_i e W_i (figura 20).

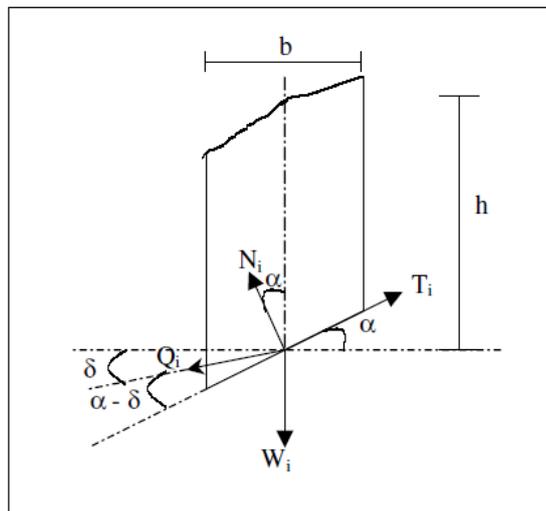


Figura 7 - Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer
Fonte: Adaptado de Fabrício (2006, p. 27).

Considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e impondo o equilíbrio de forças nas direções normais e paralelo à base da fatia, tem-se a seguintes equações:

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot b \cdot \sec \alpha}{F} + \frac{tg\phi' \cdot (h \cdot \cos \alpha - u \cdot b \cdot \sec \alpha)}{F} - w \cdot \sen \alpha}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \frac{tg\phi \cdot tg(\alpha - \delta)}{F} \right]} \quad (11)$$

Supondo que não existam forças externas atuando no talude, as componentes horizontais e verticais da força Q devem ser nulas, então:

$$\sum Q \cos \delta = 0: \quad (12)$$

$$\sum Q \sin \delta = 0: \quad (13)$$

Como a soma dos momentos das forças externas em relação ao centro de rotação é nulo, então a soma dos momentos das forças entre as faixas em relação ao centro também é zero. Assim:

$$\sum Q \cdot R \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (14)$$

Como a superfície é circular e R é constante, temos:

$$R \sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (15)$$

Logo,

$$\sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (16)$$

Para o sistema de equações tornar-se determinável, foi considerada a hipótese de δ constante para todas as fatias. Assim, as equações 12 e 13 se reduzem para:

$$\sum Q = 0 \quad (17)$$

Aplicando as equações 15 e 16, onde Q é obtido através da equação 11, a solução do problema é feita de maneira gráfica, conforme a figura 8.

Plota-se em um gráfico os fatores de segurança (FS) encontrados pelas equações 15 e 16 sob a variação de δ . O ponto onde a curva das duas funções coincide, encontra-se o valor de F que satisfaz ambas equações (FABRÍCIO, 2006 p. 28).

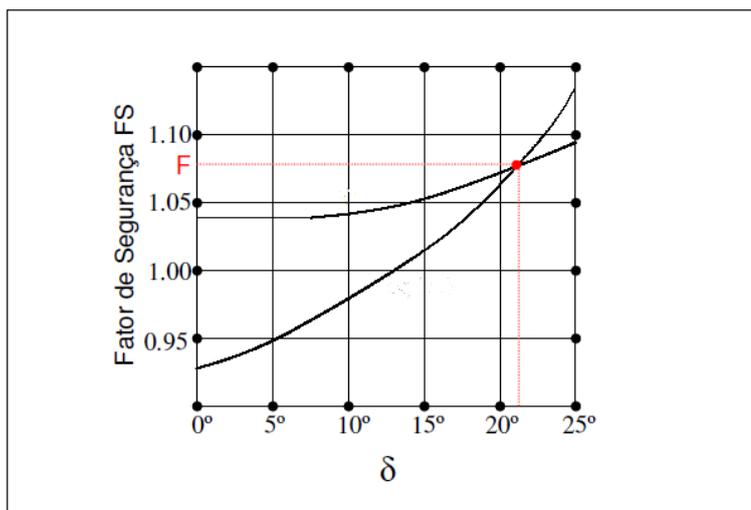


Figura 8 - Determinação gráfica do fator de segurança pelo Método de Spencer
 Fonte: Fabrício (2006, p. 28).

2.6 Solo Grampeado

Este método de contenção denominado solo grampeado ou também conhecido como solo pregado foi executado no Brasil intuitivamente por construtores de túneis no ano 1970 segundo relatos de Ortigão, Zirlis e Palmeira (1993, p. 291). Sua origem é baseada na técnica de construções de túneis NATM – *New Austrian Tunneling Method* (Novo método austríaco de tunelamento). Já no ano de 1972, a técnica foi empregada na França e se dissipou pelo mundo.

Segundo França (2007), esta técnica de estabilização considerada moderna e eficaz para taludes escavados, naturais e artificiais, é utilizada basicamente em duas situações: estabilização de taludes com baixa estabilidade e contenção de taludes em corte. Seu método de aplicação, consiste na introdução de barras de aço ou sintéticas, no maciço a ser estabilizado. Estes elementos passivos introduzidos em furos pré-executados por perfuratriz, são envolvidos por um revestimento de face, podendo ser uma calda de cimento ou argamassa, originando o denominado grampo.

Estes grampos resistem essencialmente a esforços de tração, porém, em alguns casos sofrem esforços cisalhantes e momentos fletores. A instalação dos grampos é realizada com uma leve inclinação com a horizontal, o que segundo Conceição (2011), garante a estabilização do solo através da associação de zona ativa à uma zona resistente.

Comparado a outras obras de contenção, o solo grampeado se destaca por apresentar as seguintes vantagens: rapidez de execução, flexibilidade e baixo valor econômico. No entanto, Silva (2006) ressalta que a flexibilidade da estrutura possibilita alguns deslocamentos do maciço e que, a técnica não é adequada para solos não coesos (areias), que não suportam escavações com pelo menos 1,0 m de altura.

2.6.1 Grampos

Os grampos são responsáveis por garantirem a estabilidade do maciço. Normalmente são constituídos por barras de aço, fibras de vidro ou outros materiais sintéticos. Para grampos envoltos em calda de cimento, o processo se inicia com a perfuração do solo que segundo França (2007), devem possuir uma inclinação mínima de 10° em relação à horizontal, o que facilita o escoamento desta calda envolvendo toda a barra.

A introdução dos grampos pode ser realizada sob pressão ou por gravidade. É necessário a utilização de centralizadores para garantir o recobrimento da barra pelo material de preenchimento. Para aumentar a aderência com a calda, empregam-se barras corrugadas. As barras que compõem as inclusões, normalmente são dobradas nas pontas que estão em contato com a face do concreto projetado (figura 9). Já para barras de maior diâmetro, onde não é possível seu dobramento, utilizam-se placas e porcas.

Para Floriano (2009), a injeção da calda de cimento causa melhorias próximas a 50% na aderência no contato entre o grampo e o solo, facilitando o preenchimento de fissuras. Quando instalados em ambientes agressivos, o grampo necessita de proteção contra corrosão.

Atualmente não há norma específica sobre a execução de solos grampeados. No entanto, recomenda-se utilizar a norma NBR 5629 – Execução de Tirantes Ancorados no Terreno, para se determinar o tipo de proteção a ser utilizada.

Uma das vantagens dessa forma de instalação dos grampos, segundo França (2007), é o grande campo de atuação, pois pode ser aplicado em diferentes tipos de

solo. Outra característica favorável, é a possibilidade de se obter a resistência necessária ao arrancamento através da injeção sob pressão controlada.

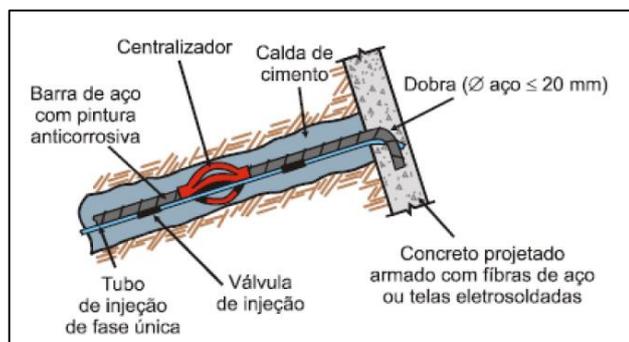


Figura 9 - Desenho esquemático dos elementos do grampo
Fonte: Adaptado de Floriano (2009, p. 24).

Além da técnica citada anteriormente, existe disponível no mercado a execução de grampos cravados, que são eficientes em solos não coesivos fofos que não contenham blocos de rochas. A instalação é rápida, econômica e a cravação é executada com o auxílio de martelos pneumáticos ou hidráulicos que não causam grandes perturbações no solo, porém sua aplicação não é recomendada para grampos longos em geral que não exceda os 8m de comprimento.

2.6.2 Revestimento de Face

Para garantir proteção e minimizar rupturas na face de escavação, em geral é feito um revestimento em concreto projetado armado com malhas de aço ou cobertura vegetal. Apesar de não possuir função estrutural, Conceição (2011) relata que para taludes mais verticais, deve-se adotar uma camada mais espessa de concreto. Já em taludes mais suaves, as tensões junto a face são menores podendo-se adotar uma cobertura vegetal por exemplo.

Estudado por Lemes (2001), a influência da vegetação em taludes, tem efeitos benéficos, sendo possível citar a diminuição da erosão e remoção de umidade do solo. Outro fator importante é o baixo custo de implantação deste tipo de contenção.

O concreto projetado na maioria dos casos é constituído por uma mistura de cimento, areia, pedrisco, água e aditivos. Segundo Conceição (2011), a aplicação pode ser realizada por via úmida ou por via seca, sendo a última, a mais utilizada devido a praticidade de interrupção do trabalho sem que haja perda de materiais. Já em trabalhos maiores, onde se necessita de uma eficiente compactação do concreto e conseqüentemente maior resistência da face, França (2007) sugere que seja feita a aplicação por via úmida.

As telas de aço utilizadas como elementos resistentes a tração na face, podem ser feitas em uma ou duas camadas. O cobrimento destas telas que normalmente são instaladas antes da projeção do concreto tem grande importância, evitando danos de corrosão na armação.

Outra alternativa viável de revestimento é a mistura de fibras de aço ou fibras sintéticas ao concreto projetado. Apesar do custo inicial elevado, França (2007) afirma que há vantagens na redução no tempo de execução e no volume de concreto o que gera uma economia de 20% a 40% por metro quadrado do produto final.

2.6.3 Metodologia Construtiva

A execução de um projeto de contenção em estrutura grampeada é realizada conforme descreve Silva (2006) em 3 fases sucessivas:

- Escavação de bancada com altura mínima de 1 metro com comprimento dependente do tipo de solo a ser estabilizado;
- Introdução dos grampos sub-horizontais no solo paralelos entre si e com espaçamentos horizontais e verticais pré-calculados;
- Revestimento da face, com concreto projetado, reforçado com malha de aço ou com a instalação de painéis pré-moldados

Em seu estudo, França (2007) ressalta a importância de um sistema de drenagem adequado, como também a correta manutenção do mesmo. A drenagem profunda é feita por drenos sub-horizontais profundos constituídos por tubos plásticos

ranhurados. Já a drenagem superficial pode ser feita por canaletas de crista ou de pé, geralmente moldadas *in loco*. Esta etapa deve ser realizada no momento da execução do revestimento de face.

Segundo Silva (2006), é importante conhecer previamente o tipo de solo, inclinação e presença ou não de água para se determinar a altura máxima de escavação. Essa altura, segundo França (2007), limita-se entre 1 à 2 metros dependendo da resistência ao cisalhamento apresentada pelo solo. O maciço necessita permanecer estável durante todas as etapas de construção. Em casos em que não se garante a estabilidade pelo período de tempo de execução do grampeamento, se faz necessário a utilização de banquetas contínuas, que são estruturas de madeira capazes de dar suporte para o emprego do método.

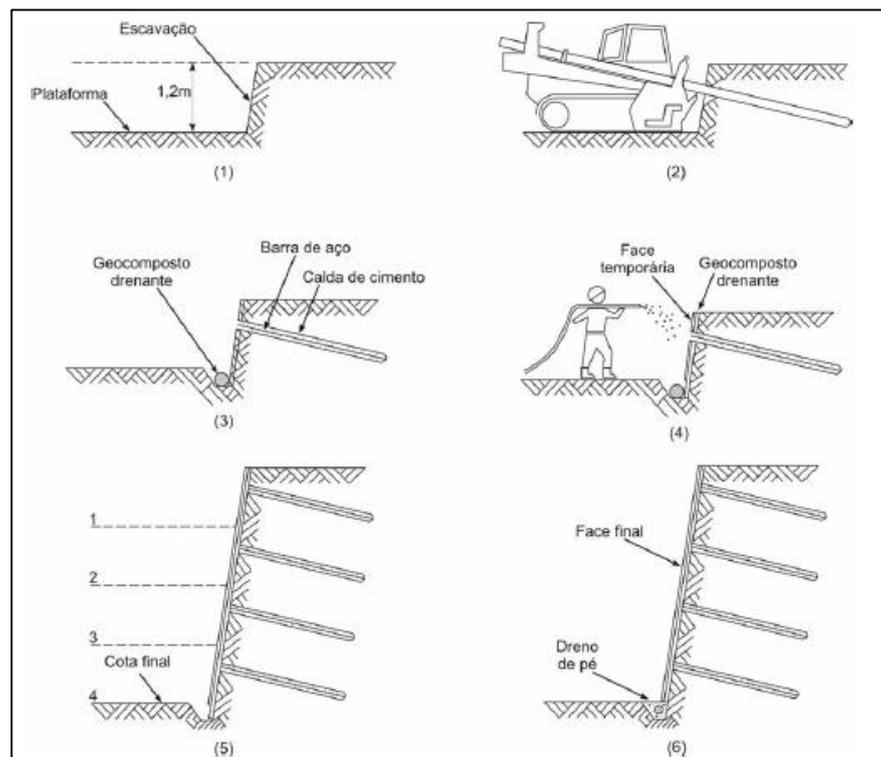


Figura 10 - Fases típicas de execução de uma obra em solo grampeado
 Fonte: Adaptado de Elias et. al. 2003 (apud Silva 2009).

Materiais de escavação com resistência ao cisalhamento abaixo de 10 kPa, não oferecem condições suficientes para uma escavação estável, afirma Conceição

(2011). A execução em taludes escavados é feita gradativamente do topo para baixo, obedecendo a etapa de cura do concreto da face. Na figura 10, têm-se a execução do método de contenção em taludes escavados.

Em encostas naturais a utilização do grampeamento é realizada para restringir possíveis movimentações ocasionadas tanto por sobrecargas como também pela infiltração de água. Segundo Franco (2010), em caso de talude já escavado e tenha uma coesão mínima capaz de garantir sua estabilidade, o processo de execução do grampeamento se dá de forma ascendente (de baixo para cima), diferentemente de taludes escavados que o processo ocorre de maneira descendente.

2.6.4 Viabilidade

Os autores, Ortigão, Zirlis e Palmeira (1993, p. 295), juntamente com Floriano (2009, p. 30), destacam que a técnica de grampeamento do solo vem sendo aperfeiçoada e disseminada constantemente. Conforme foi sendo utilizada, as vantagens de execução desta técnica passaram a ser destacadas no mercado, conforme descreve Floriano (2009):

- **Baixo custo:** Pouca mobilidade de equipamentos. São necessários apenas equipamentos para remoção de materiais, perfuração, injeção da nata de cimento e por fim para projeção de concreto;
- **Facilidade de execução:** os equipamentos descritos acima, são de fácil manuseio e encontrados facilmente no mercado nacional;
- **Velocidade de execução:** os comprimentos dos grampos são menores em solos e rochas de difícil perfuração. Não há necessidade de preparo de formas para o lançamento do concreto, nem espera de cura;
- **Acessibilidade:** por serem de pequeno porte, os equipamentos podem ser utilizados em áreas de grande densidade de trânsito e edificações;

- **Segurança:** comportamento satisfatório em regiões sísmicas devido a flexibilidade. A estrutura pode ser executada seguindo a inclinação do terreno evitando instabilidades;
- **Versatilidade:** pode ser aplicada em solos homogêneos, sendo eles granulares compactos ou argilas arenosas rijas de baixa plasticidade.

No entanto, Silva (2010) apresenta algumas das limitações deste método, as quais estão relacionadas principalmente aos deslocamentos inerentes à própria natureza da técnica. As possíveis movimentações da estrutura, podem afetar obras próximas, se for o caso da execução em meio urbano. O autor também ressalta, que a técnica não se aplica em argilas moles ou em areias puras sem coesão aparente. Outro problema iminente, é a presença de água que modifica as condições hidrostáticas do solo, aumenta as pressões no faceamento, e a longo prazo, fenômenos de fluência e aumento da umidade prejudicam significativamente o desempenho da estrutura.

2.7 Análises De Estruturas de Solo Grampeado

Uma correta análise e a elaboração de estudos voltados a estabilização de taludes, sejam eles naturais, escavados ou de aterros, se faz necessária para elaboração de um projeto seguro e economicamente viável. O conhecimento prévio resulta em uma solução adequada para implantação deste projeto.

Um das análises importantes referentes aos solos grampeados estão voltadas aos tipos de ruptura que o mesmo poderá sofrer. Conforme França (2007), a estrutura de solo grampeado possui um comportamento de um bloco monolítico, e seu processo de instabilidade pode acontecer por ruptura interna, externa ou mista. Segundo Conceição (2011), estes mecanismos de colapso variam de acordo com a posição da superfície de ruptura em relação a zona de reforço.

2.7.1 Ruptura Interna

Segundo França (2007), a ruptura interna pode ocorrer por quatro processos distintos: ruptura dos grampos, falta de aderência, erosão regressiva ou altura de escavação excessiva.

Este tipo de instabilidade ocorre quando há alguma falha no mecanismo de transferência de carga entre o solo e o reforço, seja ela, por ruptura dos reforços, por arrancamento destes da zona resistente ou durante o processo de escavação (Conceição, 2011). A tração excessiva dos grampos é um exemplo de ruptura interna (figura 11).

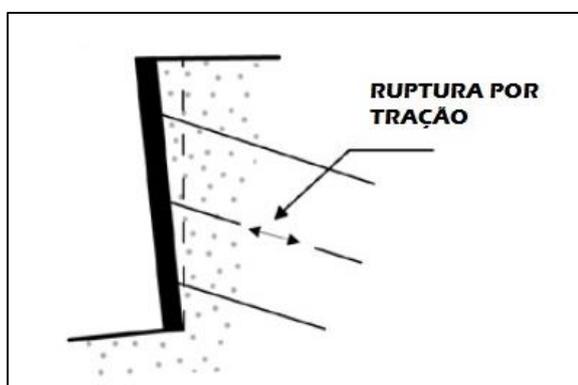


Figura 11 - Ruptura interna por esforço de tração nos grampos
Fonte: Adaptado de Lazart et al (2015 p. 115).

Na análise deste processo, é importante determinar o valor dos esforços máximos de tração, cisalhamento e flexão nos grampos. No sistema de solo grampeado, apesar do faceamento não desempenhar papel relevante, sua função consiste em garantir estabilidade do grampo com a massa de solo próxima à face. Para Silva (2010), o projeto de solo grampeado deve oferecer um embutimento mínimo do grampo à zona resistente, impedindo o seu arrancamento, assim, o valor da tração máxima ($T_{máx}$) não deverá ser superior ao valor da resistência ao arrancamento do grampo (q_s). Também, a aderência entre a calda de cimento e a barra, deverá suportar a tração mínima.

Ainda conforme Silva (2010), as rupturas no grampo serão evitadas quando os esforços solicitantes não forem superiores ao menor valor esperado conforme as

resistências determinadas em projeto. Na figura 12 estão presentes alguns dos modos de ruptura interna em solo grampeado mais comuns.

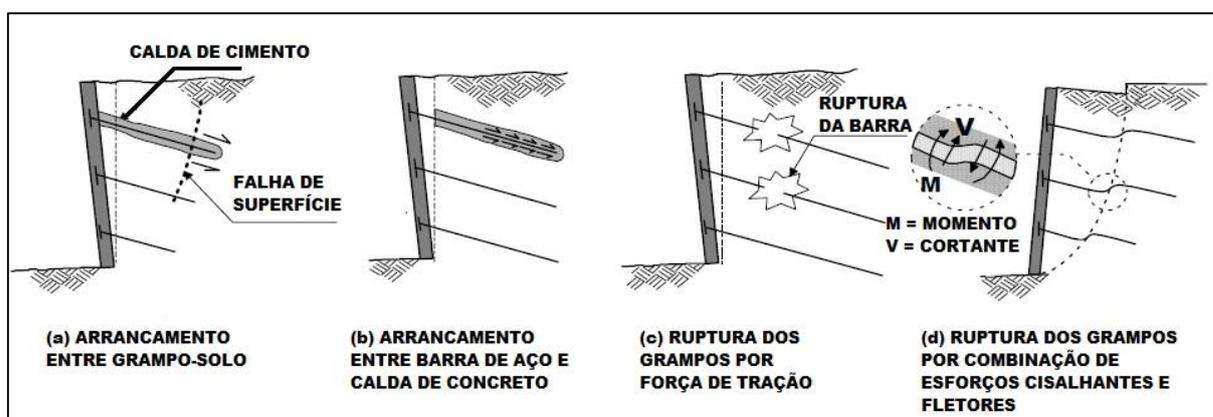


Figura 12 - Modos de ruptura interna
 Fonte: Adaptado de Lazart et al (2003 p. 67).

Entre as possíveis causas destas ocorrências, Conceição (2011) destaca a corrosão das barras de aço, sobrecargas não consideradas ou aumento no teor de umidade do terreno reforçado para a ruptura nos grampos. Já o arrancamento destes, se dá pelas perdas das características mecânicas decorrente da saturação ou aumento do teor de umidade do solo.

2.7.2 Ruptura Externa

Conforme explica Conceição (2011), o processo de ruptura externa de uma obra grampeada está relacionado ao deslizamento ao longo da superfície de ruptura, o que afeta inclusive o solo da fundação. Isso ocorre devido ao comprimento insuficiente dos reforços e à baixa capacidade do solo de fundação (figura 13 a e 13 b).

2.7.3 Ruptura Mista

Segundo França (2007), a ruptura mista é a combinação de instabilidades internas e externas da obra. Em grande parte dos casos, ocorre devido ao

comprimento dos grampos ser insuficiente e deficiências dos mesmos, podendo ser, baixo atrito, baixa resistência, dentre outras, (figura 13 c).

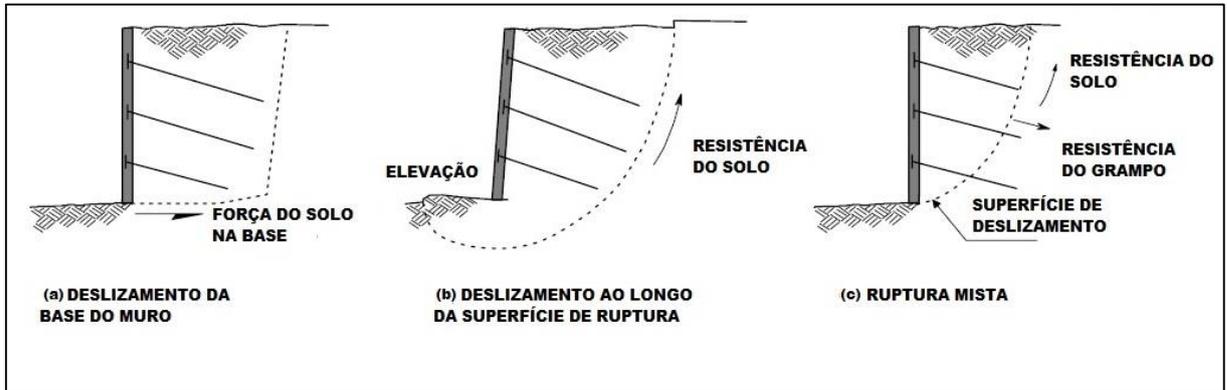


Figura 13 - Modos de ruptura externa
Fonte: Adaptado de Lazart et al (2003 p. 67).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do local de retirada das amostras

Para a realização do estudo da análise de estabilidade, foi utilizado um talude rodoviário de referência localizado na rodovia BR-277 na cidade de Curitiba - PR (figura 14). As dimensões do talude foram obtidas através de medições no local. O maciço era coberto por uma vegetação gramínea.



Figura 14 - Talude original de estudo
Fonte: Autoria própria.

No laboratório de mecânica dos solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba, Sede Ecoville, as amostras indeformadas foram devidamente acomodadas e preparadas para a realização dos ensaios.

Com o auxílio de materiais de medição foi possível determinar de maneira aproximada as dimensões deste talude e posteriormente especificar seu ângulo interno. Através do programa *AutoCad* foi elaborado um croqui do perfil do talude em estudo, conforme figura 15.

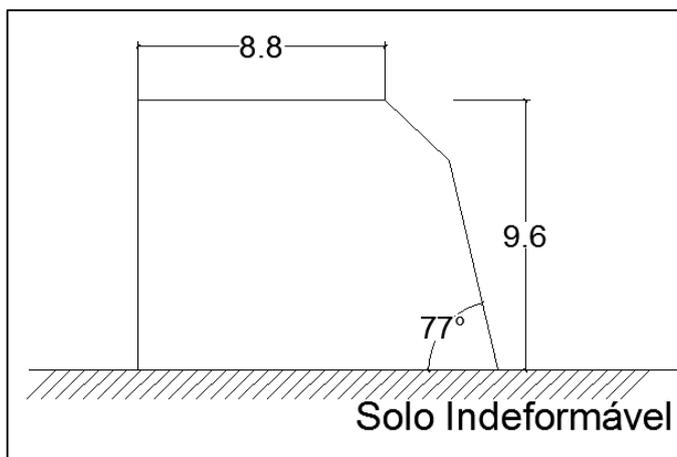


Figura 15 - Perfil do talude de estudo
Fonte: Autoria própria.

3.2 Ensaios Realizados

3.2.1 Ensaio de cisalhamento direto

Este ensaio foi realizado seguindo as orientações descritas na norma americana ASTM D3080 (2004), e tem como objetivo determinar os parâmetros de resistência do solo estudado a partir da obtenção de coordenadas da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb. Conforme descreve Pinto (2006, p.265), o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para se determinar a resistência ao cisalhamento do solo.

Em síntese, o ensaio consiste no confinamento do corpo-de-prova em uma caixa metálica de seção quadrada partida horizontalmente ao meio, denominada caixa de cisalhamento. Por meio de uma placa de carregamento, é aplicada uma força vertical sobre a amostra. Já a aplicação da força cisalhante movimenta uma das partes da caixa onde a amostra está confinada. Um extensômetro horizontal é capaz de medir a taxa constante de deslocamento cisalhante.

Em campo, foram retiradas seis amostras indeformadas de solo conforme descreve a Norma técnica NBR 9.604/86 - Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. O processo de retirada das amostras foi realizado concomitantemente ao processo de corte do talude, o que favoreceu a coleta de amostras. Como descreve a norma, o processo

de coleta se deu inicialmente com a escavação lateral à amostra e em seguida com o auxílio de um martelo de borracha e demais instrumentos houve a penetração do anel metálico. Por fim, após o corte do solo o bloco foi envolvido por um saco plástico para evitar a perda de umidade, dar alguma resistência mecânica e preservar características naturais do material coletado. Como o ensaio foi realizado logo após a coleta das amostras, não foi necessário envolvê-las com parafina.

A moldagem dos corpos-de-prova foi feita em laboratório conforme as dimensões do anel de cisalhamento, 10cm x 10cm x 2,5 cm (figuras 16 a e 16 b).



Figura 16 a - Bloco de solo coletado
Fonte: Autoria própria.



Figura 16 b - Anel metálico amostrador
Fonte: Autoria própria.

Na realização do ensaio, para garantir a drenagem dos corpos-de-prova, são colocadas placas porosas na face superior e inferior. Com o auxílio da prensa de cisalhamento (figura 17), os corpos de prova sofrem um processo de saturação e passaram pela fase de adensamento, que antecede o ensaio de cisalhamento direto. Posteriormente as amostras são cisalhadas seguindo as orientações da norma americana ASTM D3080 (2004). Durante todo o procedimento o auxílio do computador foi indispensável, para a obtenção de dados que possibilitaram a realização deste ensaio. Ao todo foram feitos 3 ensaios de cisalhamento direto.

Os ensaios foram realizados com tensões normais de 50KPa, 100KPa e 200Kpa. Forças verticais distintas aplicadas aos corpos-de-prova são importante para determinar a envoltória de resistência. Os valores das tensões de cisalhamento na ruptura são plotados em relação à tensão normal de cada ensaio.

O deslocamento vertical também é registrado nesse ensaio, durante a fase de adensamento. A variação vertical da amostra é obtida com a leitura de extensômetro

verticais que verificam a movimentação da placa de carregamento superior. Através dessa leitura é possível avaliar alteração de volume do corpo de prova.

Os principais parâmetros obtidos nesse ensaio foram:

- Ângulo de atrito;
- Coesão do solo.



Figura 17 - Equipamento de ensaio
Fonte: Autoria própria

3.2.2 Ensaio de Teor de Umidade

O ensaio do teor de umidade consiste na relação da massa de água presente em volume de solo (m_w) e a massa das partículas sólidas (m_s). Tal relação é expressa pela equação 18.

$$U = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (18)$$

Como as amostras passaram por um processo de saturação durante a fase de adensamento, este ensaio verificou a alteração do teor de umidade antes e após esse procedimento.

Os resultados do ensaio de umidade são apresentados na tabela 1.

Na realização do ensaio, é necessário a utilização de uma balança de precisão e uma estufa. O material é pesado antes e após o processo de secagem em estufa e em seguida aplica-se a equação 18.

Tabela 1 - Teor de umidade antes e após ensaio de cisalhamento

Ensaio de Cisalhamento	Média teor de umidade - Antes	Média teor de umidade - Depois
1	50%	56%
2	66%	76%
3	74%	77%

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Ensaio de granulometria

O ensaio de granulometria tem com finalidade determinar o percentual da massa em uma determinada faixa de partícula de solo em relação a massa da amostra. Com os resultados deste ensaio é possível construir uma curva granulométrica e posteriormente realizar a classificação do solo em análise.

Este ensaio foi realizado com o peneiramento do solo nas seguintes peneiras: 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8; 2; 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075mm.

Na realização deste ensaio, conforme prescreve a norma técnica NBR 7181/1984 – Solo análise granulométrica, a amostra de solo utilizada foi seca em estufa pelo período mínimo de 24 horas. Em seguida se inicia o processo de peneiramento com a pesagem do material retido em cada peneira. Com base nos valores obtidos no material retido em cada peneira, foi elaborada a curva granulométrica deste solo ensaiado conforme a figura 18.

Com a construção da curva granulométrica da amostra de solo é possível a classificar do solo segundo critérios do sistema unificado de classificação do solo

(USCS). Segundo Santos (2006), esse método de classificação foi proposto para a utilização na construção de aeroportos na década de 40 por Arthur Casagrande. Os solos são reunidos em grupos compostos por duas letras, a primeira delas relacionada ao tipo de solo e a segunda a plasticidade.

Com a aplicação do método de classificação de solos USCS, pode-se considerar que o solo é uma areia limpa mal graduada com menos de 5% de finos. Como não foram realizados os ensaios de plasticidade e de sedimentação, julga-se que o solo pertença ao grupo SW. Conforme Santos (2006), esses tipos de solo podem ser constituídos por areias uniformes ou misturas não uniformes de materiais muito grosseiro e areia muito fina com vazios de tamanho intermediário.

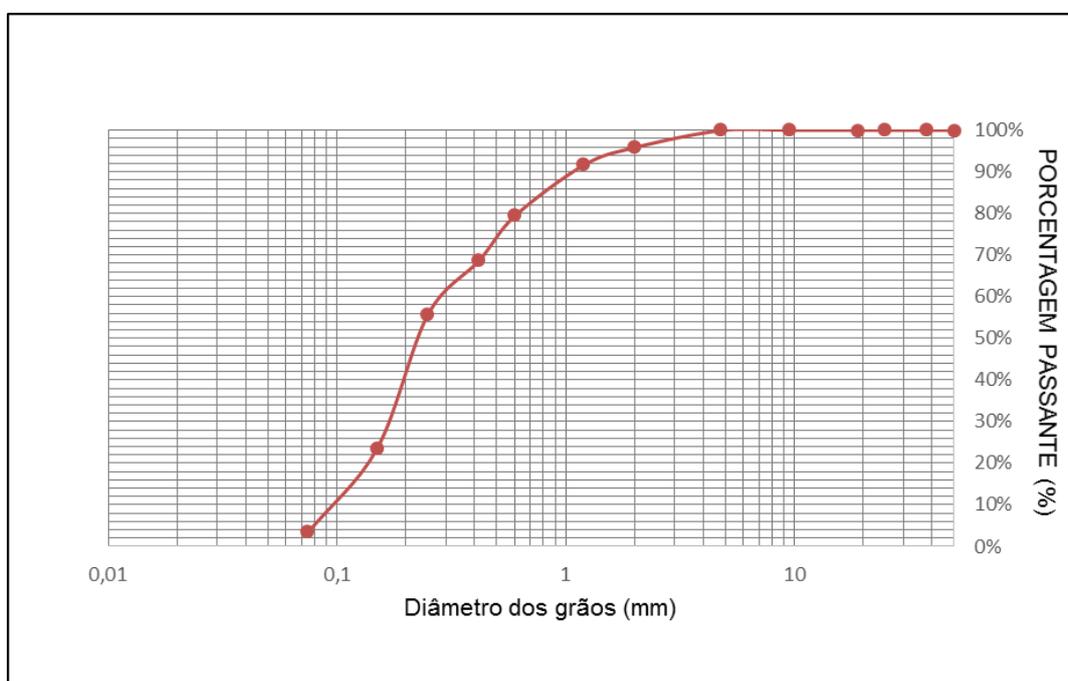


Figura 18 - Curva granulométrica do solo
Fonte: Autoria própria

3.3 Análise Estabilidade

Para a análise de estabilidade do talude estudado foi utilizado o *software GeoStudio 2012*, módulo *Slope* (declive). Este programa computacional utiliza o método do equilíbrio limite para resolver problemas de estabilidade de taludes determinando através de análises determinísticas o fator de segurança médio.

Com a utilização desse programa é possível valer-se de métodos de análises como a de Spencer, Fellenius, Bishop simplificado, Janbu, dentre outros.

Inicialmente foram definidos os métodos de análise e os parâmetros geotécnicos do solo sem a aplicação do grampeamento. Cabe ressaltar, que na elaboração deste trabalho os métodos utilizados na análise de estabilidade foram os de Spencer e Bishop simplificado.

Na a realização da análise de estabilidade desse trabalho, a poropressão foi considerada nula, uma vez que não foram observados afloramentos de água no talude. Além disso, a verificação do nível de água demanda a realização de ensaios em obra, o que se tornou inviável pela falta de equipamentos e a presença constante de máquinas no local. No entanto, é importante ressaltar que o estudo da presença de água é relevante quando se trata de uma análise de estabilidade de taludes, e ainda indispensável para definir o tipo de contenção a ser utilizada. Conforme descreve Floriano (2009), o sistema de contenção de grampeado não permite a execução em solos com nível de água aparente. Em casos onde existe a presença de água é necessário o rebaixamento do lençol freático.

Como resultado da análise, o *software* forneceu dados de possíveis superfícies de ruptura, linhas de contorno e o fator de segurança mínimo referente ao problema apresentado. Por ser um programa iterativo, o fator de segurança crítico ocorre na superfície de ruptura representado pela cor vermelha.

A modelagem com a utilização do *GeoStudio 2012* foi realizada inicialmente nas dimensões do talude original. Em seguida, a análise foi feita com diferentes geometrias do maciço de solo, incluindo a aplicação do grampeamento na estabilização do mesmo. A escolha dessas geometrias é foi feita na hipótese de alargamento de pista ou para os casos de construção de uma via marginal, onde nesse caso seria necessário um talude vertical com inclinação de 90°.

3.2.1 Fator de segurança

Definido conforme a norma NBR 11682 (2006) como a relação entre os esforços resistentes e os esforços solicitantes, o fator de segurança em taludes é o

resultado obtido na análise de estabilidade, que define a condição de equilíbrio do maciço.

A resistência ao cisalhamento influencia diretamente no fator de segurança do talude. Assim, valores elevados do FS definem maior segurança contra a ruptura. Sabe-se que a variabilidade dos materiais que compõem os taludes é um dos motivos capazes de reduzir de forma significativa a segurança, contribuindo para a ocorrência de possíveis rupturas.

Os fatores de segurança considerados pela NBR 11682 - Estabilidade de Encostas (tabela 2), contemplam possíveis incertezas naturais em diversas etapas de construção, classificando FS como alto, médio ou baixo. O fator de segurança mínimo adotado deve obedecer alguns critérios que impeçam danos materiais, ambientais e contra a vida humana.

Tabela 2 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

FS – danos materiais e ambientais	FS – danos à vida humana		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: Adaptado da NBR 11682 (2006, p. 13).

Um alto grau de segurança é exigido principalmente em obra nas imediações de edificações habitacionais, industriais, pontes, viadutos, linhas de transmissão de energia, obras hidráulicas, estações de tratamento de água e esgoto, dentro do perímetro urbano, vias públicas, dentre outras.

3.3.2 Propriedades do grampo

Como o solo grampeado é constituído pela aplicação de grampos de aço na face do talude, foram utilizadas algumas características importantes na modelagem desse sistema de contenção, conforme descreve a tabela 1.

Tabela 3 – Parâmetros mecânicos das barras de aço.

Categoria	Tensão de escoamento mínima, f_{yk} (kN/cm ²)	Tensão de deformação de 0,2% σ_{sd} (kN/cm ²)	Tensão de cálculo f_{yd} (kN/cm ²)	Módulo de elasticidade E_s (kNcm ²)
CA 50 A	50	42	44	21.000

Fonte: Silva, 2010

Conforme descreve França (2007), a resistência ao arrancamento, também denominada resistência ao cisalhamento (q_s), é definida através do ensaio de arrancamento do grampo, parâmetro fundamental para a execução de projetos de solos grampeados. O tipo de solo, rugosidade, diâmetro do furo, são alguns dos fatores que interferem diretamente na resistência ao cisalhamento. Lima (2009), cita que este parâmetro de resistência também pode ser determinado por correlações empíricas, no entanto, a determinação da resistência ao cisalhamento pelo ensaio de arrancamento é mais adequada, conforme figura 19.

Na realização deste ensaio é possível obter a força de arrancamento máxima (F_{arr}). Já o valor de resistência ao arrancamento, é obtido por meio da equação 19 descrita por Lima (2009).

$$q_s = \frac{F_{arr}}{\pi DL} \quad (19)$$

Onde:

D diâmetro da barra

L comprimento injetado ou ancorado da barra

Através da relação empírica proposta por Ortigão (1997 apud LIMA 2009, p.24), baseadas em ensaios realizados na cidade do Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília, com grampos inseridos sem pressão e com diâmetros de 75mm e 150mm, obtém-se a equação 20, a qual foi utilizada para a realização desta análise.

$$q_s = 50 + 7,5 N \quad (20)$$

Onde:
N número SPT da camada

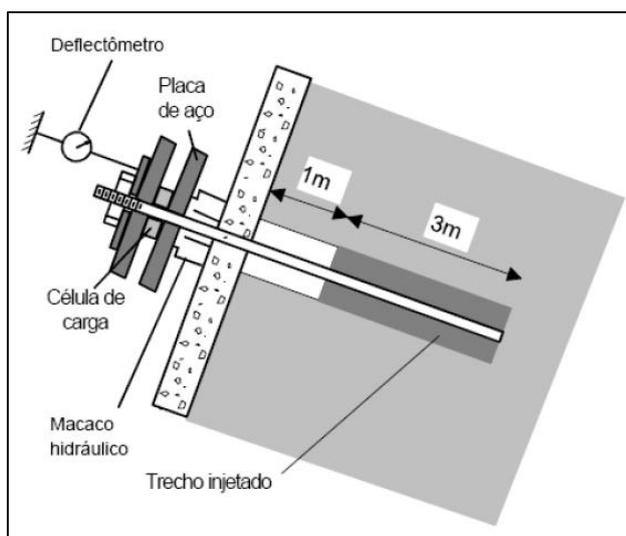


Figura 19 - Esquema de ensaio de arrancamento em solo grampeado
Fonte: Lima (2009, p. 21)

Segundo Kormann (2002), o tipo de solo específico da região de Curitiba possui consistência elevada, com número de golpes SPT entre 15 – 30. Assim, considerando a margem inferior de SPT igual a 15, obtém-se uma resistência ao cisalhamento mínima que é utilizada na construção do modelo de estabilidade juntamente com os demais parâmetros do solo. Com isso obtém-se um q_s com valor igual a 162,50 kPa.

Na tabela 2 são apresentados os parâmetros utilizados na modelagem do solo grampeado no programa *GeoStudio 2012*. Estes dados foram baseados em pesquisas realizadas na área de grampeamento do solo.

Tabela 2 – Dados de projeto dos grampos

Comprimento do grampo	5 - 8 m
Inclinação do grampo	15°
Diâmetro do grampo	20mm
q_s	162,5 kN
Q ruptura	440 kN
Espaçamento vertical	2
Espaçamento horizontal	2

Fonte: Autoria própria

4. RESULTADOS

4.1 Parâmetros geotécnicos

Durante a fase de adensamento da amostra, que antecede o ensaio de cisalhamento direto drenado, pode-se verificar que a variação de volume do corpo de prova está relacionada a aplicação da força vertical, conforme gráfico 1.

A aplicação da tensão normal de 200 kPa ocasionou uma variação vertical aproximada de 16% quando comparado a altura inicial da amostra. Essa variação vertical está diretamente relacionada a dissipação do excesso da poropressão nos vazios do solo. Em solos arenosos, onde a condutividade hidráulica é alta, o excesso de poropressão é dissipado rapidamente. Em solos argilosos, é notável o transcorrer de certo tempo para se obter a dissipação do excesso de poropressão.

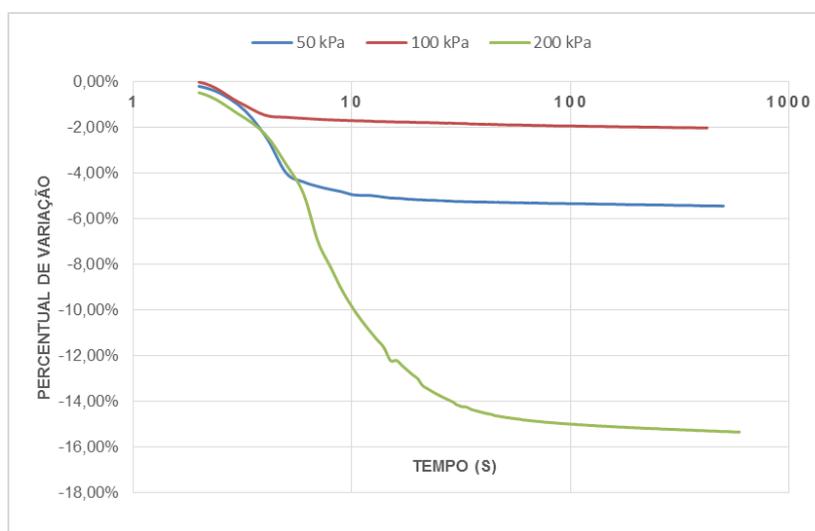


Gráfico 1 - Variação vertical das amostras de solo em ensaio de adensamento
Fonte: Autoria própria.

Com a execução do ensaio de cisalhamento direto foi possível determinar os parâmetros geotécnicos do solo em análise. No gráfico 2 é observa-se o deslocamento horizontal da amostra com a aplicação da tensão cisalhante.

A aplicação da força de cisalhamento provoca o deslocamento do solo até a sua ruptura. Conforme o gráfico 2, a amostra cuja a tensão normal fora de 200 kPa, apresenta uma resistência ao cisalhamento de pico, que é o máximo valor de tensão cisalhante atingida, ou seja, a tensão de ruptura. Segundo Das (2011), após alcançar a tensão de ruptura, a resistência ao cisalhamento descrese gradualmente enquanto o deslocamento horizontal aumenta, até que finalmente alcance um valor constante denominado de resistência última ao cisalhamento.

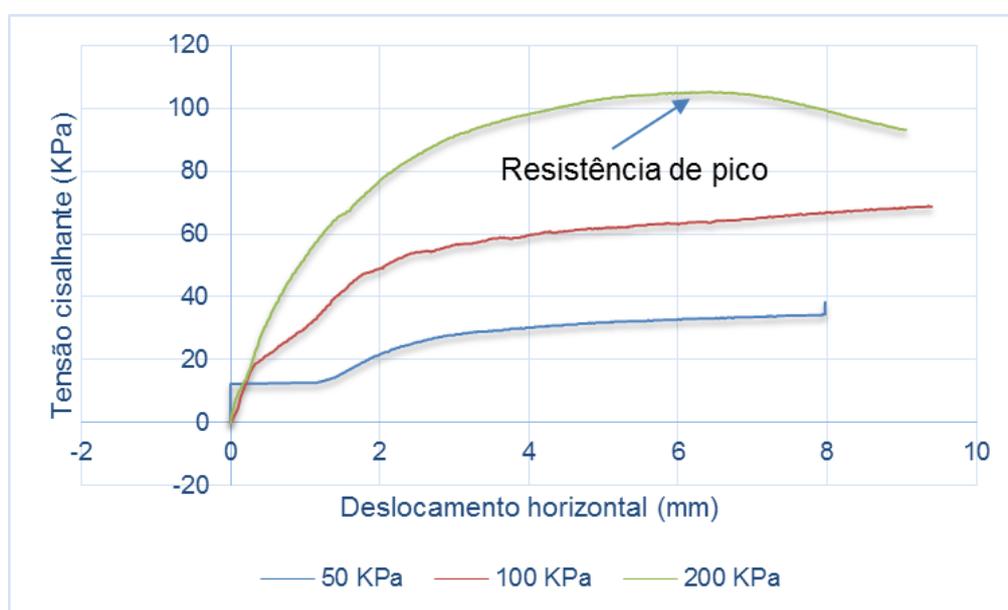


Gráfico 2 - Curva de deslocamento horizontal x tensão cisalhante
Fonte: Autoria própria.

Com os dados do ensaio de cisalhamento direto, a envoltória de ruptura do solo é elaborada com as tensões normais no eixo das abscissas e as tensões cisalhantes no eixo das ordenadas. Cada valor de tensão normal corresponde a um valor de cisalhante, conforme o gráfico 3. A partir deste gráfico e com o auxílio de recursos computacionais, é possível escrever a função linear descrita conforme o critério de Morh-Coulomb. Esta reta é denominada envoltória de ruptura.

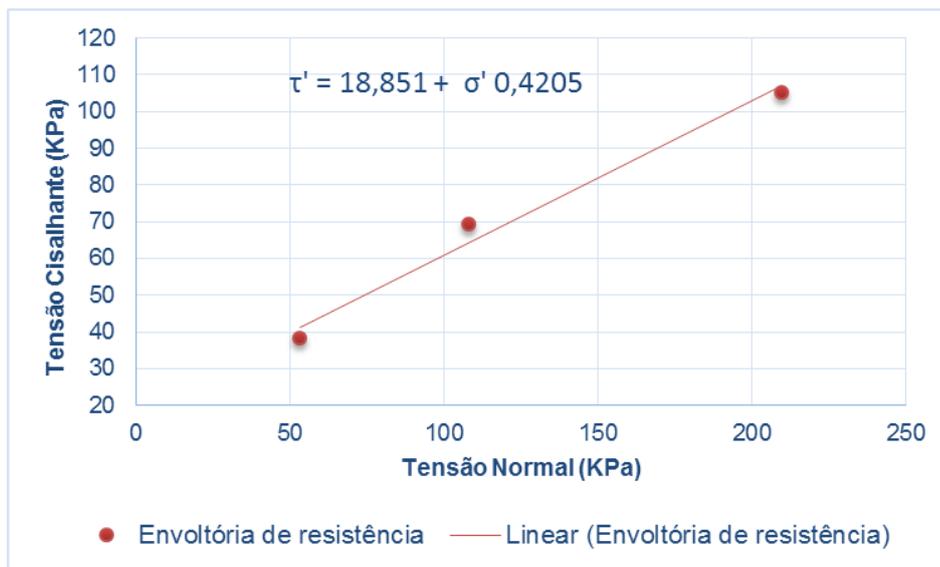


Gráfico 3 - Envoltória de ruptura do solo
Fonte: Autoria própria.

Segundo o critério de Mohr, os denominados parâmetros tangentes, conhecidos como coesão e o ângulo de atrito, são obtidos a partir desta função linear (envoltória de ruptura) e considerados válidos apenas para um valor limitado de tensões.

O valor da coesão é adquirido quando a tensão normal é considerada nula, ou seja, quando o $\sigma' = 0$. Já a determinação do ângulo de atrito é a inclinação da envoltória.

No caso em estudo, temos:

- Coesão = 18,851
- Ângulo de atrito = 22,81°

4.2 Análise de estabilidade do talude

A modelagem no talude no programa GeoStudio 2012 ocorreu com a utilização dos parâmetros geotécnicos definidos anteriormente. A figura 24 obtida no *software* apresenta o talude em seu estado original conforme as dimensões aproximadas feitas no local.

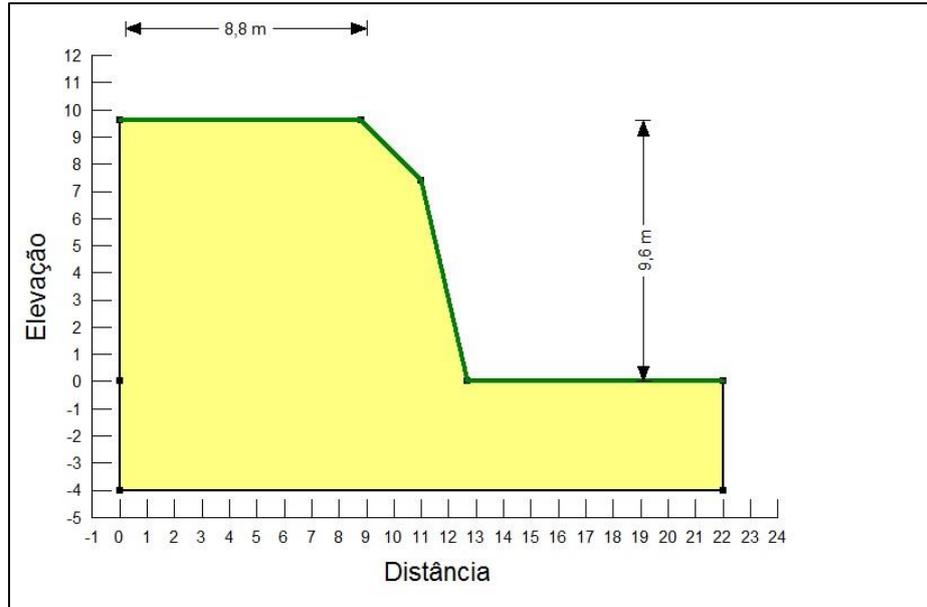


Figura 20 - Modelo do talude de estudo (GeoStudio)
 Fonte: Autoria própria.

Através dos métodos de análise de Bishop e Spencer, o resultado da estabilidade do talude apresentado nas figuras 21 e 22 apontam um fator de segurança igual a 0,924 e 0,989 respectivamente, o que segundo a NBR 11682 (2006), está abaixo do indicado caracterizando um estado instável.

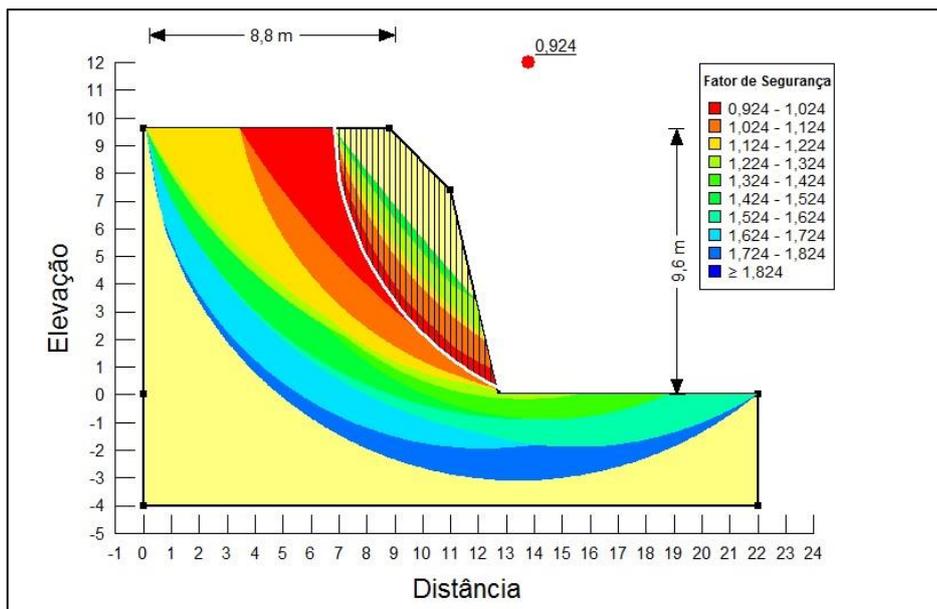


Figura 21 - Análise talude original (Bishop)
 Fonte: Autoria própria.

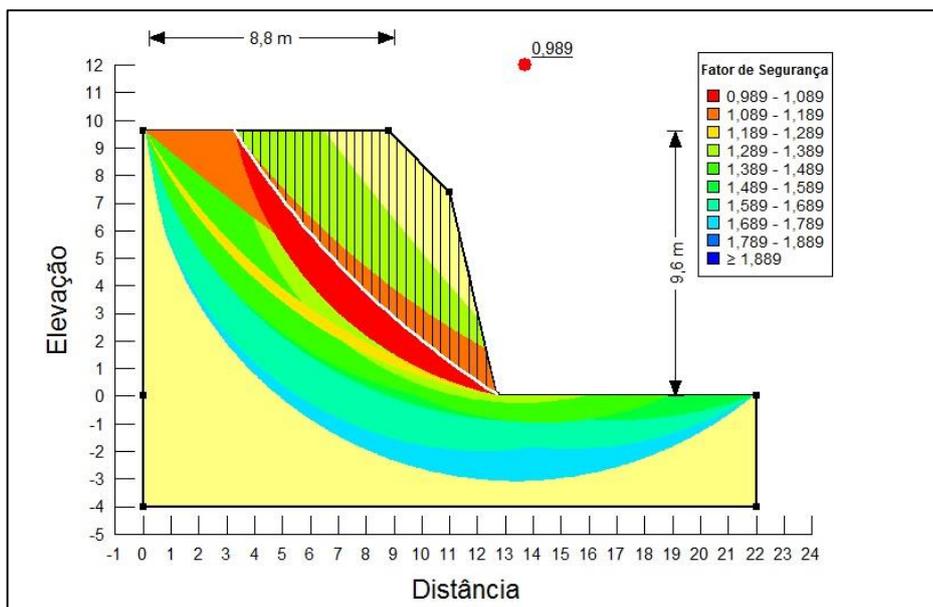


Figura 22 - Análise talude natural (Spencer)
Fonte: Autoria própria.

É possível observar nas figuras 21 e 22, as possíveis cunhas de ruptura. A linha em branco define a superfície de ruptura com o menor valor para o fator de segurança que na região em vermelho varia entre 0,924 a 1,024 na análise feita pelo método de Bishop e 0,989 a 1,089 pelo método de Spencer.

A variação de cores define a mudança do fator de segurança para as várias superfícies de ruptura possíveis. A legenda inserida na imagem apresenta uma possível variação do fator de segurança onde o tom azul apresenta um maior valor de FS e o tom vermelho, os menores valores de FS.

4.3 Análise de estabilidade com variação geométrica do talude

A variação geométrica do talude possibilita a análise da mudança do fator de segurança conforme o corte é realizado. Ao todo foram realizados 3 tipos de cortes modificando a geometria do maciço de solo. As geometrias adotadas na análise incluem casos críticos com taludes verticais, o que exemplifica a execução de alargamentos de pistas e construção de vias marginais quando por vezes não há

possibilidade de execução de outros cortes no maciço, pela falta de espaço ou até mesmo adotando exigências de projeto. Para cada caso, a análise foi feita segundo os métodos de Bishop e Spencer, a fim de criar um critério de comparação entre os mesmos.

4.3.1 Primeira variação geométrica do talude (V1)

Na figura 23, tem-se a primeira variação do talude do talude, denominada variação V1.

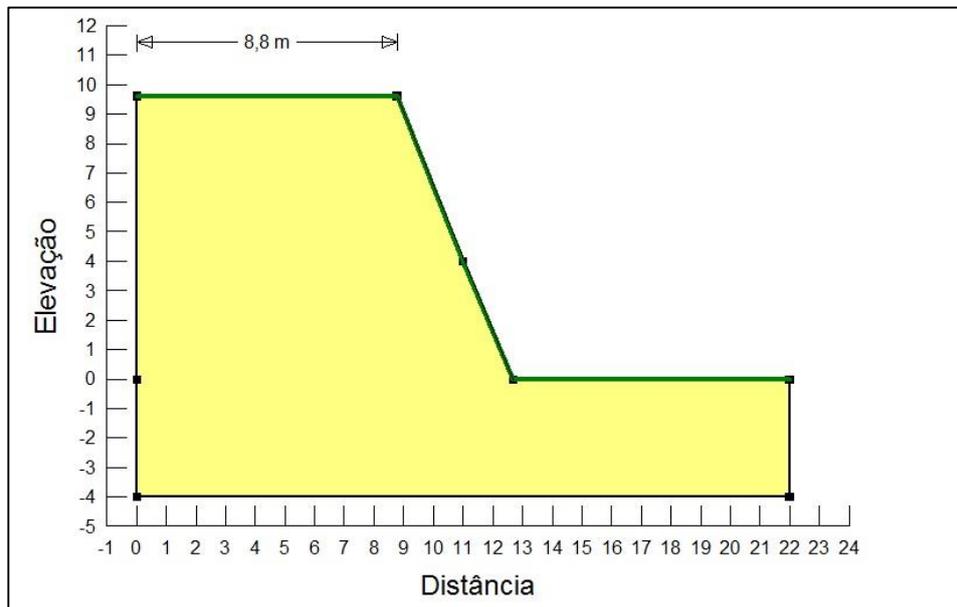


Figura 23 - Variação V1 do talude
Fonte: Autoria própria.

As análises de estabilidade segundo os métodos citados anteriormente apresentam valores de fator de segurança (FS) abaixo de 1,5 o que configura o talude como instável. No método de Bishop e Spencer, o fator de segurança teve resultados iguais a 1,025 e 1,112 respectivamente, conforme figuras 24 e 25.

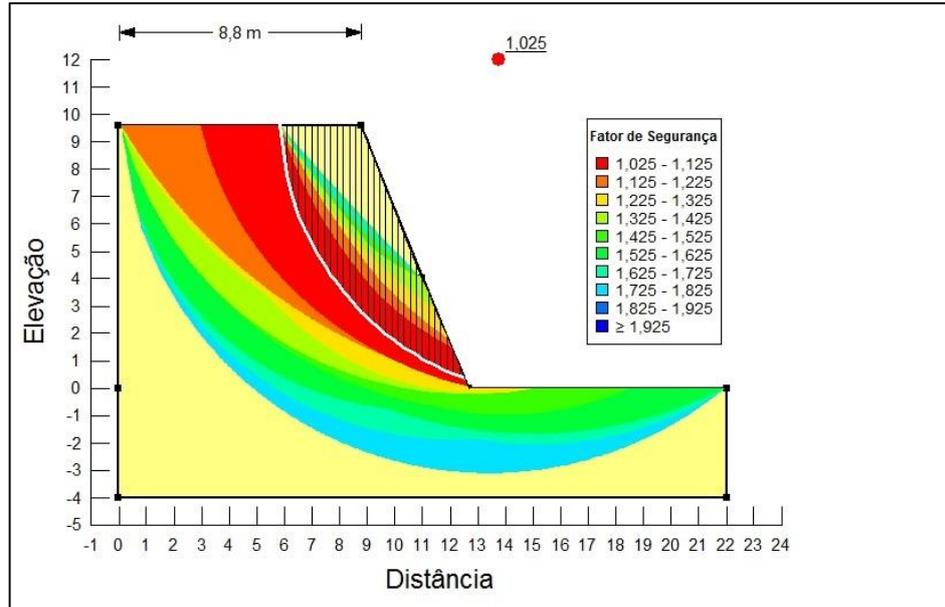


Figura 24 - Análise talude variação V1 (Bishop)
Fonte: Autoria própria.

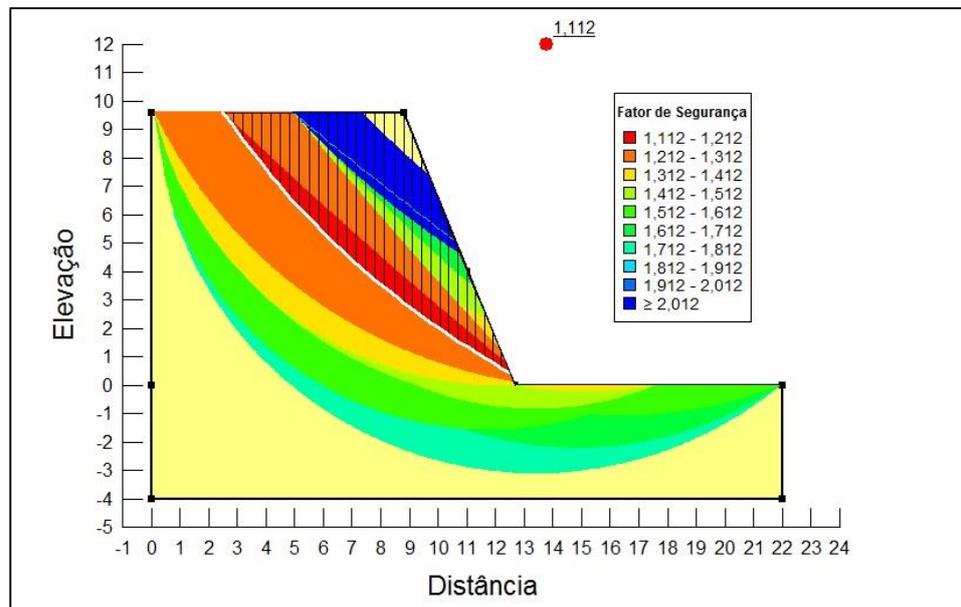


Figura 25 - Análise talude variação V1 (Spencer)
Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Segunda variação geométrica do talude (V2)

Na figura 26, tem-se a segunda variação do talude denominada variação V2.

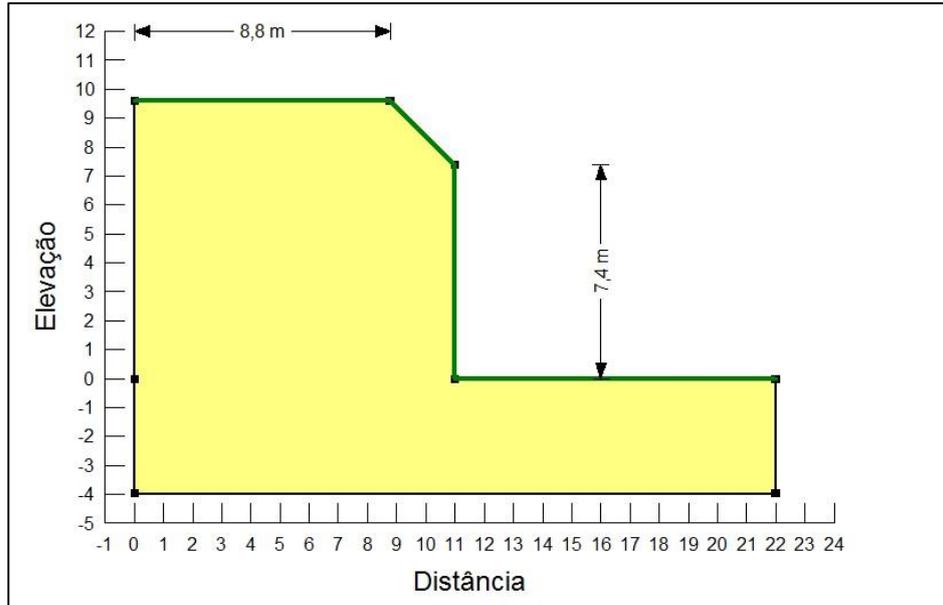


Figura 26 - Variação V2 do talude
Fonte: Autoria própria.

Conforme análise de estabilidade realizada nesta geometria, seguindo os mesmos padrões anteriores, a avaliação do equilíbrio do talude apresentou valores inferiores ao fator de segurança mínimo, caracterizando o maciço como instável. Os fatores de segurança segundo os métodos estudados foram 0,822 e 0,875 respectivamente para Bishop e Spencer (figuras 27 e 28).

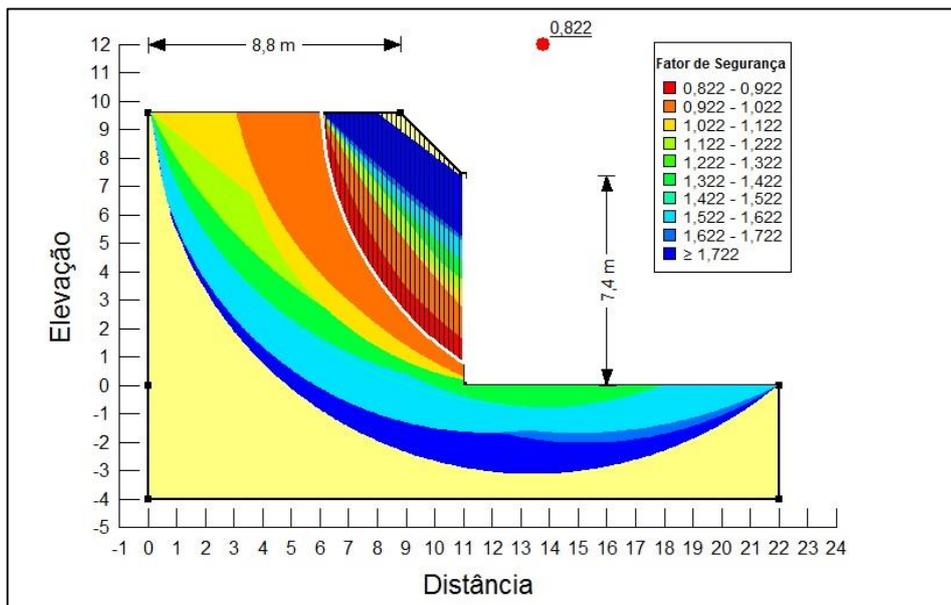


Figura 27 - Análise talude Variação V2 (Bishop)
Fonte: Autoria própria.

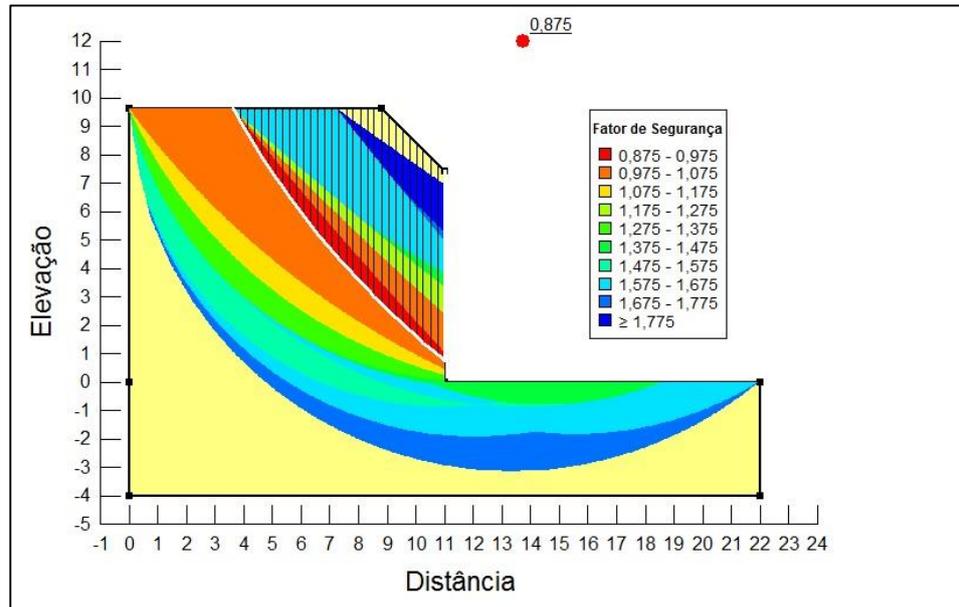


Figura 28 - Análise talude Variação V2 (Spencer)
 Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Terceira variação geométrica do talude (V3)

Por fim, a última variação geométrica (figura 29) é denominada variação V3. Este tipo de corte é muito comum em obras de estacionamento subterrâneos, dentre outros casos.

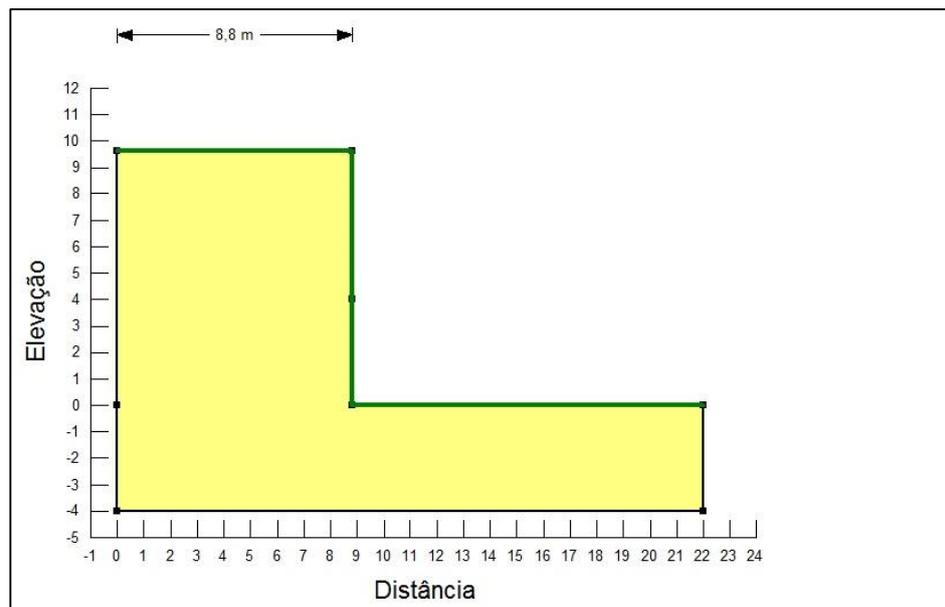


Figura 39 - Variação V3 do talude
 Fonte: Autoria própria.

Seguindo os mesmos critérios anteriores, as análises realizadas nesta geometria apresentaram FS inferior ao valor de 1,5. Para os métodos de Bishop e Spencer, o fator de segurança foi calculado em 0,770 e 0,783 respectivamente, conforme as figuras 30 e 31.

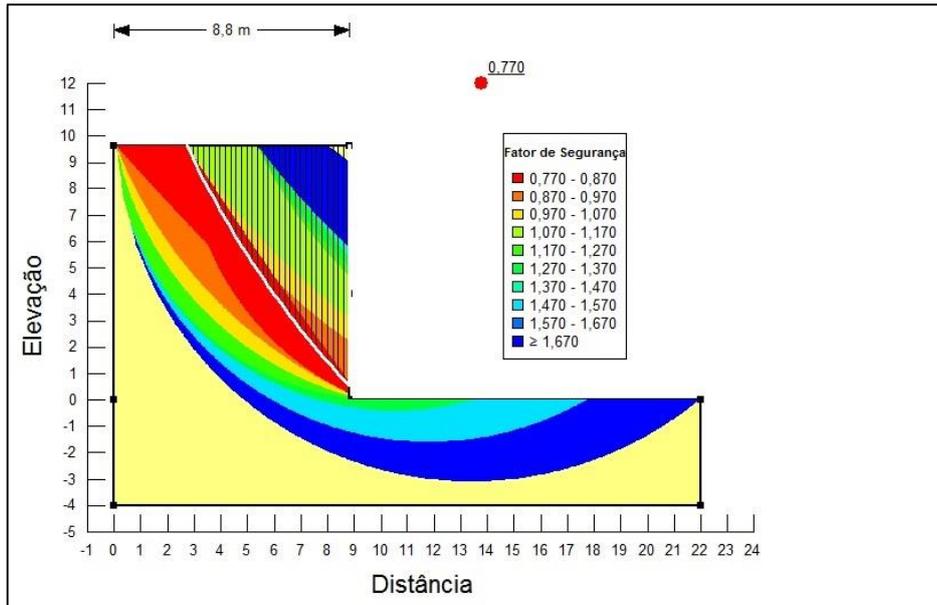


Figura 30 - Análise talude variação V3 (Bishop)
 Fonte: Autoria própria.

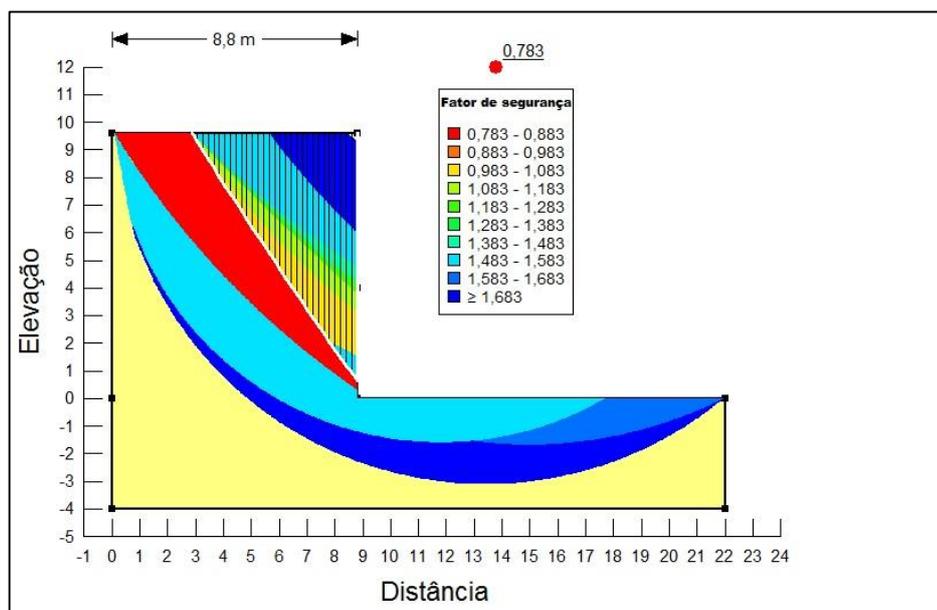


Figura 31 - Análise talude variação V3 (Bishop)
 Fonte: Autoria própria.

A critério de comparação, os fatores de segurança obtidos nas análises são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Fator de segurança de estabilidade

Modelo	Bishop	Spencer
Talude Original	0,924	0,989
Talude Geometria V1	1,025	1,112
Talude Geometria V2	0,822	0,875
Talude Geometria V3	0,770	0,783

Fonte: Aatoria própria.

Através dessa análise, é possível observar a necessidade de um método de contenção para garantir a estabilidade do talude. De acordo com a norma técnica apresentada e considerando um alto grau de segurança ao local da obra na prevenção de danos humanos e materiais o fator de segurança adotado será igual a 1,5, sendo assim, todas as análises que apresentaram FS inferiores são considerados instáveis.

É possível observar que a variação geométrica do talude está diretamente relacionada as mudanças do fator de segurança do maciço conforme observado nos resultados das análises anteriores.

A proximidade dos valores para o FS obtidos tanto na análise feita pelo método de Bishop quanto pelo método de Spencer está relacionada ao critério de subdivisão da massa instável em fatias. No entanto, esses dois métodos diferem na definição de suas hipóteses de simplificação, uma vez que o método de Spencer atende a todos as condições de equilíbrio das fatias e o de Bishop despreza as forças tangenciais (CONCEIÇÃO, 2011).

4.4 Análise de estabilidade com aplicação do solo grampeado

A aplicação do grampeamento do solo visa impor ao maciço condições de estabilidade. Os grampos foram dimensionados conforme descrito anteriormente e as análises de sua aplicação ocorreram através do *software* GeoStudio 2012 no talude original e suas demais variações.

4.4.1 Aplicação do grampeamento no talude original

A aplicação do grampeamento no talude original se deu com a inserção de 4 grampos com espaçamentos verticais e horizontais de 2 m, conforme figura 32.

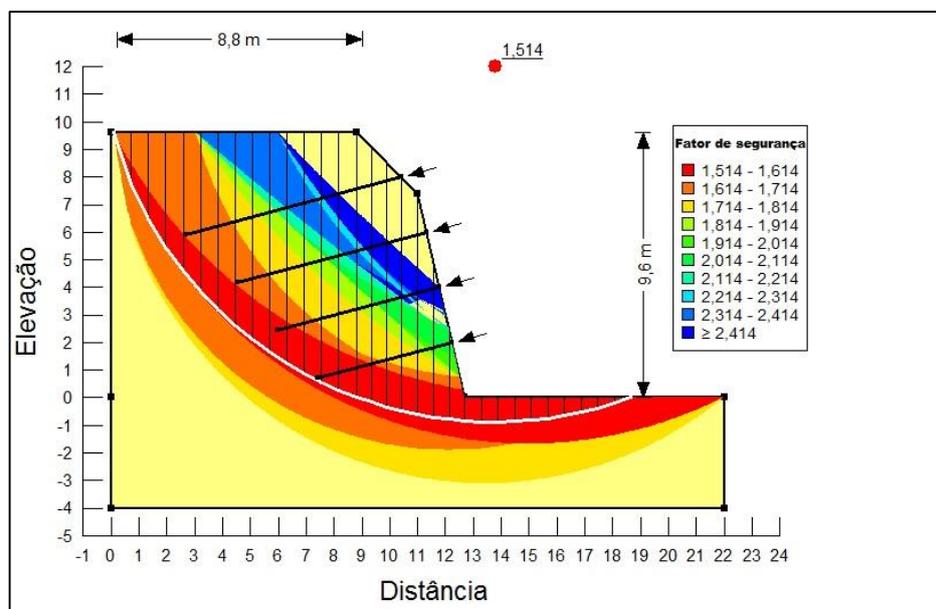


Figura 32 - Talude original com aplicação do grampeamento

Fonte: Autoria própria.

Na figura 32 o fator de segurança apresentado com a inserção dos grampos é de 1,514, o que segundo a NBR 11682 (2006), classifica o talude como estável pois atende o limite mínimo do critério de estabilidade.

Na hipótese de um talude instável sob os critérios de estabilidade adotados ($FS < 1,5$), o maciço estaria suscetível a uma ruptura externa, uma vez que a

superfície de ruptura destacada na figura 32 não atinge os grampos do sistema de contenção, conforme definição abordada no item 2.6.2 deste trabalho.

4.4.1 Primeira variação geométrica com aplicação do grampeamento (V1)

A primeira variação geométrica do talude é apresentada com a aplicação do método de contenção (figura 33). Em análise anterior, essa geometria foi considerada instável em virtude do valor do fator de segurança obtido.

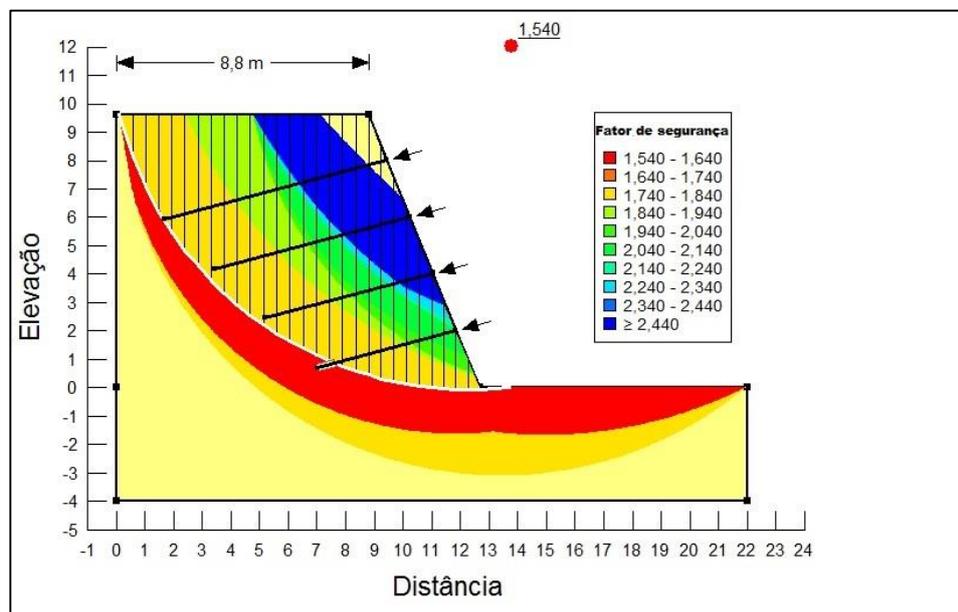


Figura 33 - Talude variação V1 com aplicação do grampeamento
Fonte: Autoria própria.

Desta vez, a análise de estabilidade apresentou um fator de segurança igual a 1,540. O fato da curva de ruptura atingir o grampo instalado na cota 2 desse talude caracteriza uma possível ruptura mista. No entanto, segundo os critérios da NBR 11682 (2006), como o fator de segurança está acima de 1,5 pode-se afirmar que o talude atende ao critério de estabilidade.

4.4.1 Segunda variação geométrica com aplicação do grampeamento (V2)

A análise de estabilidade nessa geometria expôs um fator de segurança de 1,321. A aplicação dos grampos apresentou melhora na estabilidade do talude. No entanto, não se pode garantir que o maciço está estável conforme o critério adotado.

A superfície de ruptura é classificada como mista podendo ocorrer possíveis deslizamentos. Os grampos utilizados seguiram as especificações da tabela 4 e não foram suficientes para assegurar a estabilidade do maciço nessa condição de inclinação.

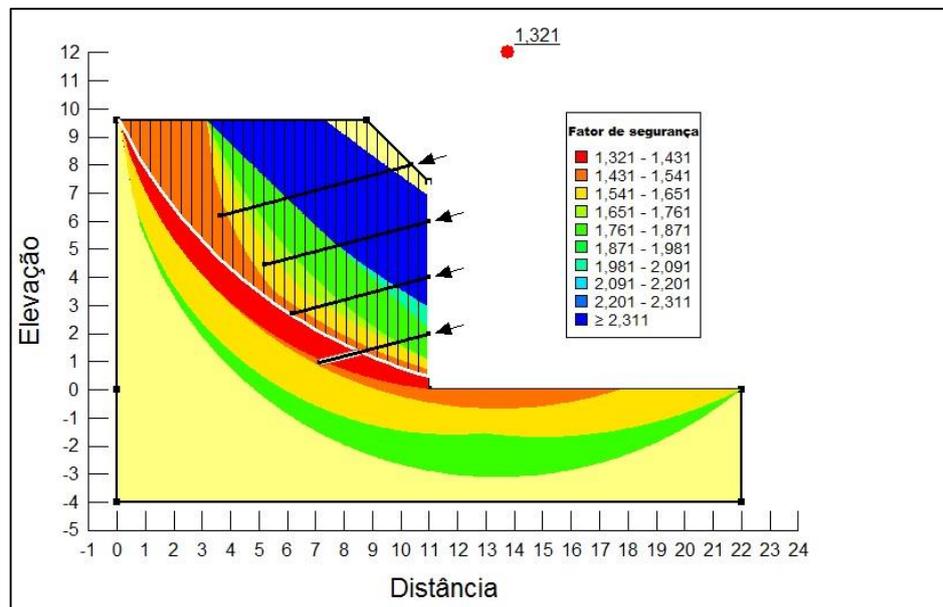


Figura 34 - Talude variação V2 com aplicação do grampeamento
Fonte: Autoria própria.

Neste caso específico onde têm-se um talude com uma inclinação elevada, para atender o critério de estabilidade foi necessária uma alteração na aplicação do grampeamento. O sistema de contenção passou a ser composto por 5 grampos ao invés de 4 e o comprimento dos mesmos variando de 5 a 9 metros.

Com essas alterações no sistema de contenção a análise realizada apresentou um fator de segurança de 1,670 (figura 35) e que atende ao critério de

estabilidade adotado nesse trabalho. A posição da curva de ruptura caracteriza uma ruptura mista, uma vez que não seja atendido o critério de estabilidade.

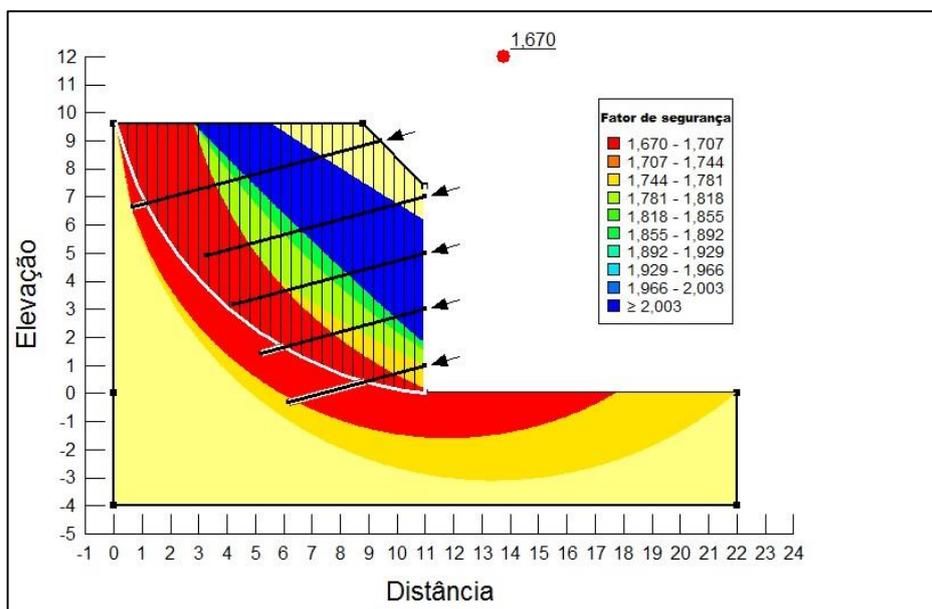


Figura 35 - Talude variação V2 com nova configuração de grampos
 Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Terceira variação geométrica com aplicação do grampeamento (V3)

O talude exposto com essas dimensões tem por característica uma inclinação de 90°. Assim como o anterior, a análise de estabilidade feita com o talude sem adição de reforços, apresentou um fator de segurança muito baixo caracterizando uma ruptura iminente. A adição dos grampos segundo as características da tabela 4 proporcionou um notável aumento do fator de segurança.

Na figura 36, é possível observar que o valor do fator de segurança obtido pela análise de estabilidade do talude é de 1,292. O resultado da análise não satisfaz o critério de estabilidade utilizado nessa pesquisa, implicando em um rearranjo do sistema de contenção. Além disso, a posição da linha de ruptura que intercepta os grampos classifica a ruptura como mista, já que essa é uma ocorrência simultânea de casos de ruptura externa e interna.

A fim de garantir que o talude esteja estável de acordo com o critério de estabilidade adotado na NBR 11682 (2006), foi necessário inserir mais um grampo ao

maciço. A alteração no número de grampos veio acompanhada do aumento de seus comprimentos, assim, obteve-se um fator de segurança de 1,585 (figura 37).

Assim como no caso anterior, os grampos utilizados possuem um comprimento unitário que varia de 5 a 9 metros e estão presentes nas cotas de 1, 3, 5, 7 e 9 metros.

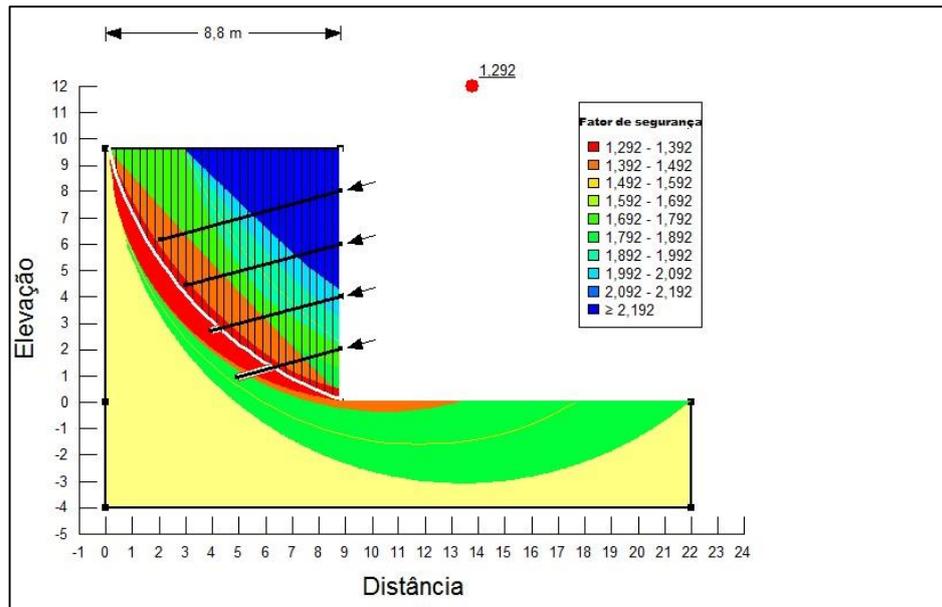


Figura 36 - Talude variação V2 com aplicação do grampeamento
Fonte: Autoria própria.

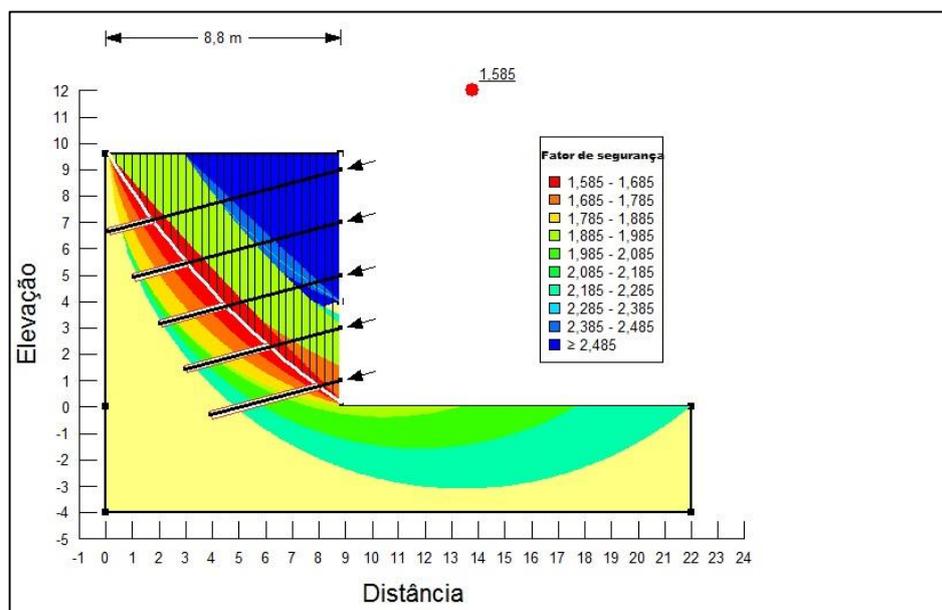


Figura 37 - Talude variação V3 com aplicação do grampeamento
Fonte: Autoria própria.

Nas análises realizadas com o grampeamento do solo o fator de segurança para cada um dos casos é descrito na tabela 5 juntamente com os resultados das análises de Bishop e Spencer.

Tabela 6 – Resultados dos fatores de segurança das análises de estabilidade

Modelo	FS Bishop	FS Spencer	FS Grampeamento
Talude Original	0,924	0,989	1,514
Talude Geometria V1	1,025	1,112	1,540
Talude Geometria V2	0,822	0,875	1,670
Talude geometria V3	0,770	0,783	1,585

Fonte: Autoria própria.

Através dessa análise de estabilidade, foi possível garantir que a aplicação do grampeamento do solo é capaz de fornecer parâmetros para resistir aos esforços internos do talude estudado, além disso, com fatores de segurança acima do valor mínimo de 1,5 especificado pela NBR 11682 (2006), o projeto de grampeamento se torna viável para as condições apresentadas.

É importante ressaltar que a escolha do arranjo dos grampos na modelagem desse método de contenção não é única, ou seja, é possível que variando alguns parâmetros como o comprimento dos grampos, a espessura, a posição, a inclinação, dentre outros, se construa um modelo distinto que também atenda os critérios apresentados.

Os resultados apresentados por Conceição (2009), evidenciam a influência da inclinação do talude na garantia de estabilidade. Em taludes de baixa inclinação, o fator de segurança é maior.

Segundo Santos (2004), a variação do fator de segurança também está relacionada ao tipo de solo que compõe o talude, em solos com grande concentração de silte, menor é a condutividade hidráulica e mais lenta é a variação do fator de segurança.

A mudança das cores apresenta as possíveis superfícies de rupturas e seus respectivos fatores de segurança. A superfície crítica ocorre na região destacada em vermelho e o fator de segurança mínimo sobre a curva evidenciada em branco.

5. CONCLUSÃO

Com a realização desse trabalho, foi possível avaliar a estabilidade de um talude rodoviário em suas condições originais e com sua variação geométrica. A proposta de reforço foi definida através do grampeamento do solo, o qual se mostrou eficiente como um sistema de contenção do maciço.

Considerando um alto nível de segurança, as análises de estabilidade realizadas pelos métodos de Bishop e Spencer no talude original apresentaram fatores de segurança abaixo do especificado pela NBR 11682 (2006) que especifica um fator de segurança mínimo de 1,5, classificando o maciço como instável.

A variação geométrica do talude possibilitou identificar a relação entre a inclinação do talude com as mudanças no fator de segurança. Nos taludes das variações V2 e V3 principalmente, as forças solicitantes foram bem maiores que as forças resistentes o que caracteriza um estado de ruptura iminente. Contudo, a aplicação do sistema de contenção em solo grampeado com 4 grampos foi capaz de garantir um aumento em média de 56% do fator de segurança do maciço. Nos casos em que ocorreram alterações do comprimento e no número de grampos, o aumento do fator de segurança praticamente dobrou.

Em sua pesquisa, Franco (2010) ressalta a importância da modelagem numérica na elaboração de projetos e na minimização de custos. Em suas análises de estabilidade utilizando o *GeoStudio* e modelando um sistema de contenção em solo grampeado, o pesquisador relata uma majoração do fator de segurança próxima a 50% em relação ao caso inicial sem nenhum reforço.

Já na análise realizada por Conceição (2011), o acréscimo do fator de segurança com a aplicação do grampeamento do solo foi de 20%. Além disso, a autora expõe a necessidade de uma investigação geotécnica na definição dos parâmetros do solo.

Vale lembrar, que para o dimensionamento dos grampos foi empregada uma equação empírica descrita por Ortigão (1997) para solos das cidades de Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília, o que possivelmente fortifica a necessidade da

realização de ensaios de arrancamento de grampos para um melhor dimensionamento, já que no Brasil há uma grande diversidade de tipos de solos. Conforme afirma Conceição (2011), o aumento da resistência ao arrancamento (q_s) possibilita uma melhora nas condições de estabilidade, favorecendo do equilíbrio do maciço.

Para os casos em que não é possível atingir um fator de segurança mínimo, o responsável pelo projeto de contenção deve buscar um arranjo capaz de proporcionar a estabilidade ao talude, seja diminuindo os espaçamentos, alterando o número de grampos, o diâmetro, dentre outras medidas cabíveis. Além disso, é importante que o profissional tenha a percepção de alterar o tipo de contenção caso considere inviável sua aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Philadelphia, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 9604**: abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 5629**: execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2006.

BARBOSA, Michele C. R.; LIMA, Hernani M. Resistência ao Cisalhamento de Solos e Taludes Vegetados com Capim Vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, n. 37. p. 113-120, nov. 2012.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1987.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. v. 2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

CONCEIÇÃO, Dayane A. **Análise paramétrica da estabilidade de um talude grampeado**. 2011. 79 f. Trabalho de conclusão de curso - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006668.pdf> >. Acesso em 15 dez. 2013.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. v. 1. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

EHRlich, Maurício; BECKER, Leonardo. **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

FABRÍCIO, João V. F. **Análise probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções**. 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA, Sueli B.; LANA, Milene S.; JUNIOR, Artur, A. C.; LEITE, Leonardo de F., **Movimentos de encostas de Ouro Preto, MG** – o caso da Vila São José. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p. 235-240, dez. 2004. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672004000400004 >. Acesso em: 19 jan. 2014.

FLORIANO, Cleber F. **Solo grampeado: comparação entre resultados de análise numérica com dados de deslocamento**. 2009. 100 f. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/78286> >. Acesso em 10 jan. 2014.

FRANÇA, Fagner A. N. de. **Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-07122007-102859/pt-br.php> >. Acesso em 13 jan. 2014.

FRANCO, Betônio O. M. **Uso de sistema computacional em projeto de solo grampeado**. 2010. 191 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas - NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

KORMANN, Alessandro C. M. **Coportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. 2002. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-20072009-092526/>>. Acesso em: 18 out. 2015

LAZART, Carlos A.; ELIAS, Victor; ESPINOZA, David; SABATINI, Paul J. Soil nail walls. In: GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR, 7. 2003, Washigton D.C. **Department of Transportation Federal Highway Administration**. Disponível em: < <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/010946.pdf> >. Acesso em: 21 jan. 2014

LEMES, Marta R. T. Revisão dos efeitos da vegetação em taludes. 2001. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/1675> >. Acesso em: 10 jan. 2014.

LIMA, Juliana M.F. **Análise de resistência ao cisalhamento de interface em caldas de cimento e caldas de solo-cimento para utilização em solo grampeado**. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, 2009. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-23032010-102825/pt-br.php> >. Acesso em 22 out. 2015.

ORTIGÃO, J. A. R.; ZIRLIS, A. C.; PALMEIRA, E. M. Experiência com solo grampeado no Brasil. **Solos e Rochas**. São Paulo, v. 16, n. 4, p. 291-304, dez. 1993. Disponível em: < http://www.terratek.com.br/pt/downloads/doc_details/55-1994-ortigao-et-al-solo-grampeado-no-brazil-solos-a-rochas.html >. Acesso em 25 jan. 2014.

PINTO, Carlos de S. Curso básico de mecânica dos solos: em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, Eliana F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 2006. Dissertação

(Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-29052007-163758/> >. Acesso em 12 dez. 2015.

SILVA, Alexander M. B. G. da. **Condicionantes geológico-geotécnico de escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. 2006. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: < <http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/106-2006/2076-alexander-magno-borges-gomes-da-silva#download> >. Acesso em 25 jan. 2014.

SILVA, Danilo P. **Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaios de arrancamento realizados em campo e laboratório**. 2009. 313 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-22032010-102032/pt-br.php> >. Acesso em: 14 jan. 2014.

SILVA, Rafael C. **Análise do comportamento de estruturas de solo grampeado através da monitoração de obra e modelos físicos (escala 1:1)**. 2010. 354 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: < <http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/110-2010/1515-rafael-cerqueira-silva> >. Acesso em 13 jan. 2014.

SILVA, Carolina H. C.; LANA, Milene S. **Influência da durabilidade no comportamento geotécnico dos filitos da Mina Pau Branco**. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 3, p. 413-418, set 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672012000300019&script=sci_arttext >. Acesso em: 16 jan. 2014.

TONUS, Bianca, P. A. **Estabilidade de taludes: Avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense**. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009. Disponível em: < <http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0116.pdf> >. Acesso em 30 set. 2015.