

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS

BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL OLIVEIRA AZEVEDO

**ESTUDOS NUMÉRICOS APLICADOS AO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS EM SOLO GRAMPEADO**

**Varginha
2017**

GABRIEL OLIVEIRA AZEVEDO

**ESTUDOS NUMÉRICOS APLICADOS AO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS EM SOLO GRAMPEADO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Minas – UNIS/MG, como requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Professor Me. Armando Belato Pereira.

**Varginha
2017**

GABRIEL OLIVEIRA AZEVEDO

**ESTUDOS NUMÉRICOS APLICADOS AO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS EM SOLO GRAMPEADO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Minas – UNIS/MG, como requisito para obtenção do grau de bacharel, avaliado pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Me. Armando Belato Pereira

Prof.

Prof.

OBS:

Aos meus pais – Willian José Andrade Azevedo e Venise Oliveira Azevedo – que foram sempre a razão de tudo o que eu faço, dedico!

A Deus, por me dar coragem nos momentos mais difíceis e força para conciliar as atividades da vida profissional e acadêmica.

Ao meu pai Willian José Andrade Azevedo, por compartilhar seus preciosos conhecimentos na área da construção civil e, à minha mãe Venise de Oliveira Azevedo, pela confiança e amor.

Aos meus irmãos e minha namorada Elisandra, pelo companheirismo e carinho ao longo desses cinco anos de vários dias sufocantes e corridos.

À minha avó Veni Maranezi de Oliveira, pelo carisma e amor durante toda a vida.

À minha tia Sônia Maria Azevedo Souza, pela motivação e a certeza de que, ao final dessa etapa, as conquistas profissionais seriam imensas e merecedoras.

Ao meu orientador, Armando Belato Pereira, pela paciência e pelos seus conhecimentos repassados para que este trabalho pudesse ser elaborado.

Aos meus amigos, pelos bons momentos durante a vida universitária e pelo grande companheirismo durante todo o curso.

Sou grato!

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”

Theodore Roosevelt

RESUMO

A técnica de contenção em solo grampeado conquistou um espaço muito grande entre as principais opções disponíveis na área de engenharia geotécnica devido à popularização de sua aplicação em obras de estabilização de taludes em todo o mundo. Durante este estudo são mencionados os aspectos do comportamento da uma contenção em solo grampeado através de uma revisão bibliográfica do tema, abordando desde sua origem como técnica de reforço, evolução ao longo do tempo e seu método de execução. Com a utilização de um *software* computacional chamado GeoStudio 2007, é permitido realizar o dimensionamento da estrutura, e a análise de seu comportamento durante e após os processos de escavação, deformação da face e comportamento dos grampos, informações que nos permitem realizar o dimensionamento da estrutura proposta.

Palavras-chave: Solo grampeado. GeoStudio. Dimensionamento.

ABSTRACT

The clamped ground containment technique has gained a great deal of space among the main options available in geotechnical engineering due to the popularization of its application in slope stabilization works around the world. During this study, aspects of the behavior of a containment in stapled soil through a bibliographic review of the theme are mentioned, addressing since its origin as reinforcement technique, evolution over time and its method of execution. With the use of computational software called GeoStudio 2007, it is allowed to carry out the sizing of the structure, and the analysis of its behavior during and after the processes of excavation, deformation of the face and behavior of the clamps, information that allows us to carry out the dimensioning of the structure proposal.

Keywords: *Stapled only. GeoStudio. Sizing.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação esquemática entre o método convencional e NATM.....	20
Figura 2 – Corte e vista de taludes de emboques em 1970	20
Figura 3 – Processo de escavação em bermas	22
Figura 4 – Perfuratriz hidráulica.....	23
Figura 5 – Espaçadores.....	24
Figura 6 – Injeção de calda de cimento	24
Figura 7 – Detalhe de drenagem horizontal profunda	25
Figura 8 – Drenagem rasa por barbacã.....	26
Figura 9 – Drenagem superficial com dreno do paramento	26
Figura 10 – Concreto projetado em solo grampeado com tela soldável.....	27
Figura 11 – Modelos de acabamento aplicada à cabeça do grampo.....	28
Figura 12 – Resistência à compressão do concreto projetado	28
Figura 13 – Resultado de uma retroanálise	32
Figura 14 – Nomenclaturas usuais de taludes	33
Figura 15 – Modelo para ensaio de arranchamento.....	34
Figura 16 – Mecanismos de transferência de cargas	37
Figura 17 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern & Price.....	40
Figura 18 – Principais forças pelo método Bishop Simplificado	41
Figura 19 – Aplicação de técnica de Solo Grampeado utilizando o Slope.....	42
Figura 20 – Domínio de influência e deslocamentos máximos.....	44
Figura 21 – Comportamento tensão-deformação-tempo para modelo elástico.....	45
Figura 22 – Modelo para o regime plástico perfeito	46
Figura 23 – Comportamento tensão-deformação para modelo plástico	46
Figura 24 – Curva tensão-deformação para modelo elasto-plástico.....	47
Figura 25 – Limite das áreas onde devem ser executadas as investigações geotécnicas	48
Figura 26 – Mecanismos de ruptura	49
Figura 27 – Vista frontal do talude na Rodovia Fernão Dias	51
Figura 28 – Entrada de dados dos grampos no programa Slope/W do estudo de caso	54
Figura 29 – Fator de segurança para ruptura geral	55
Figura 30 – Análise da estabilidade do estudo de caso (grampos com inclinação de 10°)	56
Figura 31 – Modelagem dos grampos como elementos de viga.....	59
Figura 32 – Modelagem do paramento como elementos de viga	60

Figura 33 – Modelagem da geometria “Insitu”	62
Figura 34 – 1ª Escavação.....	62
Figura 35 – 2ª Escavação.....	62
Figura 36 – 3ª Escavação.....	62
Figura 37 – 4ª Escavação.....	62
Figura 38 – 5ª Escavação.....	62
Figura 39 – 6ª Escavação.....	62
Figura 40 – 7ª Escavação.....	63
Figura 41 – 8ª Escavação.....	63
Figura 42 – 9ª Escavação.....	63
Figura 43 – 10ª Escavação.....	63
Figura 44 – 11ª Escavação.....	63
Figura 45 – 12ª Escavação.....	63
Figura 46 – 13ª Escavação.....	64
Figura 47 – 14ª Escavação.....	64
Figura 48 – Projeção dos deslocamentos da face e base do talude, fator de escala aumentado 10 vezes, Sigma/W – GeoStudio 2007	65
Figura 49 – Zonas de plastificação, Sigma/W – GeoStudio 2007.....	66
Figura 50 – Gráfico de tração máxima nos grampos de 1 ao 9, Sigma/W – GeoStudio 2007	69
Figura 51 – Gráfico de tração máxima não grampos de 10 ao 14, Sigma/W – GeoStudio 2007	70
Figura 52 – Fator de segurança do problema-tipo final.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Altura das etapas de escavação.....	22
Quadro 2 – Especificações de telas eletrosoldadas	29
Quadro 3 – Valores do parâmetro ‘qs’	35
Quadro 4 – Valores típicos de Fator de Segurança	39
Quadro 5 – Estimativa dos valores e da influência dos deslocamentos.....	44
Quadro 6 – Peso específico dos solos arenosos (uso limitado a estudos preliminares)	52
Quadro 7 – Parâmetros do solo	52
Quadro 8 – Força de arrancamento pelo método de Ribeiro (2011)	53
Quadro 9 – Força de arrancamento pelos parâmetros do Quadro 3	54
Quadro 10 – FS mínimos em função da inclinação dos grampos	56
Quadro 11 – Fator de segurança ao arrancamento dos grampos	67
Quadro 12 – Valores das cargas de escoamento das barras de aço CA50.....	68
Quadro 13 – Valores adotados por questão construtiva	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação quanto à dimensão das partículas segundo a NBR 6502.....	31
Tabela 2 – Quantidade de ensaios de arrancamento.....	35
Tabela 3 - Valores de coeficientes de Poisson para diferentes tipos de solos.	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVEATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT	<i>Cone Penetration Test</i>
Fa	Força atuante
Fck	Resistência de concreto à compressão
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
Fr	Força resultante
FS	Fator de Segurança
Ma	Momento atuante
MPa	Megapascal
Mr	Momento resultante
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>
NBR	Norma Brasileira
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
Qs	Força de arrancamento do grampo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Metodologia.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Solo Grampeado: origem	19
2.2 Aplicações do solo grampeado.....	20
2.3 Metodologia de execução.....	21
2.3.1 Escavação da plataforma	21
2.3.2 Perfuração.....	22
2.3.3 Introdução dos grampos	23
2.3.4 Drenagem.....	25
2.3.5 Faceamento.....	26
2.4 Componentes básicos do solo grampeado	27
2.4.1 Grampos	27
2.4.2 Concreto projetado e telas metálicas.....	28
2.4.3 Solos <i>in situ</i>	29
2.5 Parâmetros do solo	30
2.5.1 Coesão, ângulo de atrito e peso específico	30
2.5.2 Granulometria.....	31
2.5.3 Resistência ao cisalhamento	31
2.5.4 Retroanálise	32
2.6 Taludes.....	33
2.7 Arrancamento de grampos	34
2.8 Comparativo entre solo grampeado e cortina atirantada.....	35
2.9 Vantagens e desvantagens do solo grampeado	37
2.10 Análise da estabilidade.....	38
2.10.1 Fator Segurança	38
2.10.2 Método de Morgenstern & Price	39
2.10.3 Método de Bishop Simplificado	40
2.11 Programa GeoStudio e o Módulo Slope Sigma.....	42

2.12 Análise Tensão X Deformação	43
2.12.1 Modelo elástico	45
2.12.2 Modelo plástico	45
2.12.3 Modelo elasto-plástico.....	46
2.13 Concepção geral de projeto	47
2.13.1 Investigações geotécnicas.....	47
2.13.2 Tipos de ruptura.....	48
3 CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO – ESTUDO DE CASO.....	51
3.1 O caso.....	51
3.2 Parâmetros adotados nas análises de estabilidade	51
3.2.1 Parâmetros do solo	51
3.2.2 Parâmetros dos grampos.....	52
3.3 Resultados das análises de estabilidade.....	55
3.3.1 Resultado estabilidade global do tabule natural	55
3.3.2 Resultado da análise de estabilidade do talude grampeado	56
3.4 Parâmetros adotados nas análises Tensão X Deformação.....	57
3.4.1 Parâmetros dos solos	57
3.4.2 Parâmetros dos grampos.....	57
3.4.3 Parâmetros do paramento	59
3.5 Análise de deslocamentos.....	60
3.5.1 Análise do Fator de segurança ao arrancamento	66
3.5.2 Análise do Fator de segurança à ruptura por tração	67
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Em função de uma topografia acidentada que é encontrada no Brasil, em alguns casos é necessário realizar um nivelamento para se obter um melhor aproveitamento do local desejado. Para tanto, é necessário aterrar ou fazer cortes, onde surgem as encostas e taludes. As estruturas de contenção tem como o principal objetivo a estabilização destas superfícies inclinadas, mantendo-as em equilíbrio para não ocorrer danos ocasionados por movimentos inesperados de terra.

A estrutura pode ser projetada de diversas maneiras, dentre elas, pode-se citar o de solo grampeado. O engenheiro responsável pelo projeto deve levantar dados como os aspectos do solo na região e a dimensão da estrutura para poder optar por um método mais viável.

O solo grampeado é executado com a introdução de reforços, normalmente em barras de aço, em um maciço de solo. Aliado a esse procedimento, é feito um revestimento da face com concreto projetado armado com tela de aço ou fibras de aço e um sistema de drenagem. Feito isso, tem como finalidade restringir os deslocamentos e transferir os esforços de uma zona ativa para uma zona resistente.

Na maioria das obras, onde é utilizada a técnica de estabilização com solo grampeado, envolve a seguinte sequência de etapas: escavação, colocação e injeção dos grampos e execução da parede. A parede é feita, normalmente, com concreto projetado, sem função estrutural, com finalidade de proteger o talude contra ação da chuva e outras intempéries naturais. Em taludes naturais pode-se executar o reforço desprezando a etapa da escavação.

Neste trabalho será apresentada uma modelagem numérica de dimensionamento de solo grampeado em um determinado caso específico. Desta forma, espera-se obter resultados e métodos de projetos que auxiliarão em outros dimensionamentos para situações semelhantes. É importante ressaltar que, a construção de uma estrutura de contenção implica num elevado ônus no orçamento total da obra, podendo acontecer do valor da contenção ser maior que o próprio custo da edificação. Por isso, é importante uma análise bem detalhada de um profissional para poder adotar a melhor escolha a ser feita.

1.1 Justificativa

As áreas urbanas instaladas em regiões montanhosas, ou até mesmo nas cidades em terrenos irregulares, com grande inclinação, têm sido mais afetadas por movimentos de massa ao longo das encostas, que apesar de ser uma causa natural, são acelerados pela ação humana.

Diante da situação, para a realização de projetos de estabilidade de talude, é de suma importância para o Engenheiro Civil, o conhecimento de informações pertinentes relacionadas à estabilidade de talude grampeados, sendo o foco deste trabalho a modelagem numérica de um estudo de caso rodoviário, localizada às margens da Rodovia Fernão Dias.

Esta solução apresenta vantagens em relação às outras técnicas similares, sendo levados em consideração alguns itens antes dos profissionais responsáveis pelo projeto optarem por essa técnica:

1. Baixo custo: os chumbadores são os únicos elementos estruturais que constituem a estrutura. A proteção do talude, seja em concreto projetado ou outro tipo de estrutura, tem um custo relativamente baixo em relação às soluções convencionais;
2. Velocidade da execução: o tempo da execução é o menor se comparando a outras soluções;
3. Equipamentos: os equipamentos utilizados na construção do solo grampeado são leves e de fácil manuseio;
4. Flexibilidade: é de fácil adaptação do projeto às condições geométricas do talude existente;
5. Deformabilidade: por ser uma estrutura deformável, suporta com segurança a ocorrência de recalques.

1.2 Objetivos

Como objetivo geral deste trabalho, pretende-se dimensionar uma estrutura de contenção por meio de uma análise numérica, localizado nas margens da Rodovia Fernão Dias, utilizando a técnica dos solos grampeados.

Para tanto, alguns objetivos específicos foram elencados:

1. Elaborar pesquisa bibliográfica sobre o tema;
2. Identificar a forma de execução da técnica solo grampeado;
3. Levantar parâmetros de resistência do solo, que constituem o talude estudado;
4. Verificar análise de estabilidade pelo método de Morgenstern & Price, para determinar o fator de segurança, quanto à estabilidade global do talude natural;
5. Verificar a análise de estabilidade pelo método de Morgenstern & Price para determinar o fator de segurança, quanto à estabilidade global do talude após a aplicação da técnica de Solo Grampeado.

6. Verificar análise de Tensão-Deformação aplicando o problema tipo no módulo *Sigma* (*GeoSlope 2007*).
7. Definição da armadura utilizada no problema.

1.3 Metodologia

O trabalho dividir-se-á em duas etapas: (1) Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 1 – realizado durante o primeiro semestre de 2017 e; (2) TCC 2 – que será realizado durante o segundo semestre de 2017.

Na primeira etapa – TCC 1 – a metodologia utilizada ao longo do trabalho teve como base um estudo de caso: “uma maneira de se fazer pesquisa empírica, investigando fenômenos contemporâneos dentro de contexto da vida real de seu pesquisador” (YIN, 2001). Representa uma estratégia ideal quando se pretende pesquisa ‘como’ e ‘porquê’. Tem como propósito, a análise exaustiva e pode envolver exame de registros, observação de ocorrência de fatos, o pesquisador produz relatórios que apresentam um estilo mais informal, narrativo, ou com exemplos e descrições fornecidos pelos sujeitos, podendo ainda utilizar fotos, desenhos, quadros, colagens ou qualquer outro tipo de material que o auxilie na transmissão do caso (GIL, 2008).

Além disso, elaborou-se uma pesquisa bibliográfica, sendo edificada uma revisão literária (GIL, 2008), pertinente aos temas abordados com parâmetros de projetos do estudo de caso escolhido e a modelagem do estudo de caso para a análise de equilíbrio limite e global da estrutura. Fundamentou-se, para tanto, na bibliografia disponível – baseadas em livros sobre solos e contenções –, bem como nas publicações literárias contemporâneas – diversas dissertações de mestrado e doutorado para o melhor conhecimento sobre o trabalho proposto.

Para realizar a análise de equilíbrio limite e global da estrutura, foi utilizado o programa computacional (*software*) GeoStudio2007, onde foi feita a modelagem do talude, através da ferramenta *Slope* pelo método de Morgenstern & Price. Registra-se que, na próxima etapa, será utilizada a ferramenta Sigma para a obtenção da análise de tensão-deformação.

Na segunda etapa – TCC 2 – Foi adotados parâmetros para os grampos e o solo com o intuito de realizar análises do tipo tensão-deformação onde foi aplicado modelagens no mesmo *software* utilizado para análise de estabilidade global, porem utilizando o módulo *Slope*.

Com a análise de tensão-deformação podemos obter os esforços solicitantes em cada grampo, realizando uma escavação por etapa, totalizando 14 etapas, com sua profundidade podendo variar de 0,80m a 1,50m. Com isso podemos obter os esforços nos grampos e o possível deslocamento da face do paramento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo Grampeado: origem

O solo grampeado surgiu, inicialmente, de maneira restrita à Engenharia de Minas, onde parte da técnica vem de execução de túneis e suporte de galerias denominada *New Austrian Tunneling Method* (NATM). Esta técnica foi desenvolvida a partir do século 1945, pelo Engenheiro e Professor de Minas Landilau Von Rabcewicz, para o avanço de escavações de túneis rochosos. Com a utilização da nova técnica de execução de túneis, diminuíram as chances de ocorrer deslocamentos de blocos e da propagação de descontinuidades pré-existentes no maciço rochoso, o qual passou a ser considerado como um bloco único (CLOUTERRE, 1993).

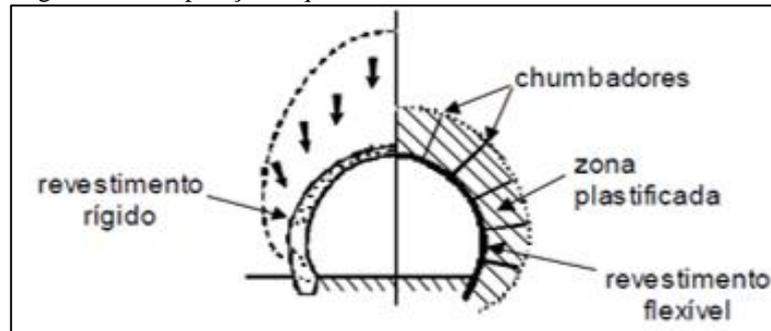
O método NATM consiste na aplicação de um suporte flexível para permitir que o terreno se deforme ocorrendo a formação de uma região plastificada no entorno da escavação, que pode ser reforçado através de chumbadores. Em geral, os chumbadores são dispostos a cada 3m a 6m, ao longo da galeria (CLOUTERRE, 1993), e são inseridos no maciço por perfuração ou percussão. Em seguida da escavação, a cavidade que está submetida ao efeito do peso próprio do solo e tensões confinantes, é estabilizada com um revestimento de concreto projetado (espessura podendo variar de 10cm a 30cm).

O concreto projetado é constituído de fibras de aço ou é aplicado sobre telas metálicas, formando um revestimento flexível. No método convencional de execução de túneis, os deslocamentos do terreno são impedidos por um revestimento rígido que mobiliza no maciço esforços enormes e sendo uma solução com o custo maior. Pode-se afirmar então que, uma escavação de solo grampeado está para a execução de túneis com revestimento flexível da mesma forma que a solução de túneis se compara a uma cortina ancorada (ORTIGÃO et al., 1994).

A Figura 1, na sequência, estabelece uma comparação entre a técnica NATM e a execução de túneis de maneira tradicional.

Após as aplicações da técnica NATM em rochas duras, novos testes foram efetuados em solos menos resistentes, como rochas brandas e, posteriormente, em solos, surgindo o nome de solo grampeado ou pregado.

Figura 1 – Comparação esquemática entre o método convencional e NATM



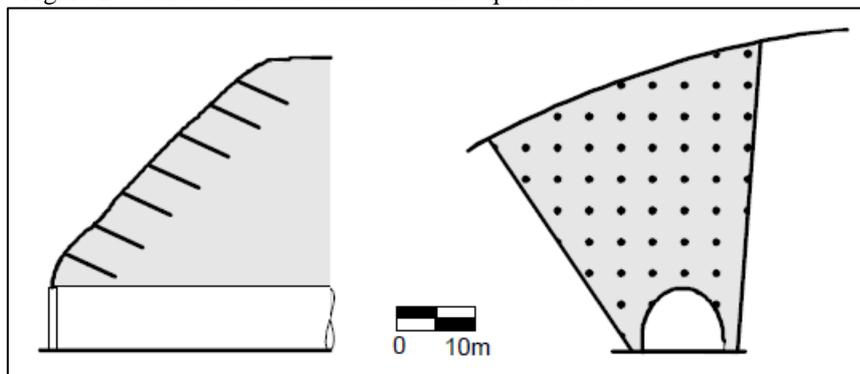
Fonte: Feijó (2007).

2.2 Aplicações do solo grampeado

O solo grampeado pode ser aplicado em taludes artificiais (de corte ou aterro), taludes naturais e em escavações permanentes ou temporárias. A utilização da técnica tem a função de manter o talude instável, de maneira para reduzir os deslocamentos e/ou aumentar o fator de segurança, sem a utilização de técnicas de contenção com valor mais elevado.

No Brasil, onde possui um solo adequado para a aplicação do método, já foram executadas diversas obras deste porte. A empresa Ródio Perfurações e Consolidações, em 1966, aplicou concreto projetado e tela metálica para estabilização da barragem de Xavantes. Em 1970, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) utilizou, na construção do túnel de adução do Sistema Cantareira em São Paulo, o método NATM – conforme a Figura 2. Na estabilização do talude do emboque, empregaram-se chumbadores curtos, tela metálica e concreto projetado, aproveitando o sistema utilizado na construção de túneis (ZIRLIZ et al. 2010).

Figura 2 – Corte e vista de taludes de emboques em 1970



Fonte: Ortigão et al. (1994).

2.3 Metodologia de execução

A execução da técnica de solo grampeado em taludes com escavação mecânica ou manual é realizada em sucessivas escavações de cima para baixo. Caso encontre o talude cortado, não existe a necessidade de trabalhar de cima para baixo no reforço do mesmo, podendo seguir conforme conveniência. Neste caso, a construção consistirá apenas na introdução dos grampos e execução da parede de concreto projetado.

Em taludes artificiais, o processo construtivo é constituído por 5 etapas principais sucessivas a saber: (1) escavação da plataforma; (2) perfuração; (3) introdução dos grampos; (4) drenagem e; (5) faceamento. Registra-se que, cada uma destas será descrita, na sequência.

2.3.1 Escavação da plataforma

O início do processo de escavação do terreno é realizado, normalmente, a partir do topo do talude, em fases sucessivas entre 1 e 2m, em função do tipo de terreno a ser estabilizado, até alcançar a cota final (Savaris, 2010).

A altura máxima de escavação depende da habilidade do terreno em manter-se estável por um período de tempo entre 24 e 48 horas, levando em conta diversos fatores, dentre eles, a característica do solo. Em geral, os solos capazes de serem grampeados são: areias consolidadas, areias úmidas com coesão capilar, rochas brandas e argilas adensadas. No caso de solos arenoso, alturas superiores a 2 metros ou inferiores a 0,50 metros são raras. Em argilas sobreadensadas, pode-se alcançar profundidade superiores a 2 metros (BRUCE JEWELL, 1987). Para cortes verticais, Gäsller (1988), indicou profundidades de cada estágio de escavação em função do tipo do solo – conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Altura das etapas de escavação

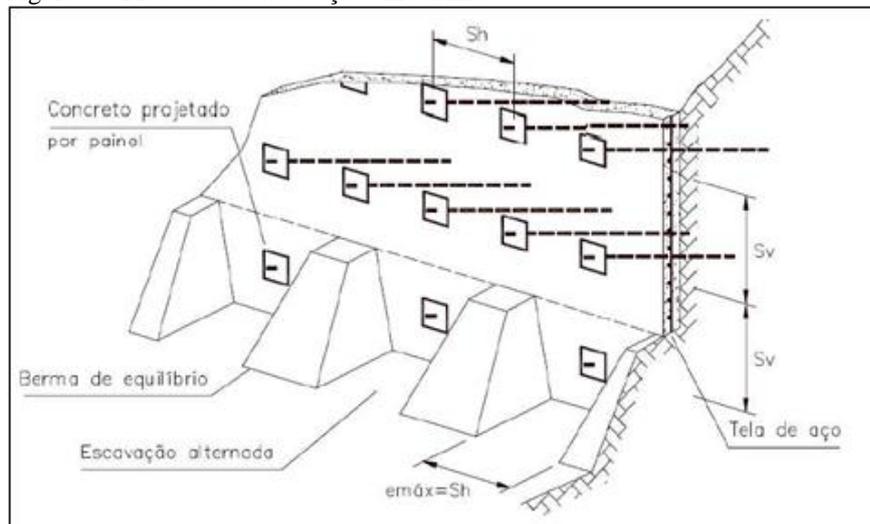
Tipo de solo	Incremento de escavação (H)	
Pedregulho	0,5m (com coesão aparente)	1,5m (solo com cimentação)
Areia	1,2m (medianamente compacta, com coesão aparente)	1,5m (compacta, com coesão aparente) 2,0m (com cimentação)
Silte	1,2m	2,0m (função do teor de umidade)
Argila	1,5m (normalmente consolidada)	2,5m (sobreadensada)

Fonte: Gässler (1998).

Durante a escavação, o solo deve se manter instável. Em função da altura a escavada o solo grampeado passa por uma fase crítica durante a execução da escavação, que corresponde a uma instabilidade local.

É recomendável inclinar a face do talude para obter uma redução na armadura de reforço. Conforme exposto no trabalho de Pereira (2012), recomenda-se uma inclinação de 5° a 10° em relação à vertical, para obter-se um ganho considerável de estabilidade durante a execução. Outro método utilizado para reduzir os deslocamentos em solo grampeado durante sua escavação é a utilização de bermas ou nichos – conforme a Figura 3.

Figura 3 – Processo de escavação em bermas



Fonte: Lazarte et al. (2003).

2.3.2 Perfuração

A perfuração do talude é executada por equipamentos de fácil manuseio, instaláveis sobre qualquer tipo de talude. Como fluido de perfuração e limpeza do furo pode ser utilizado

água, lama ou ar. Caso a opção de projeto for por trados, não é necessário o uso de fluídos. Usualmente, no Brasil, o sistema adotado é a lavagem com água injetada pela haste, que possui um elemento cortante em sua extremidade.

Conforme a área de trabalho, o diâmetro e a profundidade do furo, pode-se optar por perfuratriz tipo sonda ou hidráulica – conforme a Figura 4. Quando é necessária uma alta produtividade, são utilizadas carretas perfuratrizes sobre esteiras.

Figura 4 – Perfuratriz hidráulica



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

De acordo com Federal Highway Administration (FHWA), os diâmetros podem ser de 100 a 300mm, sendo mais comum o uso de furos entre 150 a 200mm (FHWA, 2003).

2.3.3 Introdução dos grampos

Geralmente, os grampos são feitos de aço, destinados ao concreto armado (CA50), com diâmetros que variam de 16mm a 32mm, que recebem um sistema de pintura para evitar corrosões. Para garantir a centralização contínua da barra são utilizados espaçadores ao longo da barra – conforme mostrados na Figura 5, na sequência.

A forma de instalação dos grampos mais comuns são a de perfuração do maciço seguida da aplicação da calda de cimento e a de cravação. No primeiro caso, são feitos os furos no solo, inserido a barra de aço com seus espaçadores e feita a injeção de calda de

cimento. No segundo caso, os grampos são cravados no solo através de um martelo pneumático e, posteriormente, é injetada a calda de cimento (Pereira 2012).

A injeção de calda de cimento, conforme a Figura 6 que segue, pode ser feita por meio de válvulas tipo manchete ou por gravidade; a inclinação do furo contribui para inserção da calda.

Figura 5 – Espaçadores



Fonte: FHWA (2006).

Figura 6 – Injeção de calda de cimento



Fonte: Pereira (2012).

Pereira (2016), por meio de análises de estabilidade de um talude idealizado por equilíbrio limite, correlacionou os valores de fator de segurança (FS) encontrados para diferentes inclinações dos elementos de reforços. O autor concluiu que a melhor inclinação do

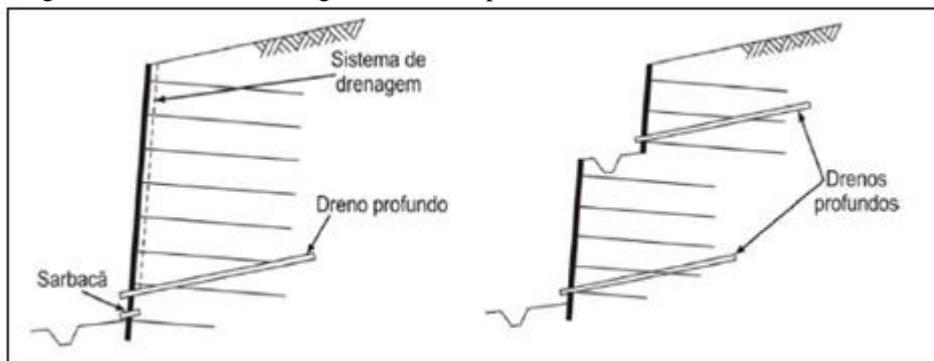
grampo, para diversos casos de inclinação dos taludes estudados, variou entre 5° e 35° – valores que tendem a favorecer os processos de injeção de calda do cimento. Quanto mais verticalizado o talude, menos deverá ser a inclinação do grampo, sendo que reforços horizontais tendem a propiciar a melhor condição de estabilidade.

2.3.4 Drenagem

Em todos projetos de solo grampeado, o sistema de drenagem deve ser previsto. A prática usual recomenda a execução dos convencionais serviços de drenagem (horizontal) profunda e de superfícies. Estes drenos devem ser considerados para evitar o fluxo interno de água e devem ser instalados antes da construção das paredes de concreto.

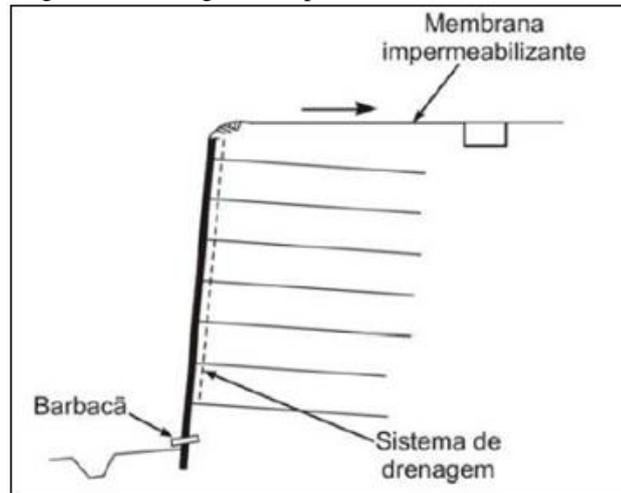
A drenagem horizontal profunda é composta por tubos de Policloreto de Vinila (PVC), furados e envolvidos por mantas geotêxtis. Os drenos profundos visam reduzir a saturação do maciço, principalmente com relação à ascensão do nível freático do terreno – conforme a Figura 7. Já, as drenagens de superfícies, são utilizados para evitar o acúmulo de água atrás da parede de concreto armado. Estes drenos rasos são representados pelos barbacãs, drenos de paramento e canaletas (crista e de pé), que direcionam a água superficial para dissipadores de energia que minimizam o processo erosivo – conforme a Figura 8.

Figura 7 – Detalhe de drenagem horizontal profunda



Fonte: Clouterre (1993).

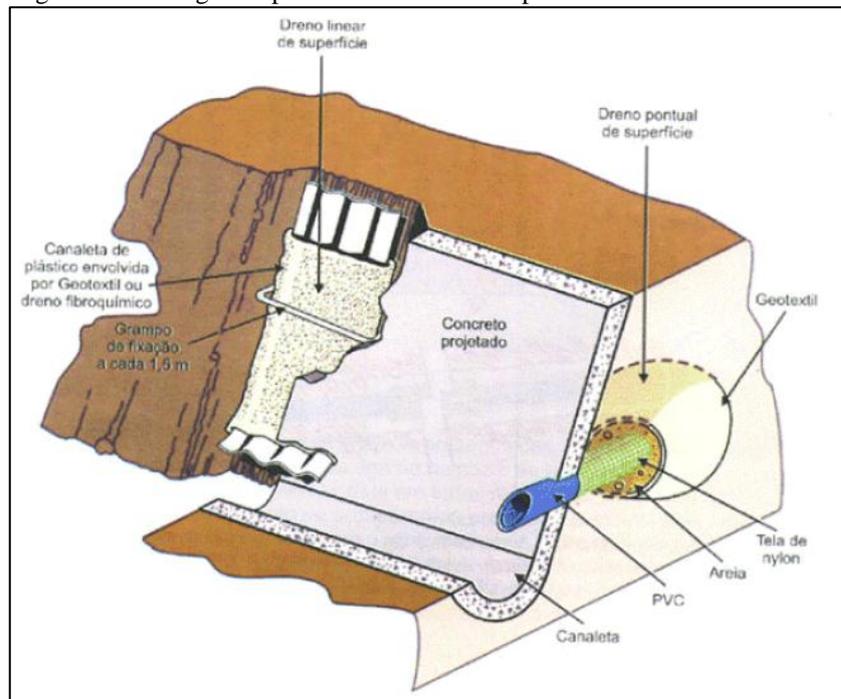
Figura 8 – Drenagem rasa por barbacã



Fonte: Clouterre (1993)

O dreno de paramento, como ilustrado pela Figura 9, é o resultado da instalação de calha plástica ondulada revestida por manta geotêxtil, na direção vertical da crista até o pé do talude.

Figura 9 – Drenagem superficial com dreno do paramento



Fonte: Zirlis et al., (2010).

Registra-se que a flora na canaleta do pé é considerada um dreno linear eficiente e recomendável.

2.3.5 Faceamento

Em geral, o revestimento da parede é de concreto projetado com uma malha de tela soldada; porém, pode ser usado placa pré-moldada ou até mesmo revestimento vegetal. No presente trabalho, utiliza-se a estrutura de solo grampeado com paramento com malha de tela soldável – conforme a Figura 10, na sequência – e concreto de projeto.

Conforme Clouterre (1993), o papel mecânico do faceamento nos solos grampeados é fornecer confinamento lateral do solo próximo à face escavada, assegurando o equilíbrio da pressão do solo e das tensões nas cabeças dos grampos em relação ao faceamento. Para critérios de dimensionamento do concreto projetado, deve ser levado em consideração o efeito da punção devido ao contato da cabeça do grampo e o paramento de concreto projetado.

Figura 10 – Concreto projetado em solo grampeado com tela soldável



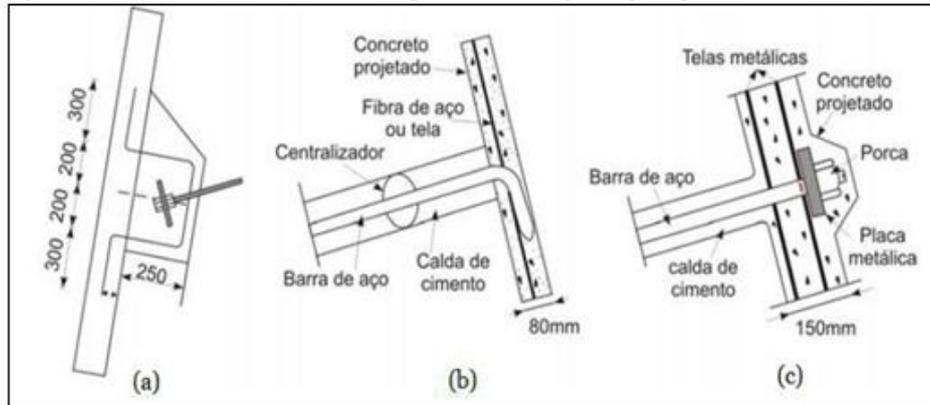
Fonte: Arquivo pessoal do autor.

2.4 Componentes básicos do solo grampeado

2.4.1 Grampos

Para os grampos injetados foram utilizadas barras de aço posicionadas no solo após ser realizada uma abertura que varia entre 70mm a 120mm. Em seguida, é executada a calda de cimento que escoar por gravidade, em toda sua extensão do furo. Para que o cobrimento seja respeitado, é inserido no meio da barra, os centralizadores – estes são distribuído a cada 2m ou 3m, impedindo o contato das barras com o solo. Após os grampos serem inseridos é feita a proteção da sua cabeça (Pereira, 2012). Este acabamento pode ser feito de 3 maneiras, conforme a Figura 11, respectivamente: (1) a cabeça do grampo dobrada coberta com concreto projetado; (2) na cabeça do grampo vai uma rosca, placa metálica e porca; (3) finalizada em nicho.

Figura 11 – Modelos de acabamento aplicada à cabeça do grampo



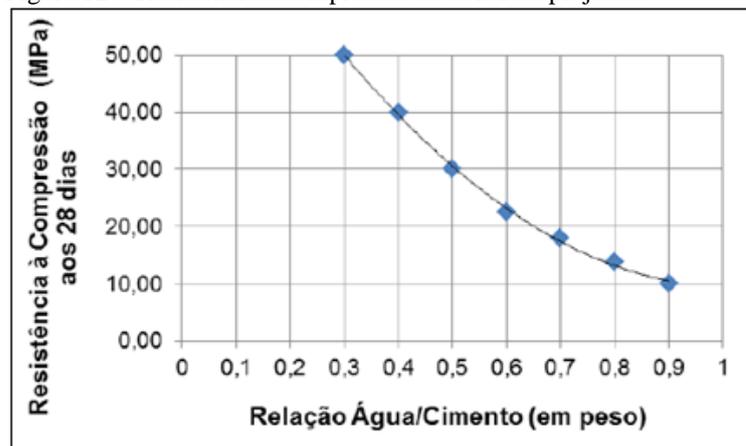
Fonte: Pereira (2016).

Em escavações ou taludes, é necessária uma pequena inclinação dos grampos com a horizontal, para que apresentem um melhor comportamento quando tracionados, sendo que a eficiência máxima dos grampos se dá quando sua inclinação coincidir com a direção principal maior de deformação da massa reforçada (SILVA, 2010).

2.4.2 Concreto projetado e telas metálicas

A tela metálica é distribuída e fixada em toda a extensão do talude. Logo após, é projetado o concreto (composto de cimento, areia brita e água) sobre a tela, permitindo ser bombeado e projetado sob pressão. Conforme os critérios da FHWA (2006), o concreto projetado deve proporcionar à estrutura grampeada alta resistência e estabilidade, sendo recomendados valores entre 0,45 e 0,60 para o fator de água-cimento, correspondentes aos valores de resistência de concreto à compressão (f_{ck}) entre 34,5 e 22,5 Megapascal (MPa), respectivamente aos 28 dias, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Resistência à compressão do concreto projetado



Fonte: FHWA (2006).

Lima (2007) reforça que a face, embora não apresente uma contribuição maior na estabilidade global da estrutura grampeada, possui um papel importante na estabilidade local, no que diz respeito ao confinamento do solo entre grampos, à medida que se processa a escavação, além de exercer a função de proteger a face do talude contra a erosão e possíveis deslocamentos do solo superficial.

De acordo com Pereira (2016), em condições de equilíbrio, a parede deverá aguentar os empuxos de terra atuantes e as forças aplicadas (em geral só consideradas as forças de tração na face da escavação). Para o dimensionamento correto da face, é necessário conhecer os valores destes dois parâmetros. No entanto, é comum no meio técnico não considerar os efeitos do punção e dos momentos fletores induzidos no paramento, utilizando-se revestimento de concreto projetado com espessuras entre 75mm e 150mm, normalmente.

Conforme o Quadro 2, são utilizadas telas metálicas eletrosoldadas, com taxas que variam de 10 a 60 Kg/m³ (Kg de aço/m³ de concreto).

Quadro 2 – Especificações de telas eletrosoldadas

Aço CA-60		Espaçamento entre fios (cm)		Seções (cm ² /m)		Apresentação	Dimensões		Peso	
Série	Designação	Long.	Transv.	Long.	Transv.	Rolo/Painel	Larg.	Compr.	kg/m ²	kg/peça
61	Q 61	15	15	3,4	3,4	Painel	2,45	6,00	0,97	14,3
75	Q 75	15	15	3,8	3,8	Painel	2,45	6,00	1,21	17,8
92	Q 92	15	15	4,2	4,2	Painel	2,45	6,00	1,48	21,8
113	Q 113	10	10	3,8	3,8	Painel	2,45	6,00	1,8	26,5
138	Q 138	10	10	4,2	4,2	Painel	2,45	6,00	2,2	32,3
159	Q 159	10	10	4,5	4,5	Painel	2,45	6,00	2,52	37,0
196	Q 196	10	10	5,0	5,0	Painel	2,45	6,00	3,11	45,7
246	Q 246	10	10	5,6	5,6	Painel	2,45	6,00	3,91	57,5
283	Q 283	10	10	6,0	6,0	Painel	2,45	6,00	4,48	65,9
335	Q 335	15	15	8,0	8,0	Painel	2,45	6,00	5,37	78,9
396	Q 396	10	10	7,1	7,1	Painel	2,45	6,00	6,28	92,3
503	Q 503	10	10	8,0	8,0	Painel	2,45	6,00	7,97	117,2
636	Q 636	10	10	9,0	9,0	Painel	2,45	6,00	10,09	148,3
785	Q 785	10	10	10,0	10,0	Painel	2,45	6,00	12,46	183,2

Fonte: Gerdau (2014).

2.4.3 Solos *in situ*

O solo grampeado deve ajustar-se às condições pré-existentes do solo local. A abrangência da investigação de campo e laboratório dos materiais *in situ* dependem da complexidade geológica da área em estudo. Para Clouterre (1993), uma avaliação preliminar em obras verticais ou bastante íngremes, o perfil transversal de estudo deve ter uma extensão em profundidade da ordem de 1,5 e 3 vezes a altura vertical da obra, para condições de topo horizontal e inclinado, respectivamente.

Os principais parâmetros geotécnicos dos *solos in situ* para o projeto de um solo grampeado são os parâmetros de resistência, condutividade hidráulica e compressibilidade. A presença de água subterrânea é um fator de grande relevância, particularmente quando incorpora íons, pelo que sua consideração constitui premissa básica destes projetos (RIBEIRO, 2011).

2.5 Parâmetros do solo

2.5.1 Coesão, ângulo de atrito e peso específico

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de acordo com a Norma Brasileira (NBR) 6502, a coesão é definida como “parcela de resistência ao cisalhamento de um solo, independente da tensão efetiva normal atuante, provocada pela atração físico-químico entre partículas ou pela cimentação destas” (ABNT, 1995).

Para Machado (1997) a coesão do solo decorre de uma força resultante de atração entre as suas próprias partículas. Por Caputo (1998), a coesão distingue-se como coesão aparente e coesão verdadeira. Sendo que a aparente é resultante de uma pressão capilar da água contida nos solos e que se comporta como uma pressão externa. Já, a coesão verdadeira é devida às forças eletroquímicas de atração das partículas de argilas e depende de vários fatores.

De acordo com Pinto (2002), o ângulo de atrito é o máximo ângulo que a força transmitida pelo corpo a sua superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem ocorrer deslizamento e ao ser atingido este ângulo, a componente tangencial é maior que a resistência ao deslizamento, que depende da sua componente normal.

De acordo com a ABNT (NBR 6502), o peso específico tem várias relações e as classifica como peso específico seco, natural, submerso e saturado:

-Peso específico seco: relação entre o volume total e o peso seco de um solo na fase sólida;

- Peso específico natural: relação entre o volume total em seu estado natural e o peso total de um solo nas fases sólidas e líquidas;
- Peso específico submerso: trata-se da relação entre o peso dos grãos de uma determinada massa de solo, subtraído do peso da água deslocada pelos grãos, e o volume total das massas;
- Peso específico saturado: é o peso específico de um solo no qual os vazios estão completamente preenchidos por água (ABNT 1995).

O peso específico submerso pode ser determinado pelo peso específico saturado menos o peso específico da água (ABNT, 1995).

2.5.2 Granulometria

Conforme Das Braja (2007), a análise granulométrica nada mais é do que uma determinação de faixa de espessuras de partículas que compõem um solo, expressas em uma porcentagem de solo seco.

De acordo com Caputo (1998), em função das dimensões das partículas e dentro de determinados limites, os solos recebem designações próprias. De acordo com a ABNT (1995), a escala Granulométrica Brasileira apresenta os valores dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação quanto à dimensão das partículas segundo a NBR 6502

Classificação	Diâmetro dos grãos
Argila	< que 0,002 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Areia	0,06 mm a 2,0 mm
Pedregulho	2,0 mm a 60 mm

Fonte: ABNT (1995)

2.5.3 Resistência ao cisalhamento

Na Engenharia, vários problemas estão relacionados com a resistência ao cisalhamento do solo e uma delas é fruto deste estudo, ou seja, estabilidade e contenção de taludes.

De acordo com Caputo (1996), a resistência ao cisalhamento, segundo a equação de Coulomb (Equação 1), se compõe basicamente de duas componentes: coesão e atrito entre as partículas. A denominação atrito interno de um solo, não possui apenas o atrito 'físico' entre as partículas, como também o 'atrito fictício' proveniente do entrosamento das partículas. A superfície de contato dos solos, não é nítida, mas sim com uma infinidade de contatos pontuais.

$$\tau = c' + \sigma' * \tan \phi' = c' + (\sigma' + u) * \tan \phi' \quad (1)$$

Onde:

c' e ϕ' = parâmetros de resistência do solo;

σ' = tensão normal efetiva;

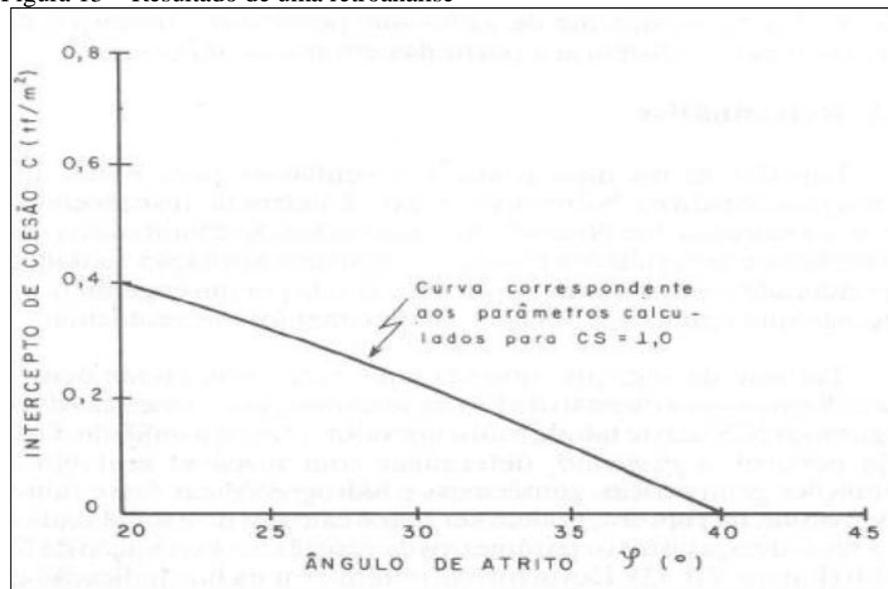
σ = tensão normal total;

u = poropressão;

2.5.4 Retroanálise

Esta técnica consiste basicamente que, quando da ruptura do talude, considera-se naquele momento que o valor do FS reduziu a um valor inferior a 1,00. Posteriormente, em uma análise determinística, essa consideração permite, através de tentativas que se calculem os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) à condição de F.S = 1,00 – conforme a Figura 13.

Figura 13 – Resultado de uma retroanálise



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

De acordo com Mesquita (2014), para obter os valores de c e ϕ , correspondentes à condição limite, é necessário realizar os cálculos de estabilidade para maior eficiência; caso seja possível, determinar as condições geométricas, geotécnicas, hidrogeológicas e da superfície de ruptura deste talude, sendo primeiramente determinado o ângulo de atrito ϕ , devido a facilidade de estimar a sua ordem de grandeza e a coesão c .

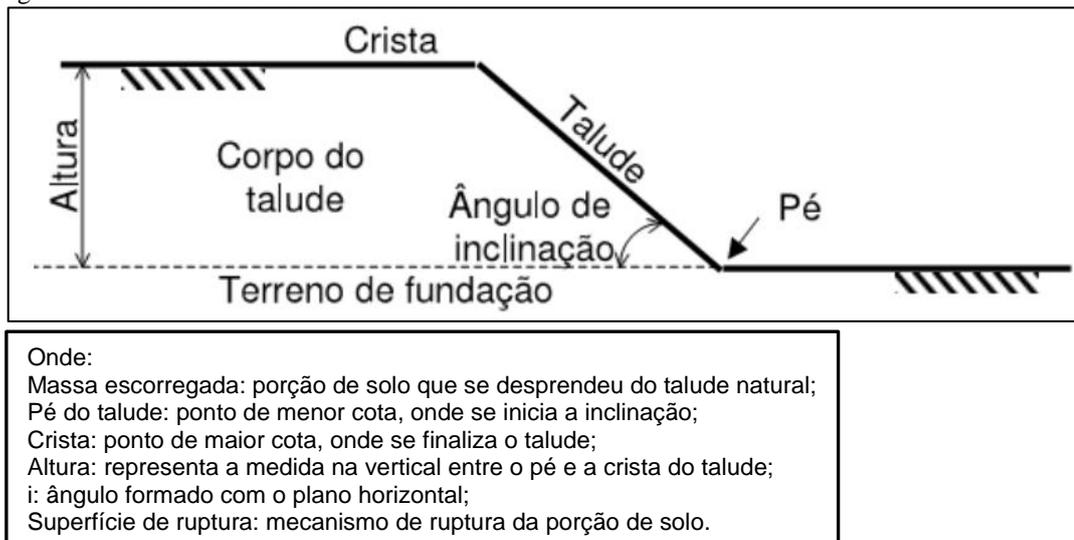
Deve-se lembrar de que os parâmetros obtidos se tratam de parâmetros médios equivalentes, correspondente ao comportamento médio do talude como um todo, os quais estavam no momento do evento (ruptura).

Esta técnica tem sido muito utilizada na avaliação do ganho de segurança com a execução de obra de estabilização de taludes rompidos ou em processo de ruptura, tendo os parâmetros de resistência obtidos através da retroanálise e, posteriormente, aplicadas técnicas de contenção de talude.

2.6 Taludes

Um talude pode ser definido como toda e qualquer superfície inclinada que delimita um maciço qualquer de solo e que pode ter deformações artificiais, como as modificações em cortes e aterros ou naturais, como em encostas. A Figura 14 apresenta algumas denominações usadas para taludes.

Figura 14 – Nomenclaturas usuais de taludes



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

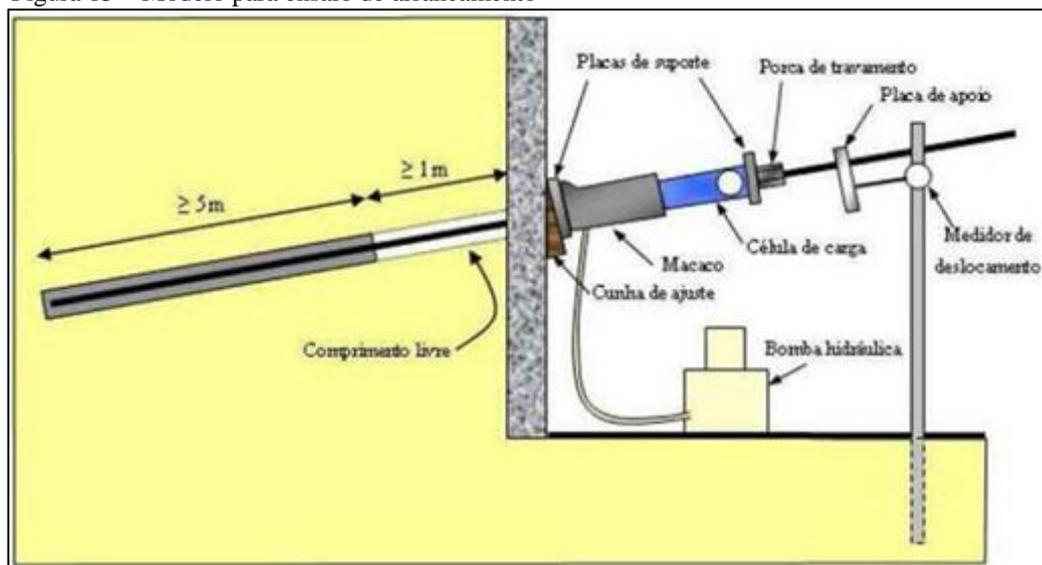
Os taludes naturais são formados por solos residuais e/ou coluvionar, que permaneceram no local em que foram gerados, ou que ganharam forma a partir de seu transporte, realizado pelos agentes transportadores. Já os taludes construídos são aqueles taludes formados pela ação antrópica, resultante de corte em encostas, escavações, aterros, etc. Ambos os taludes quando executados devem estar dentro dos parâmetros, para que possam garantir a estabilidade da obra, como os cortes tendo a altura e inclinação apropriadas e os aterros com seus devidos índices de compactação (GERSCOVICH, 2012).

2.7 Arrancamento de grampos

Um dos parâmetros mais importantes em projetos de solo grampeado é a resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo 'qs'. O valor de 'qs' é função das propriedades do solo, do grampo e da interface solo-grampo (SCHLOSSER 1993). É obtido, experimentalmente, em ensaio de arrancamento (*pull out test*), conforme demonstrado na Figura 15, que segue.

De acordo com Springer (2006), os fatores que podem influenciar os valores de 'qs' são: as características do terreno e o tipo de tecnologia empregada no processo executivo, tais como as propriedades do grampo, método de perfuração e de limpeza do furo, características da calda de cimento e o emprego de aditivos.

Figura 15 – Modelo para ensaio de arrancamento



Fonte: Pereira (2012).

Segundo a equação clássica de Mor-Coulomb (Equação 2), pode-se estimar o 'qs' por meio da expressão abaixo observando que δ' representa o ângulo de resistência ao cisalhamento efetivo. Ribeiro (2011) sugere que δ' seja igual ao ângulo de resistência ao cisalhamento efetivo do solo, ϕ' .

$$q_s = c' + 0,75 \cdot \sigma' \cdot v \cdot \operatorname{tg} \phi' \quad (2)$$

Onde:

qs: resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo;

Tn: força normal máxima (carga que leva o grampo à ruptura por cisalhamento com o solo);

ϕ' : diâmetro do furo;

Linj: comprimento do trecho injetado no grampo.

A Tabela 2, na sequência, apresenta a quantidade de ensaios de arrancamento recomendada pelo Projeto Clouterre 1991 (CLOUTERRE, 1993).

Entretanto, nas obras práticas, não ocorre o procedimento convencional, demandando assim a necessidade de adoção de valores de 'qs', com base em correlações e experiência de obras similares, conforme mostrado pelo Quadro 3, que segue.

Tabela 2 – Quantidade de ensaios de arrancamento

Ensaio de Arrancamento			
Área da face (m ²)	Preliminares e de conformidade	Área da face em (m ²)	De inspeção
Até 800	6	Até 1000.	5 (para cada camada de solo) e 1 (para cada fase de escavação).
800 a 2000	9		
2000 a 4000	12	Maior que 1000.	Aumenta-se 1 para cada 200m ² .
4000 a 8000	15		
8000 a 16000	18		
16000 a 40000	25		

Fonte: Clouterre, (1991).

Quadro 3 – Valores do parâmetro 'qs'

Material	Método Construtivo	Tipo de Solo	q _s (kPa)
Solos Arenosos	Rotativa - Grampos Injetados	areia/pedregulho	100 - 180
		areia siltosa	100 - 150
		silte	60 - 75
		colúvio	75 - 150
	Grampos Cravados	areia/pedregulho (raso)	190 - 240
		areia/pedregulho (profundo)	280 - 430
		colúvio	100 - 180
	Trado	aterro de areia siltosa	20 - 40
		areia fina siltosa	55 - 90
		areia silto-argilosa	60 - 140
Jet grouting	areia	380	
	areia/pedregulho	700	
Solos Finos	Grampos Injetados	argila siltosa	35 - 50
	Grampos Cravados	silte argiloso	90 - 140
	Trado	loess	25 - 75
		argila mole	20 - 30
		argila rija	40 - 60
		silte argiloso rijo	40 - 60
		argila arenosa (calcária)	90 - 140

Fonte: FHWA (2003).

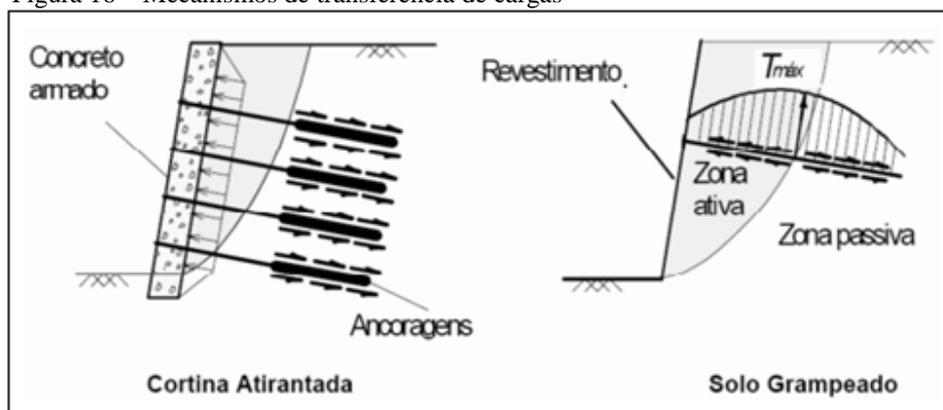
2.8 Comparativo entre solo grampeado e cortina atirantada

As duas técnicas – solo grampeado e cortina atirantada – possuem bastante semelhança em sua forma de aplicação, porém são bem diferentes quanto ao seu funcionamento. Na sequência, com base na literatura revisada, são apresentados alguns comparativos, evidenciando as principais diferenças dos dois métodos:

1. Os chumbadores aderem ao solo ao longo de todo seu comprimento, enquanto que os tirantes somente numa extensão pré-determinada, tem-se, portanto, uma diferente distribuição de tensões no solo contido (ZIRLIS; PITA, 1992);
2. Os tirantes são protendidos assim que a estrutura de contenção esta pronta, iniciando seu trabalho sem necessidade de deformação do maciço. Os chumbadores não são protendidos, necessitando que o solo se deforme para que iniciem o trabalho (ZIRLIS; PITA, 1992);
3. As ancoragens são fortemente pré-tensionadas com cargas de 150 a 1000KN, para prevenir deslocamentos da cortina, os grampos sofrem no máximo uma pequena pré-tensão, da ordem de 5 a 10KN, para garantir ligação com o concreto projetado (ORTIGÃO et al., 1994);
4. A face concretada da cortina atirantada tem função estrutural. A face dos reforços em solo grampeado tem função apenas de impermeabilização e controle de erosão (LAZARTE et al., 2003);
5. Medidas de campo em cortinas atirantadas indicam que a máxima deflexão lateral é geralmente na meia altura da parede de contenção. No solo grampeado, a máxima deflexão se apresenta no topo (LAZARTE et al., 2003);
6. A grande maioria das cortinas tradicionais tem parede moldada in loco vertical. Ao contrário os muros de solo grampeado podem facilmente ter paredes inclinadas, acompanhando a inclinação natural do terreno (ORTIGÃO et al., 1994);
7. Os tirantes são geralmente mais longos que os grampos e deste modo, necessitam de equipamentos mais pesados. O comprimento dos tirantes em relação aos chumbadores é, em geral, de 3 a 5 vezes maior (ZIRLIS; PITTA, 1992).
8. O preço por da cortina atirantada é relativamente alto quando se compara com o solo grampeado (LAZARTE et al., 2003).

Os mecanismos de transferência de cargas na cortina atirantada e no solo e no solo grampeado podem ser comparados na Figura 16.

Figura 16 – Mecanismos de transferência de cargas



Fonte: Lima (2007).

2.9 Vantagens e desvantagens do solo grampeado

Considerando outros métodos de contenção, as possíveis vantagens do solo grampeado se elencam em:

1. Segurança: a estrutura pode ser executada seguindo a inclinação do terreno, evitando instabilidades. Os deslocamentos para mobilizar a atuação dos grampos são baixos quando, logo após as escavações os grampos são inseridos no solo. Este tipo de estrutura tem um comportamento satisfatório devido principalmente a sua flexibilidade;
2. Baixo custo: na execução da obra não é necessário a mobilização expressiva de equipamentos. Apenas equipamentos para o lançamento do concreto projetado, de perfuração, de injeção de nata de cimento e equipamentos para remoção de materiais;
3. Acessibilidade: os equipamentos podem ser utilizados em áreas de grande densidade de trânsito e edificações;
4. Velocidade na construção: as escavações em solos ou rochas mais duras, que requerem maior tempo de execução por metro de perfuração, exigem comprimento de grampos menores. Também, o lançamento do concreto projetado não necessita de reparos em formas, tempo de cura e etc;
5. Facilidade de execução: os equipamentos utilizados podem ser encontrados, facilmente, no mercado e de fácil utilização;
6. Menor impacto ambiental: o procedimento executivo da contenção em solo grampeado gera pouca produção de resíduos de construção devido a quantidade reduzida de materiais utilizados.

As possíveis desvantagens do solo grampeado se elencam em:

1. Deformações: dificuldade na previsão dos deslocamentos do faceamento e dos grampos, principalmente, no caso de solos heterogêneos;
2. Nível d'água: o sistema não permite a execução em solo com o nível d'água no limite das escavações. Quando isso ocorre deve-se realizar previamente o rebaixamento do lençol freático;
3. Necessidade de coesão: o solo necessita ter coesão o suficiente para manter o corte da fase de escavação estável até que os grampos sejam inseridos;
4. Corrosão: ficar atento na injeção de nata de cimento, principalmente quanto à sua execução e ao cobrimento mínimo necessário para a proteção da barra de aço no interior do grampo contra corrosão.

2.10 Análise da estabilidade

2.10.1 Fator Segurança

Os métodos de cálculos da estabilidade de taludes expressam a estabilidade de um talude por um determinado Fator de Segurança.

O fator de segurança pode ser calculado entre os momentos resultante (M_r) e os momentos atuantes (M_a), entre as forças resultantes (F_r) e as forças atuantes (F_a), ou ainda por ambas. Isso significa que, estas relações são descritas por tudo aquilo que tende a segurar o talude, dividido por tudo que tende a derrubar, o qual a partir do resultado obtido consegue determinar a condição em que o talude se encontra (Mesquita, 2014).

O talude considerado inseguro possui $FS < 1,0$ e, caso implantado, provavelmente deveram sofrer rupturas. Porém, devido às simplificações que cada método de análise e as variações dos parâmetros geotécnicos e geométricos adotados, não são incomuns, as análises que apontam FS maiores que a unidade estejam associados a taludes instáveis (Mesquita, 2014).

Para $FS = 1$, tem-se que o talude encontra na condição limite de estabilidade, quando associado à eminência de ruptura.

Já, para taludes com $FS > 1$, tem-se condição de estabilidade; porém, quanto mais próximo de um for o FS , mais rúptil e precária será a condição de estabilidade. Por outro lado, quanto maior que um for o FS , menor serão as possibilidades de este talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condição crítica.

No Quadro 4 são apresentados os valores típicos para o FS mínimo como padrão de avaliação dos parâmetros de segurança, para projetos de taludes, conforme NBR 11682 (ABNT, 2009), podendo ser adotados fatores diferentes, desde que sejam justificados.

Quadro 4 – Valores típicos de Fator de Segurança

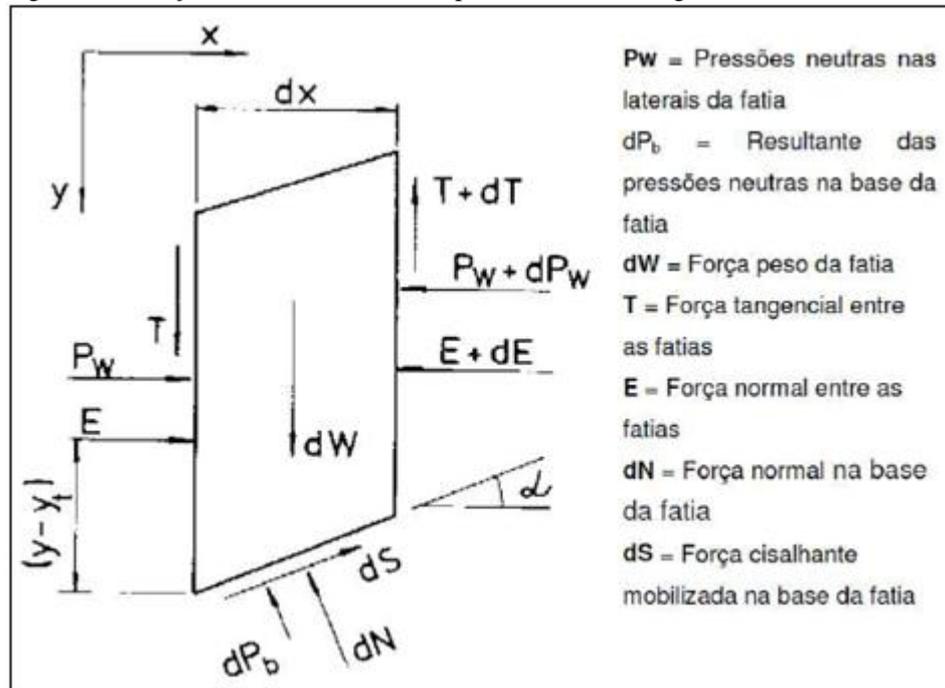
Grau de segurança necessário ao local	Métodos baseados no equilíbrio-limite	Tensão-deformação
	Padrão: fator de segurança mínimo*	Padrão: deslocamento máximo
Alto	1,50	Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser justificados.
Médio	1,30	
Baixo	1,15	

Fonte: NBR 11682/2009.

2.10.2 Método de Morgenstern & Price

O método de análise de estabilidade de talude desenvolvido em 1965 por Morgenstern & Price, baseia-se em uma análise por equilíbrio limite para uma superfície qualquer de ruptura. Trata-se de um método de análise rigoroso, em que todas as condições de equilíbrio estático estão satisfeitas. Nesse método, a massa potencialmente instável é dividida em fatias infinitesimais, e se faz necessário o uso de ferramenta computacional para execução dos cálculos (FIAMONCINI, 2009). As principais forças, entre elas a poro pressão, são apresentadas na Figura 17.

Figura 17 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern & Price



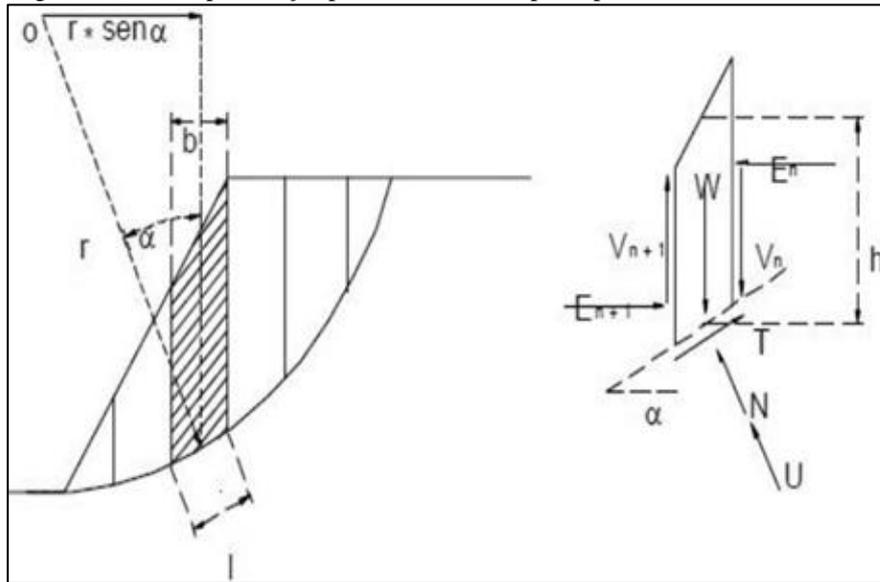
Fonte: Fiamoncini, (2009).

2.10.3 Método de Bishop Simplificado

Este método é um dos mais utilizados baseado na teoria equilíbrio limite, tendo como restrição o fato de apenas poder ser aplicado às superfícies de rupturas circulares, tendo exatidão para todas as situações.

Este método está baseado em algumas simplificações, as quais admitem: somente em superfície circular; fator de segurança constante ao longo de toda a superfície de ruptura; e que o somatório das forças verticais (X) atuantes nas fatias se anulam. As principais forças são apresentadas na Figura 18, que segue.

Figura 18 – Principais forças pelo método Bishop Simplificado



Onde:

W: peso total da lamela

N: força normal atuante na base da lamela

U: resultante das pressões neutras na base da lamela

T: força resistente na base da lamela

En, En+1 : forças horizontais nas laterais da lamela

Vn, Vn+1 : forças verticais nas laterais da lamela

b: largura da lamela

h: altura da lamela

l: comprimento da base da lamela

r: raio de círculo

O: centro de círculo

α: ângulo de atrito da lamela com a horizontal

Fonte: Mesquita (2014).

A partir do equilíbrio de forças, o fator de segurança através do método de Bishop Simplificado pode ser calculado, deste modo a saber (Equações 3 e 4):

$$F.S. = \frac{\sum [c \cdot b + (W - u \cdot b) \cdot \tan \phi] \cdot \frac{1}{Ma}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (3)$$

Sendo:

$$Ma = \left[1 + \left(\tan \phi \cdot \frac{\tan \alpha}{2} \right) \right] \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

2.11 Programa GeoStudio e o Módulo Slope Sigma

As ferramentas computacionais proporcionam uma maior possibilidade de controle e modelagem dos problemas técnicos. Junto a esse maior controle da situação em questão, ganhou-se tempo nas análises numéricas uma vez que a velocidade de entrada e saída de dados passam a ser mais rápida.

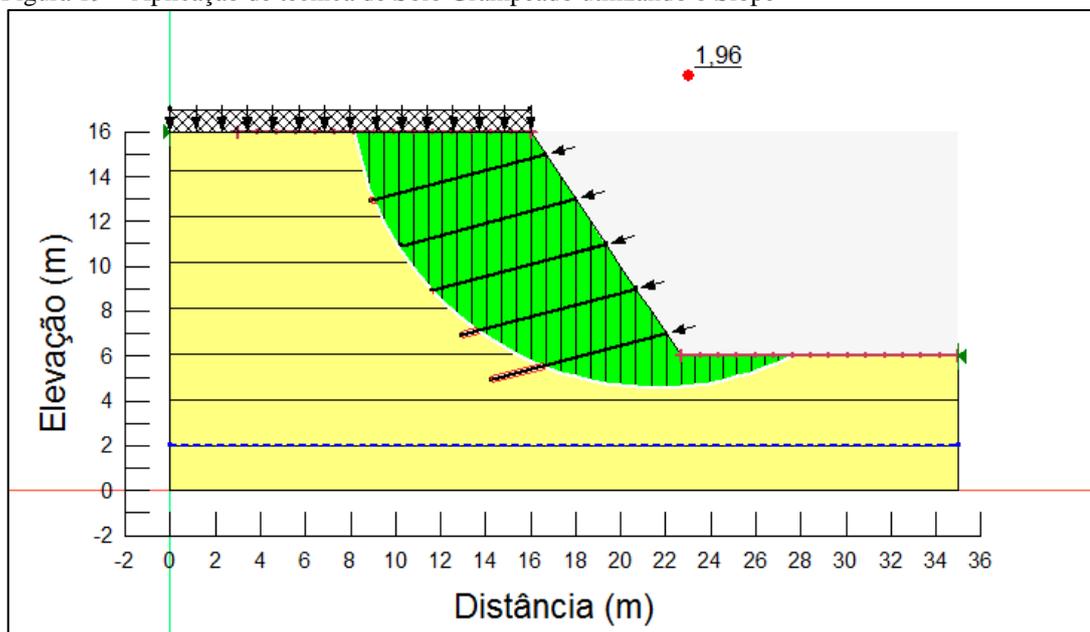
Para modelagem dos problemas de estabilidade, um dos programas presente no mercado é o GeoStudio, o qual é composto por diferentes módulos e específicas aplicações, e que servira de auxílio neste trabalho, apenas o módulo Slope/w e Sigma/w.

O módulo Sigma é destinado à realização de análises geotécnicas do tipo tensão-deformação e de estabilidade, em duas dimensões, através dos métodos dos elementos finitos (Mesquita, 2014).

O módulo Slope utiliza métodos analíticos baseado na teoria de equilíbrio limite para a realização da análise de estabilidade. Os métodos clássicos de cálculos utilizados são Fellenius, Janbu e Bissho e, através de métodos rigorosos como Spencer e Morgenstern & Price.

A interface do programa permite o desenho da geometria do problema, a estimativa da superfície potencial de ruptura e a modelagem de quatro técnicas de estabilização diversas: Solo Grampeado – como apresentado pela Figura 19 –, Tirantes, Geossintéticos e Estacas Tangente.

Figura 19 – Aplicação de técnica de Solo Grampeado utilizando o Slope



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

2.12 Análise Tensão X Deformação

Conforme Pereira (2016) o alívio progressivo das tensões no solo, em função das sucessivas fases de escavação e/ou de uma configuração de ruptura interna do maciço, geram deslocamentos laterais. Os deslocamentos da face da estrutura estão relacionados à uma série de fatores, incluindo: as alturas das fases de escavação, geometria do talude, comprimento, inclinação e espaçamento dos grampos, e capacidade de carga do solo de fundação. Para se minimizar o efeito da movimentação frontal da estrutura, pode-se conceber-se, por exemplo, o paramento inclinado para trás.

Uma vez que a escavação é feita do topo em direção ao pé do talude, as deformações tendem a ser maior na parte superior da estrutura, induzindo uma maior mobilização de esforços nos grampos mais próximos da superfície. Para poder diminuir o efeito da movimentação da estrutura para frente pode-se inclinar a face para trás. Segundo Clouterre (1993), a zona de influência dos deslocamentos fica definida pela distância S , conforme a Figura 10, dada pela seguinte relação (Equação 5):

$$S = H(1 - \tan \psi)k \quad (5)$$

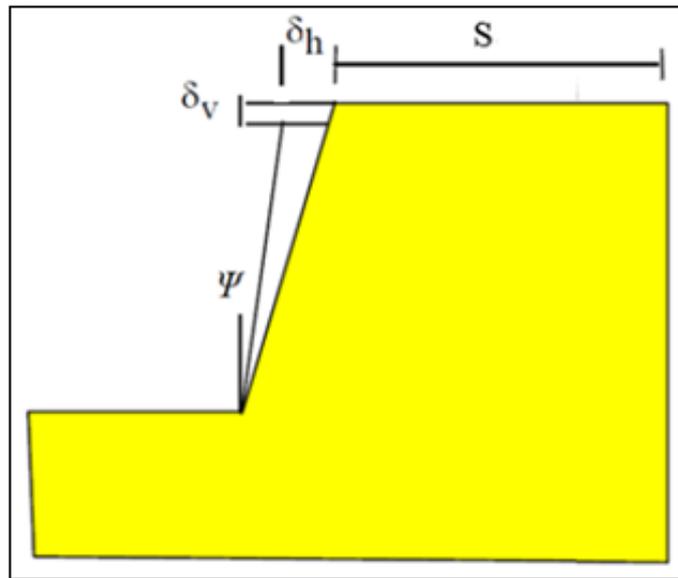
Onde:

H = altura do muro;

Ψ = ângulo de inclinação do muro em relação à vertical;

k = coeficiente que depende da natureza do solo do maciço reforçado;

Figura 20 – Domínio de influência e deslocamentos máximos



Fonte: Clouterre (1993).

Ainda, o Quadro 5 apresenta a estimativa dos valores e da influência dos deslocamentos:

Quadro 5 – Estimativa dos valores e da influência dos deslocamentos

	Solos intermediários (rochas)	Areia	Argila
$\delta_v = \delta_h$	H/1000	2H/1000	4H/1000
κ	0,8	1,25	1,5

Fonte: Clouterre (1993).

De acordo com Pereira (2016), estes deslocamentos mobilizam uma redistribuição dos esforços internos atuantes ao longo das interfaces solo-reforço que tendem a minimizar movimentações adicionais da massa de solo grampeado. Neste contexto, as análises destas estruturas considerando abordagens em termos de tensões *versus* deformações, tornam-se muito mais realistas e muito mais interessantes de aplicação em projetos reais.

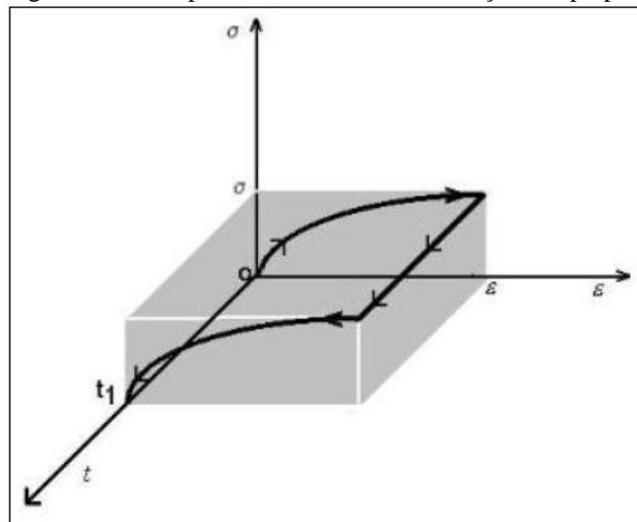
Segundo Porto (2010), o modelo do comportamento de um determinado material, chamado de modelo reológico, é obtido a partir de uma combinação de modelo básico, de modo a obter o máximo grau de aproximação. Esse modelo deve ser sempre representado por uma relação entre a tensão, deformação e o tempo.

Os modelos básicos são aqueles que admitem que a tensão é linearmente dependente da deformação, constante com a deformação e linearmente dependente da velocidade de deformação. Os principais são o elástico, o plástico e o elastoplástico – explanados na sequência.

2.12.1 Modelo elástico

O regime elástico é aquele que se deforma imediatamente, não variando com o tempo. As deformações que ocorrem são reversíveis e a nível atômico. Os efeitos dessa deformação são observáveis numa escala macroscópica, resultantes da interação do espaço interatômico para balancear as cargas externas e, também, dos movimentos reversíveis de deslocamento, segundo a curva de deslocamento representado na Figura 21.

Figura 21 – Comportamento tensão-deformação-tempo para modelo elástico



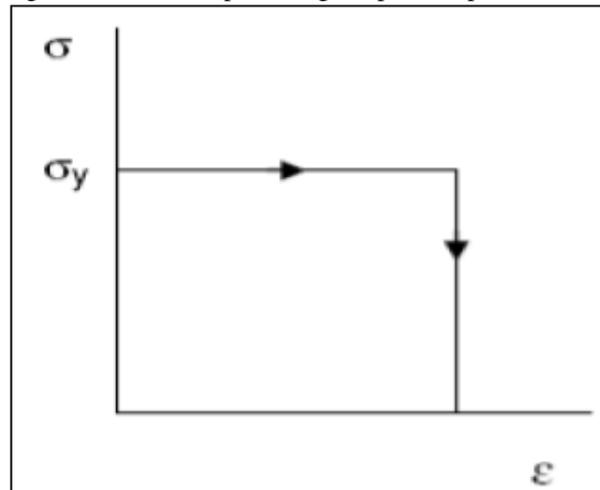
Fonte: Reis (2000).

2.12.2 Modelo plástico

Para Pockszevnicki (2004), o regime plástico após cessado o carregamento a seção não desfaz sendo irreversível ou permanente. Essas deformações irreversíveis podem ser plásticas ou viscosas, ocorre a nível cristalino em adição a parcela de deformação elástica. Correspondem ao relativo deslocamento atômico após a remoção da carga.

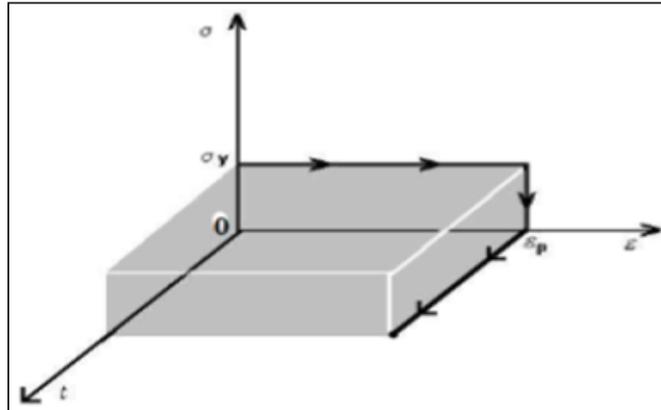
No modelo plástico, ao se aplicar um esforço externo em um corpo, este não sofrerá deformação até um determinado limite de tensão, caracterizado pela tensão de escoamento σ_y , a partir do qual o corpo sofrerá deformações plásticas ou permanentes, conforme as Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Modelo para o regime plástico perfeito



Fonte: Porto (2010).

Figura 23 – Comportamento tensão-deformação para modelo plástico

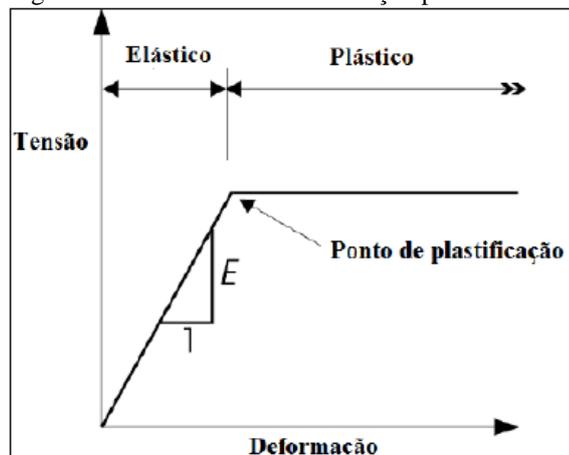


Fonte: Reis (2000).

2.12.3 Modelo elasto-plástico

O modelo elasto-plástico é baseado na curva de tensão deformação representada na Figura 24. Ao analisar a curva, pode-se observar que ela descreve elástico em que o aumento de tensões é proporcional ao aumento de deformações e o módulo de elasticidade de Young (E) é constante até que seja atingido o ponto de plastificação, a partir desse momento inicia-se o processo de plastificação de uma região do maciço em que há aumento de deformação no mesmo sem o aumento de tensão (PEREIRA, 2016).

Figura 24 – Curva tensão-deformação para modelo elasto-plástico



Fonte: Moraes (2016).

2.13 Concepção geral de projeto

De acordo com Pereira (2016), a concepção do projeto deve ser baseada em: informações sobre o solo (parâmetros geotécnicos), geometria da face, posição do lençol freático, cargas atuantes e sistema solo/grampo. As investigações geotécnicas devem abranger ensaios em campo e/ou em laboratórios e a definição do perfil geológico/geotécnico do terreno. Um dos fatores mais relevantes a um bom projeto está relacionado à adequada caracterização dos sistemas de água subterrâneas e superficiais da área e no entorno do talude local.

Devem ser avaliados diferentes tipos de combinações e carregamentos de cargas no projeto, incluindo as cargas permanentes, variáveis e acidentais. A combinação mais crítica destes esforços vai nortear premissa adotada em projeto.

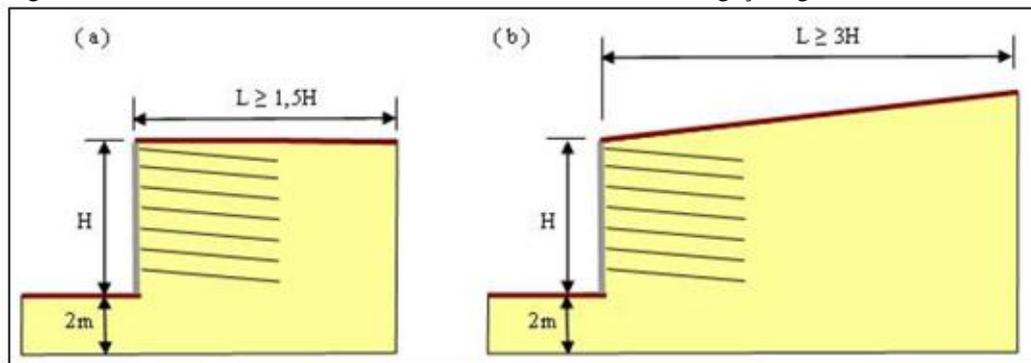
É necessário, sempre, uma criteriosa avaliação prévia das resistências dos grampos, das técnicas de instalação, da geometria e durabilidade do grampo e da sua resistência ao arrancamento. Para obras em área urbana, é importante obter informações sobre as fundações dos vizinhos e se existem alguma instalação que possa interferir no grampeamento do solo.

2.13.1 Investigações geotécnicas

As investigações geotécnicas têm como objetivo fornecer dados relativos ao comportamento dos solos. Eles serão utilizados no projeto e na execução dos solos grampeados e também no monitoramento da interação entre a obra e estruturas vizinhas.

De acordo com Clouterre (1993), é recomendado que as investigações geotécnicas sejam executadas até uma distância mínima de uma vez e meia a altura do muro, quando o terreno de montante for horizontal (a), e três vezes quando o terreno de montante for inclinado (b), conforme a Figura 25, respectivamente.

Figura 25 – Limite das áreas onde devem ser executadas as investigações geotécnicas



Fonte: Clouterre (1993).

Sugere-se que ensaios *in situ* e de laboratório sejam executados para identificar o solo, determinar seus parâmetros de resistência e medir a resistência ao cisalhamento de interface. A identificação de solos não coesivos se resume à análise granulométrica e a determinação do teor de umidade natural. Em solos coesivos devem ainda ser determinados os limites de *Atterberg*, massa específica total e massa específica seca.

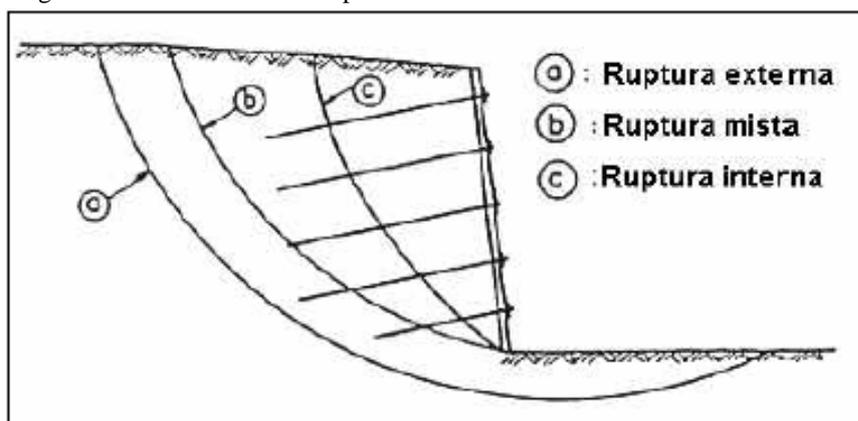
Os parâmetros de resistência devem ser determinados por ensaios triaxiais, de cisalhamento direto ou de arrancamento. Nos materiais não coesivos, as correlações entre o ângulo de atrito interno e os ensaios de *Standard Penetration Test* (SPT) e *Cone Penetration Test* (CPT) podem ser utilizadas. Para solos coesivos recomenda-se a determinação dos parâmetros de resistência nas situações de curto e longo prazo, através de ensaios triaxiais não drenados e drenados, respectivamente.

É importante determinar o potencial corrosivo dos solos devido a seu contato direto com os grampos. Clouterre (1993), sugere um índice de potencial corrosivo baseado no tipo, resistividade, teor de umidade e pH do solo. Estudos hidrogeológicos devem ser executados para determinar o nível d'água e suas variações bem como o regime de fluxo que ocorre no solo.

2.13.2 Tipos de ruptura

Quando se executa uma construção de uma estrutura em solo grampeado, o principal interesse é o de garantir a sua estabilidade e segurança. Análises da interação solo-grampo em sistemas de contenção com solo grampeado apresentam três tipos de ruptura global: ruptura interna, ruptura externa e ruptura mista, como demonstra a Figura 26. Para ruptura mista e interna, devem ser considerados alguns modelos de rupturas locais: arrancamento dos grampos e quebra ou ruptura dos grampos.

Figura 26 – Mecanismos de ruptura



Fonte: Clouterre (1993).

Pode-se, ainda, fazer uma distinção entre a ruptura interna do solo grampeado e a ruptura externa na qual a parede comporta-se como um bloco monolítico.

A ruptura externa ocorre geralmente por deslizamento do terreno ao longo de uma superfície de ruptura afetando a estrutura como um todo e atingindo diretamente as fundações. Este tipo de ruptura é comum em todos os tipos de contenção e pode ser resultado da má qualidade do solo da fundação ou por comprimento dos grampos insuficientes.

Em relação à ruptura mista, estudos realizados por Schlosser (1993), em 3 obras experimentais em larga escala, confirmam a configuração de ruptura interna associada à subestimação do atrito lateral solo-grampo (ruptura por arrancamento dos grampos) e quebra dos grampos. Mecanismo de ruptura mista também foi observado e atribuído a insuficiência no comprimento dos grampos.

Já, conforme Lima (2002), a ruptura interna é subdividida em 4 tipos, sendo eles: ruptura por quebra de grampos; ruptura por perda de aderência no contato solo-grampo; ruptura devido à altura elevada nas etapas de escavação e; ruptura por erosão interna do solo ou '*piping*'.

Em relação à ruptura por quebra dos grampos, uma zona de cisalhamento no solo se desenvolve numa região que abrange a linha de maior tensão nos grampos que pode ser

considerada como a provável superfície de ruptura do solo. A resistência a flexão dos grampos previne o desenvolvimento da superfície de ruptura. Em grampos flexíveis, a ruptura pode ocorrer sem aviso prévio. Este tipo de ruptura pode acontecer em função de alguns aspectos: (1) saturação do solo por infiltração de água; (2) processo de corrosão nos grampos; (3) diâmetro do grampo subestimado e; (4) sobrecarga no topo da estrutura na previsto;

Ruptura por perda de aderência no contato solo-grampo como resultado de estimativas inadequadas do atrito unitário solo grampo (q_s) e/ou por falhas na execução da estrutura caracteriza-se pelo fato dos grampos não apresentarem comprimento suficiente na zona passiva, capaz de balancear as tensões máximas. Os grampos são então arrancados para fora do solo. Este tipo de ruptura pode acontecer em função de alguns aspectos: (1) falta de comprimento dos grampos na zona passiva ou falhas na estimativa do atrito unitário solo-grampo (q_s) e; (2) aumento do teor de umidade em solos de granulometria fina;

Em relação à ruptura devido à altura elevada nas etapas de escavação, tem-se que, se a altura da escavação for elevada, a ruptura poderá ocorrer devido a uma instabilidade local, a qual pode se propagar até o topo da estrutura. Neste tipo de ruptura, o solo flui atrás da face devido à sucessiva eliminação do efeito de arqueamento do solo.

Por fim, em relação à ruptura por erosão interna do solo ou '*piping*', durante a escavação, a poro-pressão existente em bolsões de água no solo (em função do grampeamento) juntamente com forças de percolação, destroem a estabilidade do solo localmente em zonas onde estão sendo escavadas. Este tipo de ruptura pode ser resultado da heterogeneidade do solo e/ou por falta de sistemas de drenagem durante as etapas de construção.

3 CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO – ESTUDO DE CASO

3.1 O caso

Neste trabalho será analisado o estudo de caso de uma estrutura de contenção em solo grampeado, executado às margens da Rodovia Fernão Dias – conforme a Figura 27 –, no município de Três Corações/MG. Trata-se de uma estrutura destinada à contenção de um talude com aproximadamente 19,00 metros de altura, que já ocorreram vários deslizamentos entre os anos de 2009 e 2012.

Figura 27 – Vista frontal do talude na Rodovia Fernão Dias



Fonte: Mesquita, 2014.

3.2 Parâmetros adotados nas análises de estabilidade

3.2.1 Parâmetros do solo

De acordo com o trabalho de conclusão de curso de Mesquita 2014, onde foi realizado no mesmo talude do presente do trabalho foram realizadas sondagens à percussão no local de estudo, para poder definir os tipos de materiais que compõe o talude. Com os tipos de materiais encontrados, podem-se obter valores estimados dos parâmetros de resistência do

solo. Para obter o valor estimado do peso específico foi utilizado dados proposto pelo Quadro 6.

Quadro 6 – Peso específico dos solos arenosos (uso limitado a estudos preliminares)

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (KN/m ³)		
		Areia seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Pouco compacta			
9 - 18	Mediamente compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito compacta			

Fonte: Mesquita (2014).

Os valores estimados de coesão e ângulo de atrito foram obtidos através do trabalho acadêmico realizado por Mesquita (2014), onde se tratava do mesmo talude, donde se elaborou Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros do solo

Tipo de Solo	N _{spt}	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Solo 1 - Areia	7	16	0	25
Solo 2 - Silte	16	17	8,4	28
Solo 3 - Areia muito compactada	43	18	15	35

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Parâmetros dos grampos

Como o fator de segurança da estabilidade global do talude foi inferior ao desejado, foi inserido os grampos para observar como se comporta esse talude e o seu valor do fator de segurança. Para um pré-dimensionamento serão utilizados os seguintes parâmetros:

1. Diâmetro do bulbo (*Bond diameter*) igual 0,10 metros, abertura suficiente para envolver totalmente uma barra de ϕ 32,00 mm pela calda de cimento que é normalmente o diâmetro máximo usado;
2. Fator de segurança da interface solo/bulbo (*Bond safety fator*) igual a 1,5, valor recomendado pela literatura;

3. Resistência unitária ao cisalhamento (*Bond skin friction*) variando entre 17 e 107 kPa;
4. Espaçamento horizontal dos grampos (*Nail Spacing*) igual a 1,50 metros, onde a literatura especializada recomenda no máximo 2,00 metros;
5. Carga máxima do elemento de reforço (*Bar capacity*) igual a 15.000 kN, uma vez que não interessa para análise proposta a possibilidade de ruptura dos grampos, pois no momento a análise é referente apenas às características do solo;
6. Fator de segurança estrutural da barra (*Bar safety fator*) adotado 1,0, pois não há necessidade de majorar para os resultados que precisamos encontrar;
7. Resistência ao cisalhamento da estrutura (*Shear capacity*) adotou-se 0, pois este tipo de resistência é desconsiderado em projetos de contenção em solo grampeado;
8. Fator de segurança contra o cisalhamento (*Shear safety*) adotou-se 1, pois não há necessidade de majorar nesta etapa onde analisamos apenas estabilidade global do talude;
9. Comprimento do grampo (*Lenght*) de 10 e 12,00 metros;

Os valores de Q_s (força de arrancamento) dos grampos foram obtidos por meio de dois métodos, o primeiro utilizando a Equação 2, proposta por Ribeiro, 2011, chegando-se aos dados do Quadro 8.

Quadro 8 – Força de arrancamento pelo método de Ribeiro (2011)

Grampo	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Qs no grampo (kPa)
1	16,0	0,0	25,0	8,2
2	16,0	0,0	25,0	12,1
3	16,0	0,0	25,0	16,0
4	16,0	0,0	25,0	19,9
5	16,0	0,0	25,0	25,2
6	16,0	0,0	25,0	31,5
7	16,0	0,0	25,0	37,9
8	16,0	0,0	25,0	44,3
9	16,0	0,0	25,0	50,7
10	17,0	8,4	28,0	15,9
11	17,0	8,4	28,0	23,4
12	17,0	8,4	28,0	34,2
13	17,0	8,4	28,0	42,9
14	17,0	8,4	28,0	51,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo método foi utilizado valores proposto pelo Quadro 3 (FHWA, 2003), aonde foram obtidos os resultados fornecidos no Quadro 9.

Quadro 9 – Força de arrancamento pelos parâmetros do Quadro 3

Grupo	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Qs no grupo (kPa)
1	16,0	0,0	25,0	150,0
2	16,0	0,0	25,0	150,0
3	16,0	0,0	25,0	150,0
4	16,0	0,0	25,0	150,0
5	16,0	0,0	25,0	150,0
6	16,0	0,0	25,0	150,0
7	16,0	0,0	25,0	150,0
8	16,0	0,0	25,0	150,0
9	16,0	0,0	25,0	150,0
10	17,0	8,4	28,0	150,0
11	17,0	8,4	28,0	150,0
12	17,0	8,4	28,0	75,0
13	17,0	8,4	28,0	75,0
14	17,0	8,4	28,0	75,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28 representa a entrada de dados dos parâmetros dos grampos para poder dar início na modelagem.

Figura 28 – Entrada de dados dos grampos no programa Slope/W do estudo de caso

Draw Reinforcement Loads

Reinforcement

Type: F of S Dependent: Load Distribution: Length: Direction:

Bond Diameter: Bar Capacity:

Bond Safety Factor: Bar Safety Factor:

Bond Skin Friction (F/Area): Shear Capacity:

Nail Spacing: Shear Safety:

Apply Shear:

Applied Load: 0 - 157.08 kN Bond Resistance: 10.472 kPa

Done

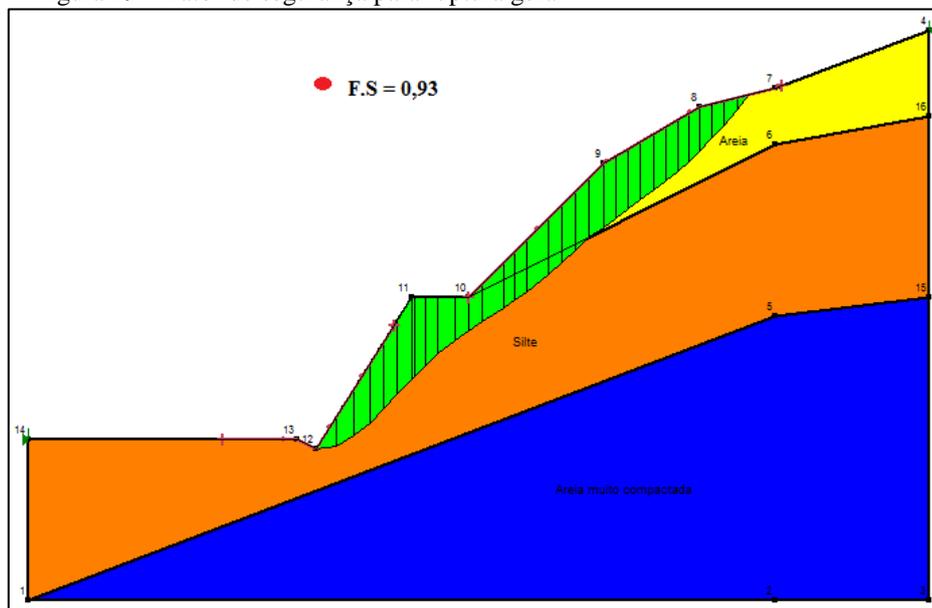
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Resultados das análises de estabilidade

3.3.1 Resultado estabilidade global do tabule natural

Com os parâmetros do solo definidos, pode-se dar entrada no *software* GeoStudio 2007, para obter-se um fator de segurança global da estrutura e o delineamento da sua superfície de ruptura, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Fator de segurança para ruptura geral



Fonte: Elaborada pelo autor.

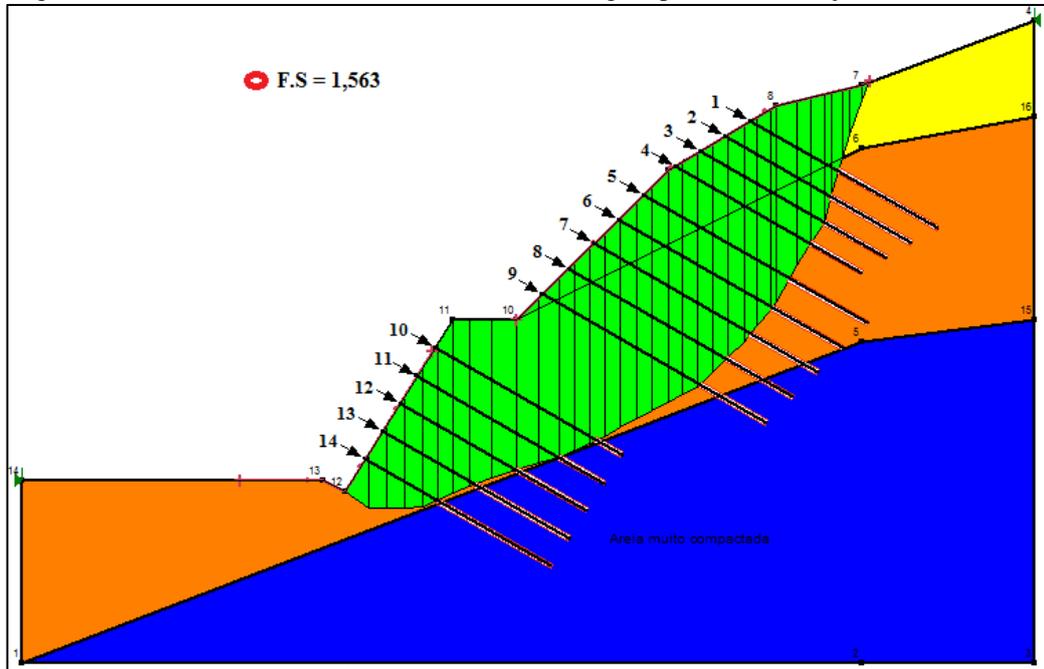
Com os dados processados, pode-se observar que o fator de segurança está abaixo de 1,00 – o que significa um possível deslizamento na zona ativa, um fator de segurança aceitável para que não ocorra deslizamento seria igual ou superior a 1,50. Portanto, foi escolhido utilizar o solo grampeado como método de contenção da estrutura.

3.3.2 Resultado da análise de estabilidade do talude grampeado

Utilizando o método de Morgenstern & Price, foram feitas as análises por equilíbrio limite da estabilidade do maciço em solo grampeado, com base na geometria de projeto do

estudo de caso, com os grampos inclinados de 10° a 35° com a direção horizontal – de acordo com a Figura 30.

Figura 30 – Análise da estabilidade do estudo de caso (grampos com inclinação de 30°)



Fonte: Elaborada pelo autor.

O coeficiente de segurança resultante foi de 1,563, utilizando os q_s obtido no Quadro 09, com um acréscimo de aproximadamente 68% em relação ao fator de segurança antes de ser grampeado, demonstrando que houve um reforço do maciço considerável. O Quadro 10 apresenta os valores de F.S. mínimos obtidos para a variação de inclinação entre 10° e 35°.

Quadro 10 – FS mínimos em função da inclinação dos grampos

Inclinação do grampo (°)	Fator de segurança (FS)
10	1,415
15	1,494
20	1,510
25	1,560
30	1,563
35	1,547

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o mesmo, o fator de segurança mínimo está no grampo analisado de menor inclinação, sendo 10° e o máximo está no grampo com inclinação de 30°, onde não é a inclinação máxima analisada – podendo identificar que o fator de segurança aumenta de acordo com o aumento da inclinação até um determinado ponto (entre 10° e 30°). Em seguida,

ele volta a diminuir, sendo assim, não é possível dizer que quanto maior a inclinação de um grampo, melhor será garantida a estabilidade do talude. Com essas análises podemos observar que conseguimos aumentar o fator de segurança sem modificar os materiais, apenas mudando a sua inclinação.

3.4 Parâmetros adotados nas análises Tensão-Deformação

3.4.1 Parâmetros dos Solos

Os parâmetros geotécnicos do solo foram os mesmos parâmetros adotados nas análises de estabilidade (conforme o Quadro 7). Admitiu-se um modelo de tensão elasto-plástico para o devido solo, com módulo de elasticidade igual a 9200 kPa, coeficiente de Poisson igual a 0,35 (conforme tabela abaixo).

Tabela 3 - Valores de coeficientes de Poisson para diferentes tipos de solos.

Solo	Coefficiente de Poisson (ν)
Argila saturada	0,4-0,5
Argila não-saturada	0,1-0,3
Argila arenosa	0,2-0,3
Silte	0,3-0,35
Areia compacta	0,2-0,4
Areia grossa ($e = 0,4$ a $0,7$)	0,15
Areia fina ($e = 0,4$ a $0,7$)	0,25
Rocha (depende do tipo)	0,1-0,4
Concreto	0,15
Gelo	0,36

Fonte: Parâmetros dos solos para cálculo de fundação – UFJF – Prof. M Marangon.

3.4.2 Parâmetros dos Grampos

Mantidos os parâmetros geométricos da análise de estabilidade, os grampos são modelados como elemento de viga na concepção do software GeoStudio, a partir dos seguintes dados:

- *E-Modulus* (módulo de elasticidade equivalente do grampo): estimando com base na resistência característica à compressão do concreto (F_{ck}), para valores entre 20MPa e 50mPa (NBR 6118,2014), expresso pela seguinte relação:

$$E = \frac{(\alpha e \times 5600 \sqrt{fck})}{Sh} \quad (6)$$

Sendo o αe associado à natureza do agregado do concreto. Para um valor de $fck = 30$ mPa e de $\alpha e = 1,0$, resulta em:

$$E = \frac{(1,0 \times 5600 \sqrt{30})}{1,0} = 30672 \text{ mPa} \quad (7)$$

- *Cross-sectional Area* (área da seção transversal do grampo): A área da seção transversal do grampo é expressa em função do seu diâmetro, dado por:

$$A_{\text{grampo}} = \pi \times r^2 \quad (8)$$

$$A_{\text{grampo}} = \pi \times 0,05^2$$

$$A_{\text{grampo}} = 7,854 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

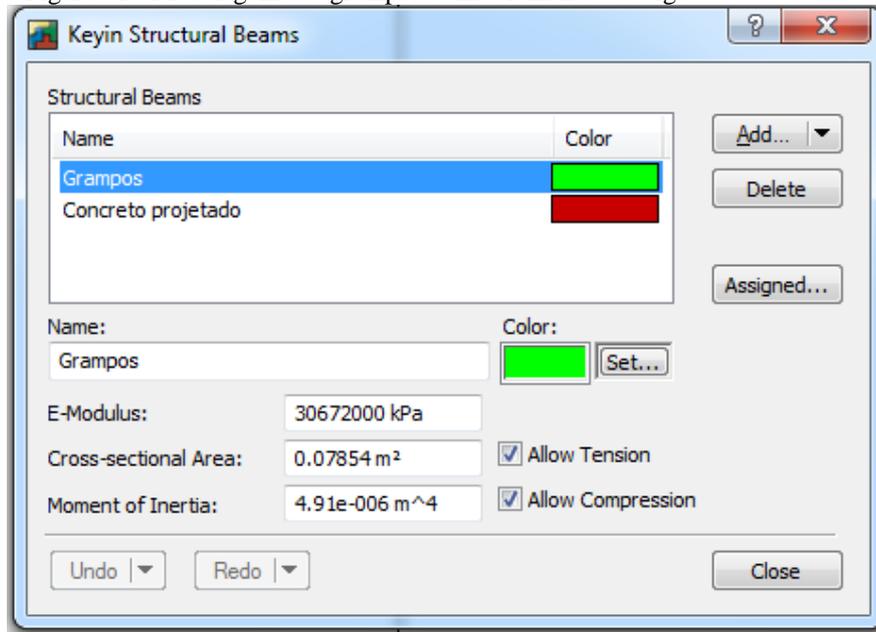
- *Momento f inertia* (momento de inércia da seção transversal do grampo): O momento de inércia do grampo é dado pela seguinte equação:

$$I_{\text{grampo}} = \frac{\pi \times D^4}{64} \quad (9)$$

$$I_{\text{grampo}} = \frac{\pi \times 0,10^4}{64}$$

$$I_{\text{grampo}} = 4,91 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Figura 31 - Modelagem dos grampos como elementos de viga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Parâmetros do Paramento

Na concepção do GeoStudio, os paramentos (concreto projetado) também são modelados como elementos de vigas, a partir dos seguintes dados:

- *E-modulus* (módulo de elasticidade do material): É o mesmo valor do módulo de elasticidade equivalente do grampo $E = 30672 \text{ mPa}$, estimado para um valor de $f_{ck} = 30 \text{ mPa}$
- *Cross-sectional Area* (área da seção transversal do paramento): É estimado por metro do paramento em função da sua espessura (e). Para $e = 10 \text{ cm}$ adotado, resulta em:

$$A_{\text{paramento}} = e \times S \quad (10)$$

$$A_{\text{paramento}} = 0,10 \times 1$$

$$A_{\text{paramento}} = 0,10 \text{ m}^2$$

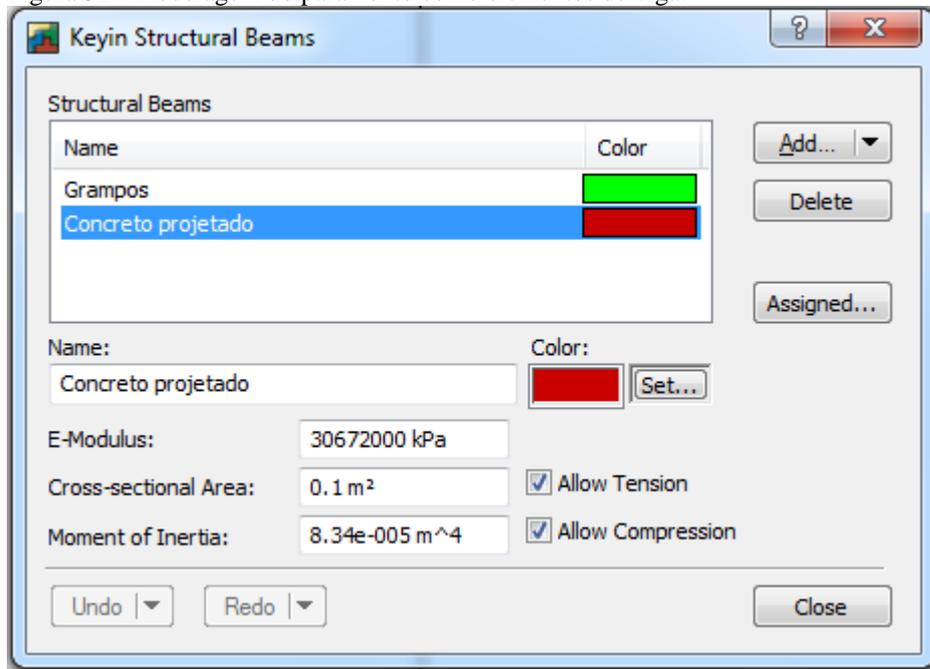
- *Momento of inertia* (momento de inércia do paramento): para um comprimento unitário da seção do paramento, é dado pela relação:

$$I_{paramento} = \frac{s \times e^3}{12} \quad (11)$$

$$I_{paramento} = \frac{1,0 \times 0,1^3}{12}$$

$$I_{paramento} = 8,34 \times 10^{-5} m^4$$

Figura 32 - Modelagem do paramento como elementos de viga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

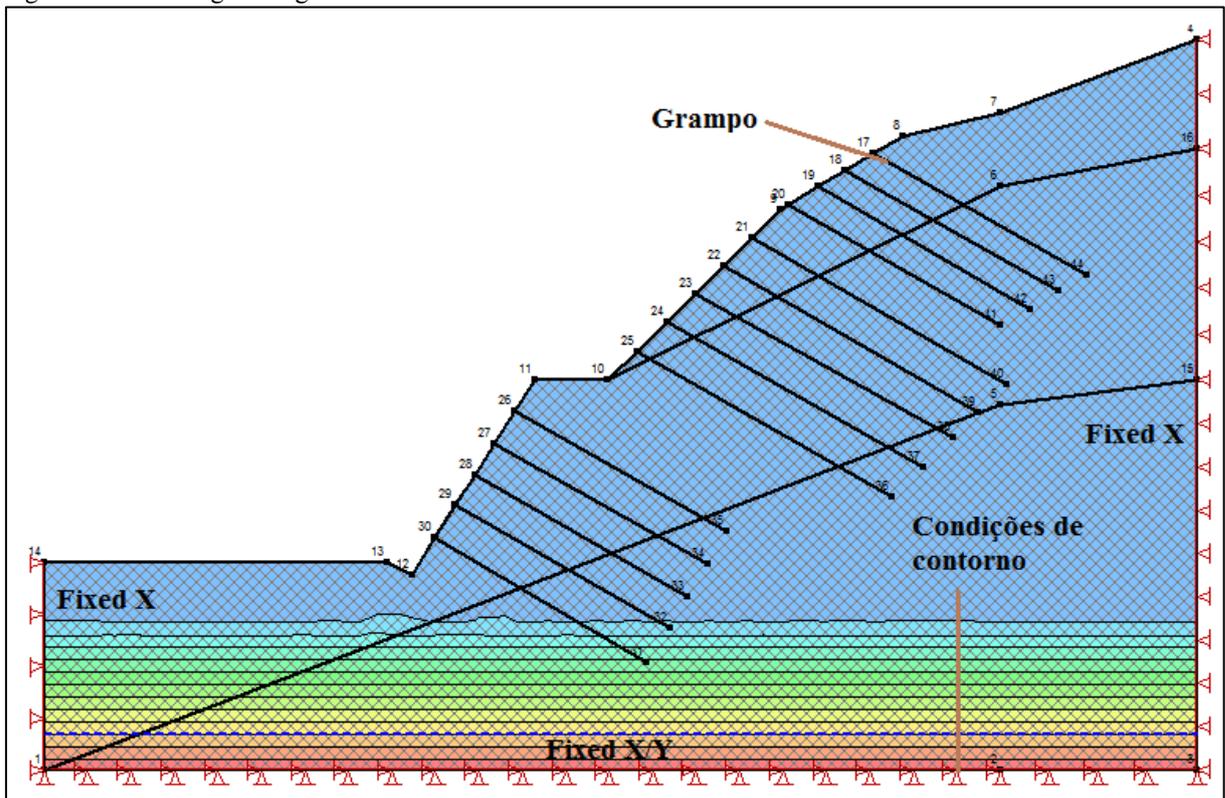
3.5 Análise de deslocamentos

No software GeoStudio 2007 é utilizado o módulo Sigma/W, onde é realizada a simulação Tensão-Deformação. Inicialmente implementa-se a rotina “Insitu”, onde é realizada a modelagem inicial do problema com a introdução dos parâmetros dos grampos, dos paramentos de face e formulação das condições de contorno do caso estudado.

As condições de contorno foram estabelecidas de maneira que, no limite inferior da geometria do problema (linha horizontal da simulação), são impedidos os deslocamentos do maciço nas direções horizontal e vertical (X e Y, respectivamente) e nas linhas verticais da

esquerda e direita da simulação, onde são impedidos os deslocamentos horizontais (Figura 33).

Figura 33 - Modelagem da geometria "Insitu"

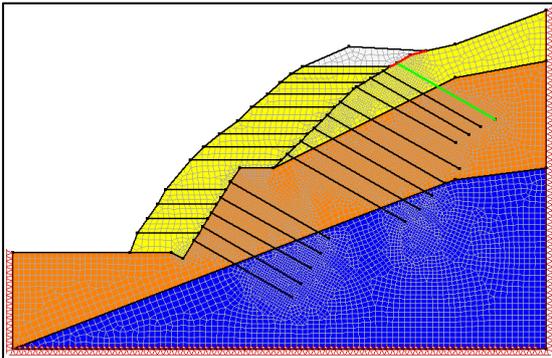


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida é feito automaticamente a malha de elementos finitos por meio da entrada de dados de uma malha padrão, definida por 9.228 nós e 9.508 elementos com dimensões de aproximadamente 0,10m x 0,10m. Com a malha definida, foi dado início as etapas de escavação do talude, onde se promoveu a remoção de uma camada de solo de aproximadamente 1,50m de profundidade demonstrando a primeira etapa de escavação com a inserção do grampo e do paramento.

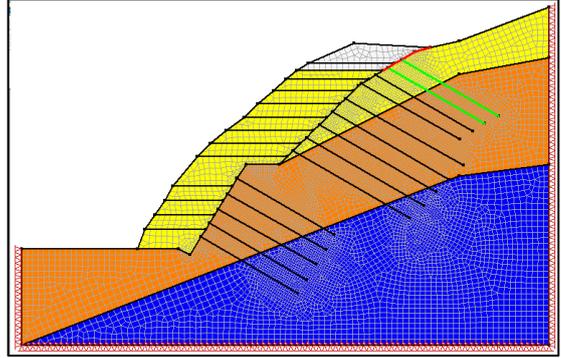
Posteriormente, foram realizadas mais 13 simulações iguais a primeira, porém, com a profundidade da escavação variando entre 0,80m e 1,5m, aplicando-se os mesmos procedimentos, inserindo o grampo e o paramento.

Figura 34 - 1ª escavação



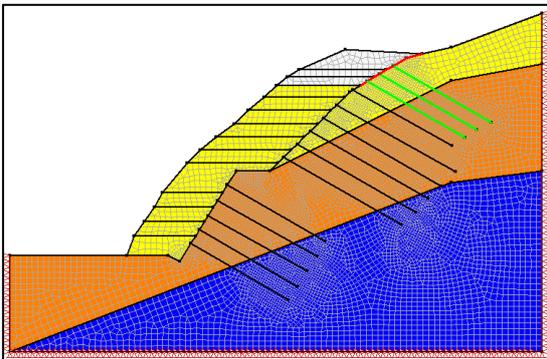
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 - 2ª escavação



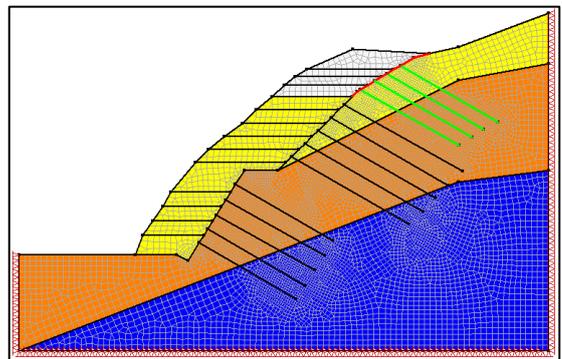
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 - 3ª escavação



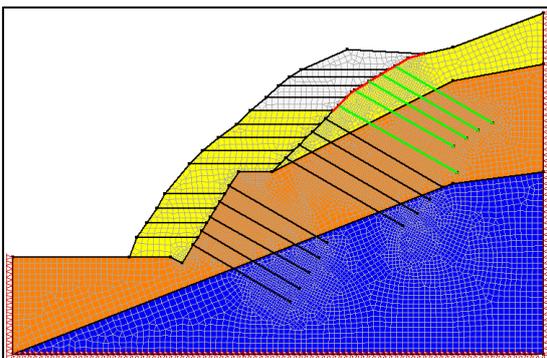
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 - 4ª escavação



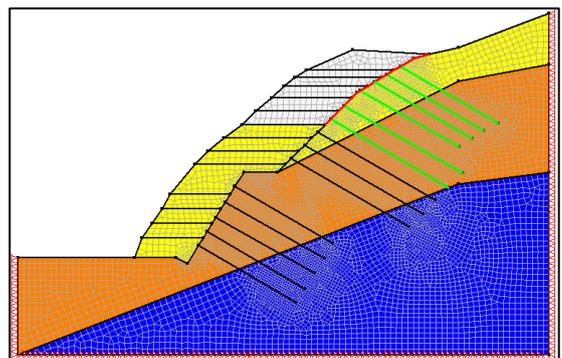
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 - 5ª escavação



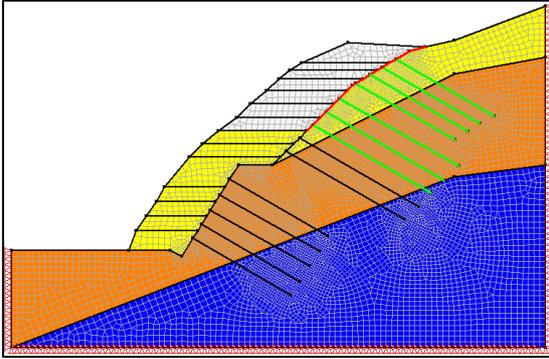
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 - 6ª escavação



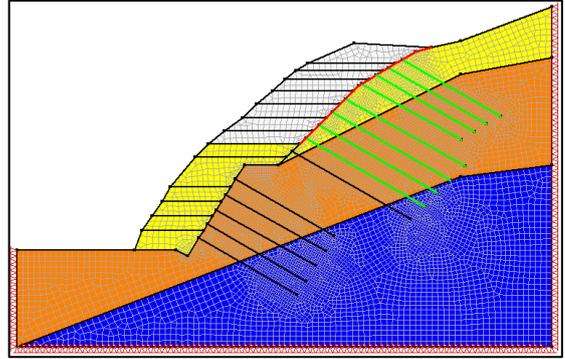
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 - 7ª escavação



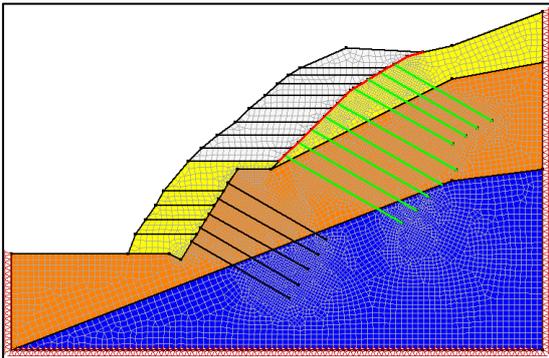
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 - 8ª escavação



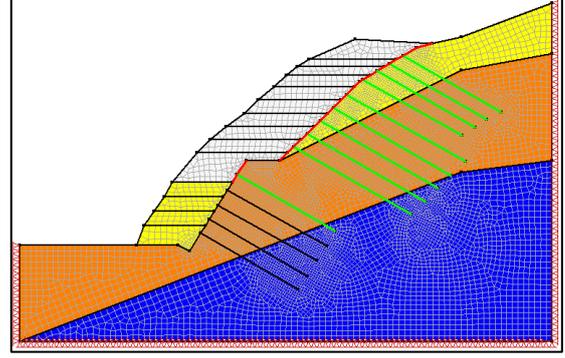
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42 - 9ª escavação



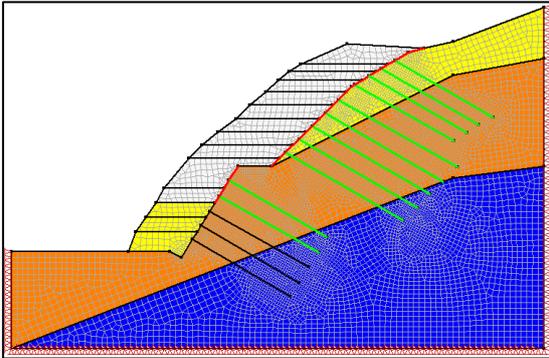
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 - 10ª escavação



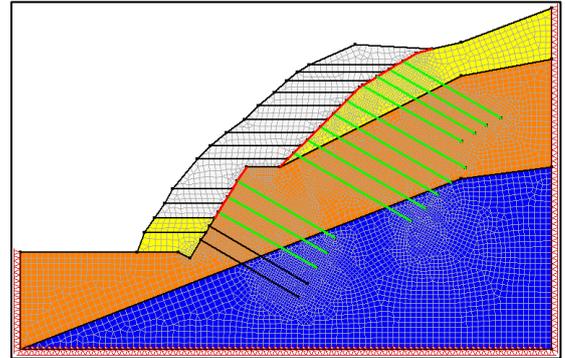
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 - 11ª escavação



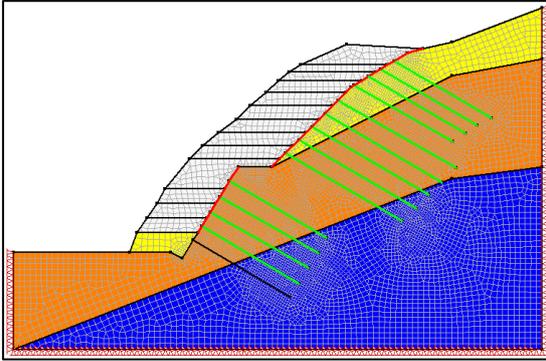
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 - 12ª escavação



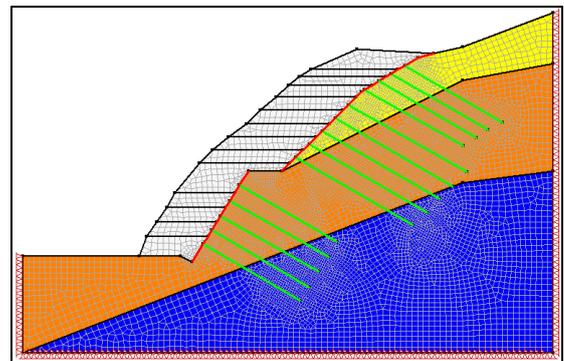
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 - 13ª escavação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47- 14ª escavação



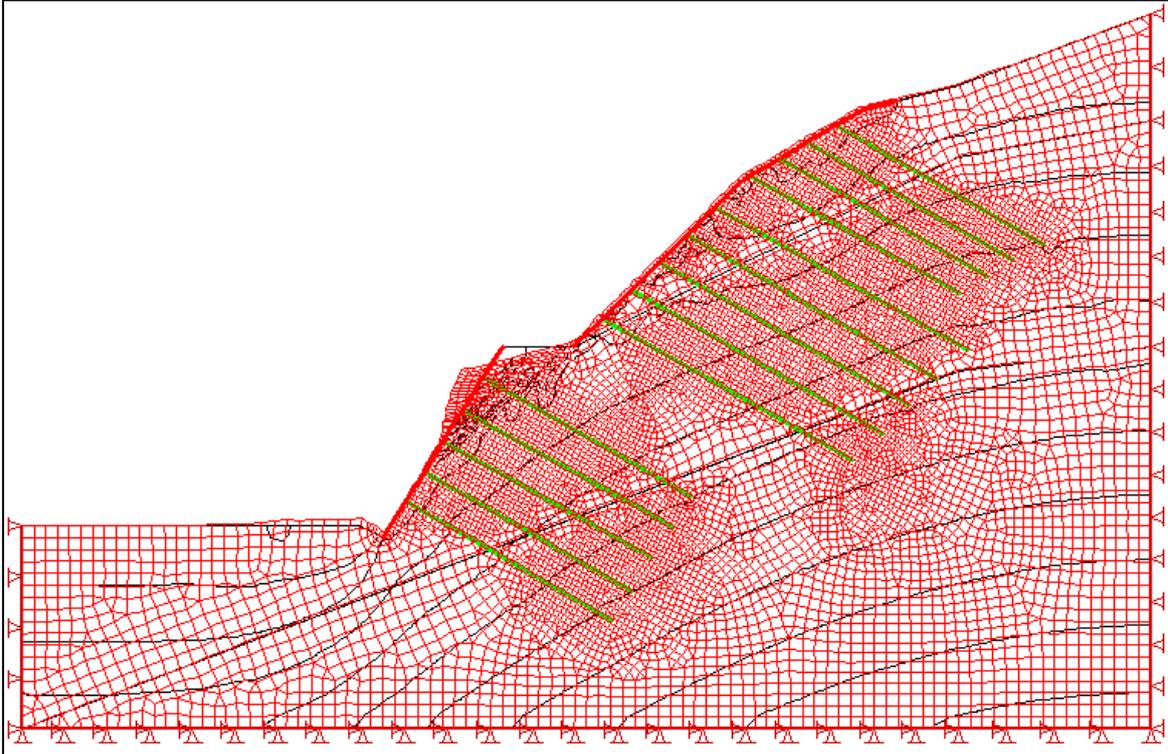
Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o término da escavação, o software está apto a calcular o deslocamento do talude. No estudo de caso ocorreu deslocamento na face do talude e na sua base, representado por malhas vermelhas conforme a figura 48.

Observando a figura 48, verifica-se que o deslocamento máximo da face do talude está ocorrendo aproximadamente a 8,00m de altura da base, com um deslocamento de aproximadamente 2,00cm.

Os grampos estão inseridos de maneira passiva no maciço, quando ocorre o deslocamento da face, os grampos sofrem tração e são ativados. É muito comum deslocamentos em contenções de solo grampeado durante e após a escavação, a figura abaixo representa a projeção do maciço deslocado.

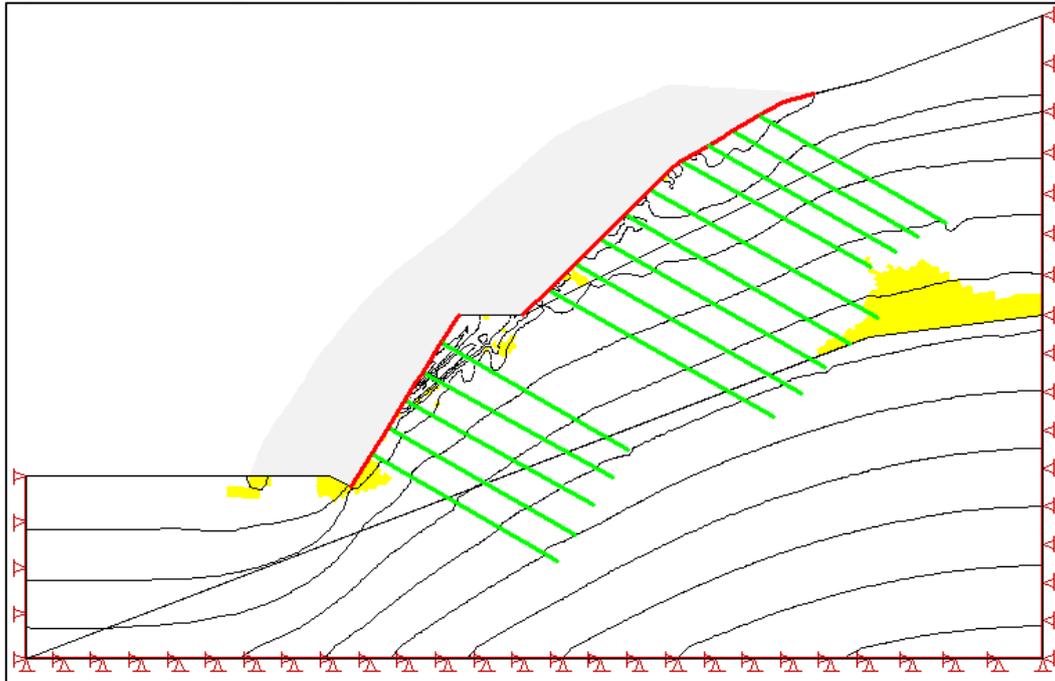
Figura 48 – Projeção dos deslocamentos da face e base do talude, fator de escala aumentado 10 vezes, Sigma/W – GeoStudio 2007



Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura 49, mostra as zonas de plastificação ou regiões plastificadas, representadas pela cor amarela. Note que a plastificação está ocorrendo próximo da face do talude, na base da contenção, e também no final de alguns grampos, isso é comum em solo grampeado por ser uma estrutura passiva, que necessita de um pequeno deslocamento, ocorrendo uma força mobilizada em seus grampos.

Figura 49 – Zonas de plastificação, Sigma/W – GeoStudio 2007



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.1 Análise do Fator de segurança ao arrancamento

Baseado nos estudos de tensão-deformação é possível determinar os esforços máximos de tração nos grampos ($T_{\text{máx}}$). A resistência ao arrancamento da região ancorada (R_{anc}) é dada pelo produto entre as resistências do bulbo (definida com base no fator de arrancamento dos grampos – q_s) e os correspondentes comprimentos de ancoragem. O fator de segurança ao arrancamento ($FS_{\text{arrancamento}}$) será dado pela razão entre a resistência ao arrancamento e a tração máxima, tal que:

$$FS_{\text{arrancamento}} = \frac{R_{\text{anc}}}{T_{\text{máx}}} \quad (12)$$

O quadro 11 apresenta os resultados obtidos para FS de cada grampo e a média.

Quadro 11 - Fator de segurança ao arrancamento dos grampos.

Grampo	qs (kPa)	Farr (kN/m)	Lanc (m)	Ranc (kN)	Tmáx (kN)	FSarrancamento	FSmédio
1	150,00	37,50	4,95	185,63	111,00	1,67	2,48
2	150,00	30,00	4,34	130,20	52,80	2,47	
3	150,00	30,00	3,85	115,50	71,20	1,62	
4	150,00	27,78	3,24	90,00	72,00	1,25	
5	150,00	25,86	4,80	124,14	81,60	1,52	
6	150,00	25,00	4,53	113,25	74,75	1,52	
7	150,00	26,00	4,70	122,18	57,60	2,12	
8	150,00	25,95	4,80	124,57	32,20	3,87	
9	150,00	25,64	4,91	125,90	16,10	7,82	
10	150,00	23,44	2,67	62,58	58,65	1,07	
11	150,00	28,14	3,42	96,25	27,50	3,50	
12	75,00	16,30	4,30	70,11	33,80	2,07	
13	75,00	18,75	4,85	90,94	30,00	3,03	
14	75,00	24,19	5,70	137,90	106,75	1,29	

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.2 Análise do Fator de segurança à ruptura por tração

O fator de segurança que determina à ruptura por tração, é a relação entre a carga de uso do aço ($T_{máx}$, barra) e a tração máxima solicitada no grampo ($T_{máx}$):

$$FS_{reforço} = \frac{T_{max, barra}}{T_{máx}} \quad (13)$$

De acordo com o quadro 12, temos a tensão máxima de cada barra de aço CA50, como a tensão máxima de cada grampo foi variada, optamos por uniformizar na barra de 22mm, onde sua tensão máxima admitida é de 122kN, que atende todas as situações propostas.

Quadro 12 - Valores das cargas de escoamento das barras de aço CA50

Aço CA-50				
Diâmetro (mm)	Área (cm ²)	σ_y (MPa)	Carga de Escoamento (kN)	Carga de Trabalho (kN)
10mm	0,79	500	39	25
12,5mm	1,23	500	61	39
16mm	2,01	500	101	65
20mm	3,14	500	157	101
22mm	3,80	500	190	122
25mm	4,91	500	245	158
32mm	8,04	500	402	258

Fonte: Moraes, 2016.

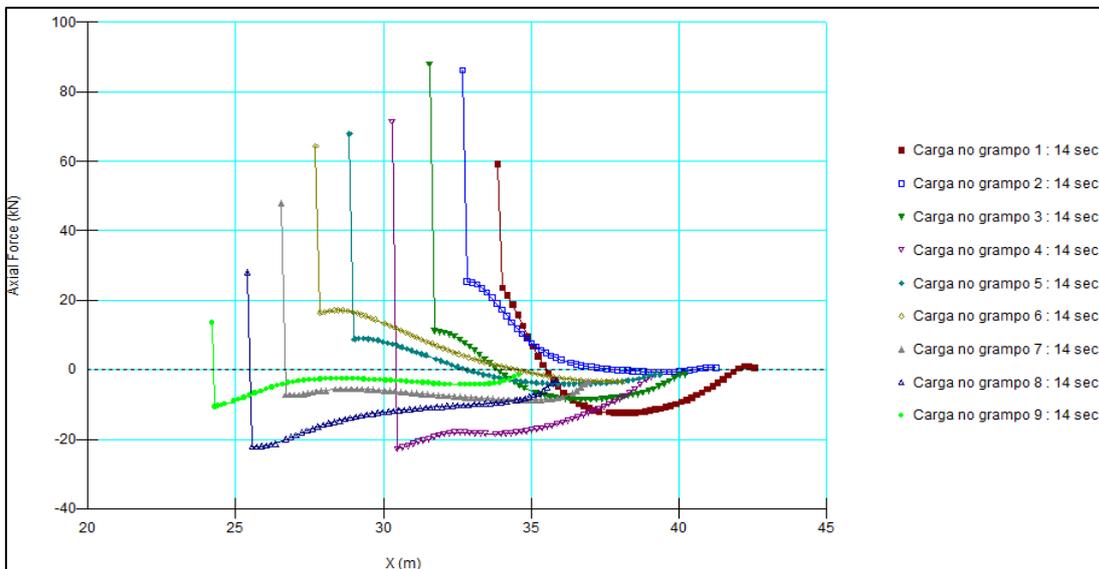
Quadro 13 - Valores adotados por questão construtiva.

Grampo	Carga Axial por metro (kN/m)	Carga Axial (kN)	Diâmetro (mm)	Carga de Trabalho (kN)
Grampo 1	60,00	111,00	22,00	122,00
Grampo 2	88,00	52,80	22,00	122,00
Grampo 3	89,00	71,20	22,00	122,00
Grampo 4	72,00	72,00	22,00	122,00
Grampo 5	68,00	81,60	22,00	122,00
Grampo 6	65,00	74,75	22,00	122,00
Grampo 7	48,00	57,60	22,00	122,00
Grampo 8	28,00	32,20	22,00	122,00
Grampo 9	14,00	16,10	22,00	122,00
Grampo 10	23,00	58,65	22,00	122,00
Grampo 11	22,00	27,50	22,00	122,00
Grampo 12	26,00	33,80	22,00	122,00
Grampo 13	23,00	30,00	22,00	122,00
Grampo 14	61,00	106,75	22,00	122,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

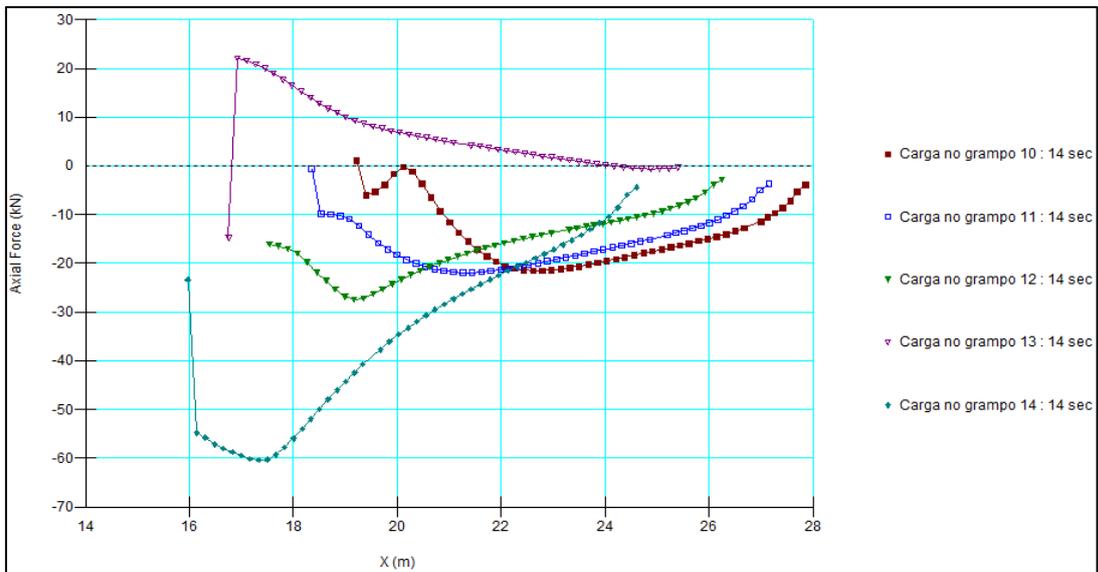
O gráfico apresentado nas figuras 50 e 51 mostra o comportamento de todos os grampos quanto sujeitos ao carregamento. A tensão atuante no grampo está em kN e a deformação em metros. Observa-se que o grampo 3 é o mais carregado de todos, com uma carga de 89 kN, devido a 62% do comprimento do grampo está dentro da zona ativa, onde necessita de maior esforço na zona passiva com uma menor área de grampo. Em seguida, a tração diminui linearmente até o último grampo, e a medida que os grampos se aproximam da face do talude esta tensão tende a ser menor. Com as cargas de tração obtida é necessário recalcular o fator de segurança novamente da estrutura grampeada, para uma tensão máxima de 122kN, na figura 52 podemos verificar que houve um aumento no F.S, e que podemos considerar seguro, pois a literatura indica um valor acima de 1,00.

Figura 50 - Gráfico de tração máxima nos grampos do 1 ao 9, Sigma/W – GeoStudio 2007



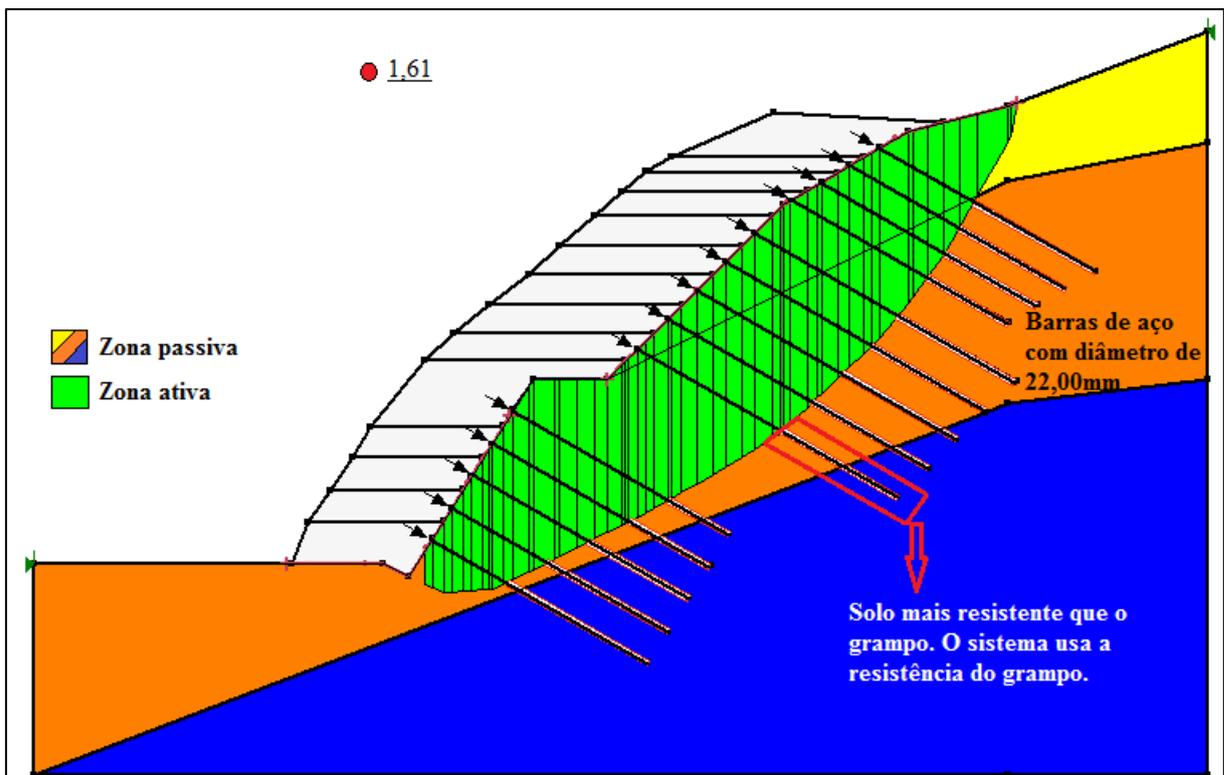
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51 - Gráfico de tração máxima nos grampos do 10 ao 14, Sigma/W – GeoStudio 2007



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 - Fator de segurança do problema-tipo final



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com os parâmetros de solo definido de acordo com Mesquita, 2014, foi utilizado o *software GeoStudio*, para dar início ao processo de solução da estrutura de solo grampeado do estudo de caso.

O primeiro processo foi verificar o fator de segurança global da estrutura, onde constatou um $F.S = 0,93$, o que significa um possível deslizamento na estrutura, para isso não ocorrer, o valor aceitável seria igual ou superior a 1,5.

Como o talude em seu estado natural não atendeu o F.S mínimo proposto, foi dado início ao processo de grampeamento da estrutura. Foram injetados 14 grampos no problema tipo com inclinações variando de 10° a 35° , onde encontrou-se o maior F.S com a inclinação de 30° , sendo interessante ressaltar que, se adotássemos uma inclinação de 10° ou 15° o F.S mínimo necessário não seria alcançado, podendo assim, elevar o valor da obra.

O fator de segurança obtido foi satisfatório, então, deu-se início ao dimensionamento da estrutura. Encontrado os parâmetros dos solos, parâmetros dos grampos e do paramento são realizadas diversas escavações no decorrer da altura do talude. Com todas as escavações realizadas e os grampos e paramento inseridos, foi gerada uma malha pelo módulo *Sigma/W* onde constatou-se um deslocamento máximo na estrutura de 2,00cm.

Continuando a análise, foi possível obter o F.S ao arrancamento mínimo, que é dado pela razão entre a resistência do arrancamento e tração máxima. Foi encontrado um F.S médio dos grampos de 2,48, que é considerado seguro.

O fator de segurança que determina à ruptura por tração é a relação entre a carga de uso do aço e tração máxima solicitada no grampo. A carga mobilizada no grampo é correlacionada com o comprimento do grampo na zona ativa e zona passiva. Quanto maior for o comprimento do grampo na zona passiva, menor será sua carga mobilizada.

Em cada grampo foi obtido uma carga, necessariamente para cada carga é preciso de um diâmetro diferente da barra para poder atender aos esforços solicitantes. Para facilitar no processo de execução e amenizar as chances de erro, foram adotadas barras com diâmetro de 22,00mm, que atende o esforço de todos os grampos, e assim foi obtido o F.S final da estrutura igual 1,61, aproximadamente 60% do que o valor encontrado na estabilidade global.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentada possibilitou o conhecimento teórico sobre a técnica de solo grampeado em um determinado estudo de caso – que foi um talude onde houve a necessidade de aplicar a técnica às margens da Rodovia Fernão Dias.

O solo grampeado é uma técnica bastante usual, pois, na maioria dos casos, não é preciso fazer corte no talude, podendo executar em seu formato natural, apenas regularizando sua face. É uma técnica que conta com materiais leves e de fácil acesso, onde facilita sua execução.

Utilizou-se, para tanto, o *software* computacional *GesSlope* (módulos *Slope/W* e *Sigma/W*) para poder realizar o dimensionamento da estrutura, onde chegou-se num fator de segurança considerado seguro para este tipo de estrutura. Os grampos foram inseridos no maciço com diversas inclinações, variando de 10° a 35°, onde permitem a injeção da nata de cimento que preencherá o furo e o grampo, e quando a cunha ativa iniciar o movimento, de maneira a gerar instabilidade na estrutura a tração no grampo seja rapidamente mobilizada. Com a verificação das inclinações dos grampos conclui-se que as inclinações de 10° e 15° atendem o fator de segurança considerado seguro para este estudo de caso.

Conclui-se que os deslocamentos da face do maciço são previstos e esperados, onde pequenas deformações contribuem para a estabilização do maciço e como a base da contenção também sofre a influência do maciço reforçado, se deformando, confirmando a ideia de que o solo grampeado se comporta como muro de gravidade.

Apesar de não haver amparo normativo para a técnica de solo grampeado, há uma grande quantidade de trabalhos, teses de mestrados, e artigos sobre o assunto, livros e muitos autores contribuindo para o aperfeiçoamento da técnica que não é mais considerada novidade no Brasil, desde que já vem sendo bastante aplicada no Brasil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de taludes. Projeto 02:04.07-001/90. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Construção Civil, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Projeto NBR 6502/1995. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Construção Civil, 1995. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/30915157/NBR-06502-1995-Rochas-e-Solos>>. Acesso em: 3 jun. 2017.

BRUCE, D. A.; JEWELL, R. A. Soil nailing: application and practice. **Ground Engineering**, part 1, 1987.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CLOUTERRE. **Soil Nailing Recommendation 1991**: for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Paris: Presses de l'ENPC, 1993.

DAS BRAJA, M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Geotechnical engineering circular n° 7 – Soil nail walls**, Washington, 2003. **Hollow-core soil nails state-of-the practice**. Washington, 2006.

FEIJÓ, R. L. **Monitoração de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnáissico não saturado**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

FIAMONCINI, C. M. **Estabilização de talude através da técnica de Cortina atirantada – estudo de caso**. Criciúma: UNESC Editora, 2009.

GÄSSLER, G. **Soil nailing: theoretical basis and practical design**. In: International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement. **Anais**, Rotterdam, 1988.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**, São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2008.

LAZARTE, C. A. et al. Soil nail walls. Geotechnical Engineering. **Circular nº 7 Technical Manual**. USA: Federal Highway Administration/ Department of Transportation, 2003.

LIMA, A. P. **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

LIMA, A. P. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. **Mecânica dos solos I: conceitos introdutórios**. Salvador: [s./ed.], 1997.

_____. **Mecânica dos solos II: conceitos introdutórios**. Salvador: [s./ed.], 1997.

MESQUITA, A. F. **Retroanálise em talude rodoviário: Talude localizado no km 758+500 pista norte da Rodovia Fernão Dias (BR 381)**. Varginha: [s./ed.], 2014.

ORTIGÃO, J. A. R. et al. Experiência com solo grampeado no Brasil: 1970 – 1994. **Revista Solos e Rochas**, v. 16, dez. 1994.

PEREIRA, A. B. **Análise da influência da inclinação dos grampos no aumento da estabilidade global de talude contido em solo grampeado**. Ouro Preto: Escola de Minas/UFOP, 2012.

_____. **Estudo Numéricos do Comportamento Tensão-Deformação de Estruturas em Solo Grampeado**. Ouro Preto: Escola de Minas/UFOP, 2016.

PINTO, C. S., 2002, **Curso Básico de Mecânica dos solos**. 3. ed. [s.l.]: Oficina de Textos, 2002.

PORTO, T. B. **Estudo da interação de paredes de alvenaria estrutural com estrutura de fundação**. 2010. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2010.

REIS, J. H. C. **Interação solo-estrutura de grupo de edifícios com fundações superficiais em argila mole**, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2000.

RIBEIRO, S. G. S. Projeto de solo grampeado. **Notas de aula**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto/ NUGEO, 2011.

SCHLOSSER, F. **Validation des méthodes de calcul de clouage par les expérimentations du Projet National Clouterre**. France: Revue Française de Géotechnique, 1993.

SILVA, D. P. et al. Solo grampeado: a arte de estabilizar, uma técnica moderna e eficaz. **Rev. Fundações e Obras Geotécnicas**, ago. 2010.

SPRINGER, F. O. **Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaise**, 2006. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e método**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZIRLIS, A. C.; PITTA, C. A. Soil mailing: chumbamento de solos – experiência de uma equipe na aplicação do método, **I COBRAE, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas/ABMS**, Rio de Janeiro, 1992.

ZIRLIS, A. C., et al. Solo grampeado – A arte de estabilizar, uma técnica moderna e eficaz. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**, São Paulo, 2010.