

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GIOVANA BASTOS DE FREITAS

**MODELAGEM DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO DO TIPO SOLO GRAMPEADO
EM FILITO COM OS SOFTWARES SLOPE/W E SLIDE2**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO I

Niterói
2021

GIOVANA BASTOS DE FREITAS

**MODELAGEM DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO DO TIPO SOLO GRAMPEADO
EM FILITO COM OS SOFTWARES SLOPE/W E SLIDE2**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO I

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para
conclusão do curso.

Orientador:
Prof.^a Robson Palhas Saramago (DSc)

Niterói
2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F862m Freitas, Giovana
MODELAGEM DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO DO TIPO SOLO GRAMPEADO
EM FILITO COM OS SOFTWARES SLOPE/W E SLIDE2 / Giovana Freitas
; Robson Saramago, orientador. Niterói, 2021.
100 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia,
Niterói, 2021.

1. Solo Grampeado. 2. Maciços Anisotrópicos. 3. Modelagem
Computacional. 4. Slope/w e Slide2. 5. Produção intelectual.
I. Saramago, Robson, orientador. II. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

GIOVANA BASTOS DE FREITAS


**MODELAGEM DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO DO TIPO SOLO GRAMPEADO
EM FILITO COM OS SOFTWARES SLOPE/W E SLIDE2**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para
conclusão do curso.

Aprovada em 27 de setembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Robson Palhas Saramago (DSc) - UFF


Prof. Bruno Teixeira Lima (DSc) - UFF


Prof. Paulo Luiz da Fonseca (DSc) - UFF

Niterói
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos por todo o suporte durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

À Deus por sempre me mostrar o caminho certo a ser tomado.

Aos meus pais, Sabrina e Giovani, ao meu irmão João Pedro e aos meus avós pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações.

Ao meu namorado Raphael pelo seu amor, ajuda e compreensão da minha dedicação ao projeto de pesquisa.

Em especial ao professor e orientador Robson Saramago pelo acolhimento desde o princípio, por seu apoio, compreensão, disposição em ajudar e pelos ensinamentos.

Ao Antônio, Cássio e Matheus, amigos que contribuíram na minha jornada, com muita disponibilidade e bom humor.

Aos membros da banca que aceitaram contribuir com o presente trabalho.

A todos os meus amigos da vida e do curso de graduação, em principal aos “Miguffs”, que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo.

Também quero agradecer à Universidade Federal Fluminense e o seu corpo docente que demonstrou estar comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

RESUMO

FREITAS, Giovana Bastos. *Modelagem de estrutura de contenção do tipo solo grampeado em filito com os softwares Slope/W E Slide2*. 2021. 98f. Dissertação (Graduação de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2021.

Sob uma necessidade de produção de métodos que pudessem otimizar as análises referentes à estabilidade de talude, na década de 60, foram desenvolvidos *softwares* que proporcionavam a substituição de cálculos manuais por ferramentas computacionais de âmbito geomecânico. Na mesma época, o estudo sobre novas técnicas de contenção evoluía ao passo que soluções com grampos, que possuem caráter passivo, começaram a ser executadas. Para a situação de maciços anisotrópicos, onde seu comportamento é dependente da natureza de formação e grau de intemperização, a técnica de contenção em solo grampeado é uma das soluções utilizadas. Embora possa ser aplicada, as análises de estabilidade desse tipo de solo eram difíceis de modelar, tendo em vista que os *softwares*, naquele período, ainda não possuíam ferramentas que pudessem facilitar esse trabalho. Entretanto, com as atualizações ao longo dos anos, os desenvolvedores introduziram procedimentos para sanar essa limitação, sem depender da criação manual de camadas e introdução de parâmetros diferentes entre elas que pudessem ser equiparadas ao solo anisotrópico. Com a utilização de dois *softwares* (Slope/W e Slide2) foi demonstrado, como objetivo do trabalho, o passo a passo da análise de estabilidade e solução conceitual de estabilização em solo grampeado de uma seção de talude formado por filito, localizado em Minas Gerais. Os parâmetros de coesão, ângulo de atrito, peso específico do solo e o comprimento e angulação dos grampos foram estabelecidos com base na bibliografia existente, assim como as tensões máximas da bitola de aço a ser introduzida, que, nesta situação, trabalha tanto à tração quanto ao cisalhamento, tiveram seus valores definidos pelo critério de Tresca. Logo, ao solucionar o caso, se pode perceber a simplicidade computacional atingida para as soluções desse tipo de caso e as diferenças de modelagem e resultados entre os dois *softwares*.

Palavras-chave: *Softwares* Geomecânicos, Solo Grampeado, Maciço Anisotrópico, Análises de Estabilidade, Slope/W, Slide2

ABSTRACT

FREITAS, Giovana Bastos. *Modeling of a stapled soil containment structure in stapled soil with Slope/W and Slide2 software*. 2021. 98f. Dissertation (Graduação de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2021.

Under a need to produce methods that could optimize the analyses concerning slope stability, in the 60s, software was developed that provided the substitution of manual calculations by geomechanical computational tools. At the same time, the study of new containment techniques evolved, and passive nail solutions began to be implemented. For the situation of anisotropic massifs, where their behavior is dependent on the nature of formation and degree of weathering, the stapled soil containment technique is one of the solutions used. Although it can be applied, the stability analyses of this type of soil were difficult to model, given that the software, at that time, did not yet have tools that could facilitate this work. However, with updates over the years, developers have introduced procedures to remedy this limitation without depending on manually creating layers and introducing different parameters between them that could match the anisotropic soil. With the use of two softwares (Slope/W and Slide2), the objective of the work was to demonstrate the step-by-step stability analysis and conceptual solution for the stapled soil stabilization of a filito slope section located in Minas Gerais. The parameters of cohesion, friction angle, soil specific weight and the length and angulation of the clamps established based on existing literature as well as the maximum stresses of the steel gauge to be introduced, which, in this situation, works both in tension and in shear, had their values defined by the Tresca criterion. Therefore, when solving the case, one can perceive the computational simplicity achieved for the solutions of this type of case and the differences in modeling and results between the two softwares.

Keywords: Geomechanical Softwares, Soil Mailing, Anisotropic Massifs, Stability Analyses, Slope/W, Slide2

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Método de Fellenius.....	25
Figura 2 – Método de Bishop	25
Figura 3 - Método de Spencer	26
Figura 4 - Exemplo de solo grampeado. São Bernardo do Campo, São Paulo	29
Figura 5 - Processo de escavação em bermas.....	31
Figura 6 - Exemplo de chumbadores verticais	32
Figura 7 - Fases de construção do solo grampeado.....	35
Figura 8 - Tipos de cabeça para grampos: embutida na face por meio de dobra do aço (a), fixada por placa metálica, rosca e porca (b), feixe de barra embutido na face por dobra (c), sem cabeça (d) e com manta vegetal, tela, porca e placa (e).....	36
Figura 9 - Microrranhuras ou Perfuração com tela	37
Figura 10 - Exemplo de detalhamento DHP	38
Figura 11 - Manutenção DHP.....	38
Figura 12 - Dreno linear de paramento e pontual (barbacã).....	39
Figura 13 - Solo grampeado com drenagem superficial de descida de água em escada. Pirafó, RJ.....	40
Figura 14 - Grampos submetidos à flexão e esforços cisalhantes	41
Figura 15 - Mecanismo de transferência de carga.....	43
Figura 16 - Correlações empíricas para q_s com a pressão limite pressiômetro (p_1) para solos arenosos (a) e para solos argilosos (b).....	43
Figura 17 - Correlações empíricas para q_s em areias (a) e argilas e siltes (b)	44
Figura 18 - Correlações empíricas para q_s em vários tipos de solo	45
Figura 19 - Correlações empíricas para q_s para solo residual de gnaíse	46

Figura 20 - Resultado de ensaios de arrancamento no Brasil.....	46
Figura 21 - Esquema de ensaio de arrancamento em solos grampeados.....	49
Figura 22 - Deformação esquemática do solo grampeado	51
Figura 23 - Uso da técnica do solo grampeado em ambiente urbano com existência de estruturas ao redor	52
Figura 24 - Cálculo dos deslocamentos com o inclinômetro	54
Figura 25 - Circuito para medição direta de resistência - Método dos 4 Fios.....	55
Figura 26 - Possibilidade de direção da anisotropia de resistência	58
Figura 27 - Comportamento típico do solo compactado e talhado na direção vertical e horizontal.....	59
Figura 28 - Ardósia (a) e Filito (b) Filito com maior teor de matéria Orgânica (c).....	61
Figura 29 - Modelo esquemático de flambagem	62
Figura 30 - Modelo de flambagem de blocos	63
Figura 31 - Ilustração do mecanismo de tombamento flexural e detalhe do movimento entre as lâminas	63
Figura 32 - Ilustração do tombamento bloco-flexural	64
Figura 33 - Mecanismos de ruptura de taludes rochosos: circular (a), planar (b) e cunha (c)	65
Figura 34 - Gráfico da elipse com função do ângulo ω e a força de resistência resultante T	67
Figura 35 - Metodologia de Tresca aplicada para grampos	67
Figura 36 - Seção do maciço a ser analisado (Slope/W).....	73
Figura 37 - Propriedades para a análise PWP e tipo de análise (Slope/W).....	73
Figura 38 - Condições da busca pelas superfícies (Slope/W)	74
Figura 39 - Propriedades do material (Slope/W).....	74
Figura 40 - Função de anisotropia (Slope/W)	75

Figura 41 - Blocos de busca para análise de estabilidade (Slope/W).....	75
Figura 42 - Bloco esquerdo de entrada para análise de estabilidade (Slope/W)	76
Figura 43 - Bloco direito de entrada para análise de estabilidade (Slope/W)	76
Figura 44 - Superfície crítica da análise de estabilidade pelo método de Spencer (Slope/W)	77
Figura 45 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para análise de estabilidade (Slope/W).....	77
Figura 46 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente fora da variação do ângulo da foliação para análise de estabilidade (Slope/W).....	78
Figura 47 - Mapa do fator de segurança para análise de estabilidade (Slope/W)	78
Figura 48 - Método (Yes) e (No) (Slope/W)	79
Figura 49 - Propriedade dos grampos (Slope/W).....	79
Figura 50 – Características da carga distribuída (Slope/W).....	80
Figura 51 - Implementação da carga distribuída de 20kPa ao logo da superfície do terreno (Slope/w)	80
Figura 52 - Bloco esquerdo para solução de solo grampeado (Slope/w)	81
Figura 53 - Bloco direito para solução de solo grampeado (Slope/w)	81
Figura 54 - Superfície crítica do Solução de solo grampeado pelo método de Spencer (Slope/W)	82
Figura 55 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slope/W)	82
Figura 56 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente fora da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slope/W)	83
Figura 57 - Mapa do fator de segurança para solução de solo grampeado (Slope/W).....	83
Figura 58 - Seção do maciço a ser analisado (Slide2).....	84
Figura 59 - Propriedades para análise (Slide2).....	84

Figura 60 - Propriedades do material (Slide2)	85
Figura 61 - Função da anisotropia do material (Slide2)	85
Figura 62 - Opção de Anisotropia linear (a) modo de utilização (b).....	86
Figura 63 - Propriedades dos blocos de busca para análise de estabilidade (Slide2).....	86
Figura 64 - Superfície crítica da análise de estabilidade pelo método de Spencer (Slide2)....	87
Figura 65 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para análise de estabilidade (Slide2)	87
Figura 66 - Mapa de segurança para análise de estabilidade (Slide2).....	88
Figura 67 - Método ativo (A) e passivo (B)	88
Figura 68 - Complemento Método A e B (Slope/W)	89
Figura 69 - Propriedade dos grampos (Slide2).....	89
Figura 70 - Propriedade da placa e resistência ao cisalhamento solo-grampo q_s (Slide2).....	90
Figura 71 - Fatores de Segurança do reforço (Slide2).....	90
Figura 72 - Aplicação do reforço (Slide2).....	91
Figura 73 - Implementação da carga distribuída de 20kPa ao longo da superfície do terreno (Slide2)	91
Figura 74 - Superfície crítica do solução de solo grampeado pelo método de Spencer (Slide2)	92
Figura 75 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slide2)	92
Figura 76 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente fora da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slide2)	93
Figura 77 - Mapa de segurança para solução de solo grampeado (Slide2)	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas. (NBR 16920-2, 2021).....	23
Tabela 2 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais. (NBR 16920-2, 2021).....	23
Tabela 3 – Fator de segurança para estabilidade geral. (NBR 16920-2, 2021).....	23
Tabela 4 - Suposições, condições de equilíbrio e incógnitas em alguns procedimentos de Equilíbrio Limite. (DUNCAN; WRIGHT, 2005 <i>apud</i> SANDOVAL, 2012 adaptado).....	27
Tabela 5 -Redução por corrosão superficial da armação de aço em função do meio e vida útil (mm). (NBR 16920-2, 2021).....	33
Tabela 6 - Determinação do coeficiente de influência das deformações de acordo com o tipo de solo. (Clouterre, 1991).....	52
Tabela 7 – Quadro resumo dos resultados obtidos	94

LISTA DE SÍMBOLOS

$T_{\text{último}}$: Carga última do aço selecionado para o grampo (kN);
A_s	: Área da seção transversal da armação do grampo (m ²);
f_{yk}	: Tensão de escoamento característica do aço empregado (kPa);
γ_s	: Coeficiente de minoração da resistência para barras de aço ($\gamma_s = 1,15$);
T_{ensaio}	: Carga máxima prevista para o ensaio (kN);
q_s'	: Resistência da interface solo-grampo prevista (kPa);
T_i	: Valor máximo das cargas nos grampos;
FS	: Fator de segurança;
L_b	: Comprimento ancorado do grampo ensaiado ≥ 3 (m);
$\phi_{\text{perf.}}$: Diâmetro da perfuração do grampo ensaiado (m);
q_s	: Resistência da interface solo-grampo (kPa);
$T_{\text{máx}}$: Carga máxima que se manteve estabilizada durante o ensaio, ou limitada pelo deslocamento máximo estabelecido (kN);
δ_o	: Deformação horizontal atrás da estrutura (mm);
δ_h	: Deformação horizontal no topo da face da estrutura (mm);
δ_v	: Deformação vertical no topo da face da estrutura (mm);
κ	: Coeficiente de determinação da influência em relação ao tipo de solo;
λ	: Comprimento de influência;
η	: Ângulo inclinação da estrutura;
H	: Altura da estrutura de contenção em solo grampeado;
$T_{a, \text{máx}}$: Componente de tensão de arrancamento máxima do aço (kN);
$T_{c, \text{máx}}$: Componente de tensão de cisalhamento máxima do aço (kN);
ω	: Ângulo entre o grampo e a resultante da tensão aplicada;
T_a	: Componente de tensão de arrancamento máxima do aço para foliação de ângulo ω ;
T_c	: Componente de tensão de cisalhamento máxima do aço para foliação de ângulo ω ;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações Iniciais	16
1.2 Formulação da Situação-Problema	16
1.3 Objetivos da Pesquisa	17
1.3.1 Objetivo Geral	17
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Metodologia de Pesquisa	18
1.5 Organização da Pesquisa	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 Atividades Antecessoras ao Projeto de Estabilização	20
2.1.1 Procedimentos Preliminares	20
2.1.2 Investigação Geológico-Geotécnica	20
2.1.3 Obrigatoriedade de Instrumentação	22
2.1.4 Análise da estabilidade	22
2.2 Conceitos de Alguns Métodos de Equilíbrio Limite	24
2.3 Solo Grampeado	28
2.3.1 Conceito	28
2.3.2 Vantagens e Desvantagens	29
2.3.3 Composição e Execução	30
2.3.4 Mecanismo Solo-Grampo	40
2.3.5 Ensaio de Arrancamento	42
2.3.6 Deslocamentos	50
2.3.7 Instrumentação	52
2.4 Anisotropia	56
2.4.1 Comportamento dos Solos Anisotrópicos	56
2.4.2 Conceito de Rochas Brandas e Filito	59
2.4.3 Mecanismos de Ruptura de Filitos	61
2.4.4 Mecanismo de Ruptura Planar - Rocha-Grampo	66
2.5 Softwares	68
2.5.1 SLOPE/W	68
2.5.2 SLIDE2	69
3. METODOLOGIA E PARÂMETROS	70

3.1	Metodologia	70
3.2	Características do Caso e seus Parâmetros	70
4.	DESENVOLVIMENTO	73
4.1	SLOPE/W.....	73
4.2	SLIDE2	84
4.3	Resultados	93
5.	CONCLUSÃO	95
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As técnicas de estabilização em solo grampeado começaram a serem utilizadas no Brasil no início da década de 70 com base nas pesquisas realizadas na França, Alemanha, Portugal e Estados Unidos. Com o melhor entendimento do comportamento físico e advento da modelagem matemática, a solução passou a ser difundida não apenas por esse motivo, mas por seu baixo custo, sua adaptabilidade ao solo e às condições locais, a sua velocidade de construção, a pouca utilização de material e a necessidade de apenas equipamentos de pequeno e médio porte.

Na década seguinte, com o estímulo da indústria da construção e do minério, começaram a se comercializar *softwares* geomecânicos que simplificavam os procedimentos de cálculo da análise de estabilidade de taludes. Cálculos que eram realizados anteriormente de forma manual e consumiam dias de trabalho. Portanto, esses progressos computacionais culminaram no aumento do dinamismo e precisão dos estudos de estabilidade, além de proporcionar uma modelagem tecnológica de solução, com a introdução de variados tipos de reforços no sistema, como grampos, tirantes, chumbadores, mantas geotêxteis etc.

Os casos de análise de estabilidade em que existe o caráter anisotrópico do maciço são dependentes de modelagens específicas. Inicialmente, os *softwares* de estabilidade não possuíam ferramentas que simplificassem este tipo de análise de maciço anisotrópico. Entretanto, com estudos, atualizações e evoluções, uma condição facilitadora pôde ser introduzida às possibilidades de investigação, além da inserção de parâmetros e de interações que permitiram um maior detalhamento e conseqüente precisão nos casos aplicados nesses programas. Ressalta-se que as formas de modelar o comportamento anisotrópico são distintas, e precisam ser avaliados criteriosamente pelos usuários dos programas.

1.2 Formulação da Situação-Problema

Mesmo os métodos computacionais geomecânicos possuindo atualmente uma grande difusão global, muitos usuários não os utilizam integralmente. As evoluções e atualizações gráficas dos *softwares* de análise de estabilidade e a introdução de parâmetros como a poro pressão, métodos de cálculo por elementos finitos e a capacidade de interação de um reforço foram progressos alcançados pelos desenvolvedores e pesquisadores. Entretanto, a

possibilidade de utilização desses instrumentos para análises específicas do tipo solos ou rochas com anisotropia, de maneira simplória e empregando as ferramentas dos próprios programas, tem sido, em geral, menos explorada. Vale salientar que, quando realizadas, as análises necessitam ser avaliadas criteriosamente para não gerar erros, mesmo que cada programa apresente uma metodologia diferente.

Com uma situação exemplificadora, esse estudo tem por finalidade a demonstração da análise e uma solução de estabilização em maciço de situação anisotrópica com a utilização dos *softwares* Slope/W, da desenvolvedora GeoStudio, e Slide2, da Rocscience. Dessa forma, pode-se discutir as limitações e facilidades proporcionadas por cada ferramenta aos estudos de casos de taludes anisotrópicos em geral.

1.3 Objetivos da Pesquisa

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal a realização da modelagem e verificação da estabilidade em talude anisotrópico, com solução estabilizadora de solo grampeado, a partir de dois *softwares* que se baseiam nos métodos de equilíbrio limite e nos parâmetros de resistência do solo objeto de estudo e do grampo a ser implementado na contenção. Como finalidade estão as demonstrações das possibilidades de utilização desses *softwares* e as comparações das análises específicas a partir de um determinado exemplo de talude homogêneo de rocha branda, filito, situado em Minas Gerais.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral da pesquisa, seguem abaixo os seguintes objetivos específicos que serão desenvolvidos:

- Apresentar os procedimentos preliminares, a fim de compreensão da utilidade das ações conjuntas para a realização de uma análise e solução de estabilização;
- Apontar e descrever alguns métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade global de um talude;
- Conceituar a solução de solo grampeado, com seu mecanismo, elementos e etapas de execução, assim como a descrição dos processos de ensaio de arrancamento dos

grampos, instrumentação e análises de deslocamento da estrutura com base na revisão de literatura;

- Descrever o comportamento dos solos anisotrópicos, em especial as rochas brandas, e seus modos de ruptura, com foco na ruptura planar, objeto de estudo, baseado na revisão de literatura;
- Definir e apresentar os *softwares* que serão utilizados no estudo de caso;
- Expor a metodologia, informações preliminares, parâmetros e cálculos do caso objeto de estudo;
- Modelar nos *softwares* Slide2 e Slope/W a análise de estabilidade e solução conceitual de contenção em solo grampeado relativo ao caso;
- Identificar os pontos de equiparação e/ou distinção dos resultados da análise, assim como as limitações dos *softwares*.

1.4 Metodologia de Pesquisa

Essa pesquisa tem como finalidade a análise de estabilidade relacionada ao caso específico real de maciço anisotrópico situado no estado de Minas Gerais, desenvolvendo-a através das modelagens nos *softwares* geomecânicos, Slide2 e Slope/W, que se baseiam em métodos de cálculo já existentes e modelagens para desenvolvimento dos processos. As análises apresentadas neste trabalho são sustentadas primordialmente pelos procedimentos realizados nos *softwares*, onde seus conceitos e fundamentos são desdobrados e desenvolvidos ao longo de toda a revisão literária. A partir de investigações geotécnicas realizadas em situações semelhantes, foram extraídos os parâmetros para serem aplicados, além da obtenção das informações relacionadas às características locais e geométricas e propriedades das foliações através do caso real.

1.5 Organização da Pesquisa

Nesta seção expõe-se a organização desta dissertação. O Capítulo 2 apresenta uma revisão literária dos conceitos referentes as principais vertentes que envolvem o objetivo da dissertação.

As descrições gerais sobre as atividades antecessoras ao projeto de estabilização estão no item 2.1, e em seguida no 2.2 estão as concepções de alguns Métodos de Equilíbrio Limite para as análises de estabilidade. Na sequência, no item 2.3 apresenta-se os conceitos,

vantagens e desvantagens, composição, execução e instrumentação da solução de estabilização em solo grampeado, assim como a definição do seu principal mecanismo de estabilidade, solo-grampo, a descrição do ensaio de arrancamento e as noções em relação aos deslocamentos da estrutura.

A referência teórica sobre o comportamento de solos anisotrópicos, conceito de rochas brandas (Filito), além dos seus mecanismos de ruptura, em principal a ruptura planar, que será objeto de estudo do caso, serão mostrados no item 2.4. Em caráter de introdução, serão apresentados os *softwares* de utilização nas análises do caso no item 2.5, encerrando a revisão de literatura.

No Capítulo 3 é exposta a metodologia relacionada ao estudo, assim como as características do caso real com sua localização e situação, e apresentação dos parâmetros encontrados em estudos semelhantes a serem relacionados ao caso objeto de estudo, com a finalidade da utilização nas ferramentas computacionais. Em seguida, a demonstração e o passo a passo da aplicação nos *softwares* Slide2 e Slope/W para o caso exemplo e real junto aos resultados serão exibidos no Capítulo 4. Ao final, e em conclusão, é comparado alguns pontos de limitações e facilidades obtidos nas análises de cada processo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Atividades Antecessoras ao Projeto de Estabilização

2.1.1 Procedimentos Preliminares

Segundo a NBR 11682:2009 de estabilidade de encostas, são obrigatórias as realizações de alguns procedimentos preliminares para elaboração de um projeto de estabilização de encostas. Essas ações criam a base para o desenvolvimento da análise determinística de ruptura de certo talude.

Iniciando por levantamentos realizados junto aos órgãos competentes, busca-se históricos de deslizamentos do local e informações relativas à topografia, geologia e dados geotécnicos anteriores da área, além das condições de ocupação, vizinhança e outras características relacionadas à região de influência (NBR 11682:2009).

Aliado à essas ações, um engenheiro civil geotécnico ou geólogo deve elaborar um laudo de vistoria com as informações básicas da área junto com a complementação especificada em norma. E ainda, se necessário, a incorporação ao laudo ou apresentação de relatório específico objetivando a implantação de medidas emergenciais, como interdições de vias, evacuações de edificações, remoção de sobrecarga, drenagem superficial, ou simples ações de proteção do talude por lona plástica ou geomanta, lançamento de aterro ao pé do talude ou pequenos retaludamentos (NBR 11682:2009).

2.1.2 Investigação Geológico-Geotécnica

A norma de estabilidade de encostas indica a realização de investigação de terreno que tem por objetivo caracterizar topograficamente o talude através da definição de seções transversais e longitudinais que abrangem a área estudada, junto à pontos de interesse geotécnicos e locação de qualquer estrutura existente. O desenvolvimento de planta de visualização básica, que expõe uma topografia planialtimétrica com curvas de níveis, deve ser feita em escala compatível com as dimensões da encosta e da natureza do problema em questão. Esse documento tem com a finalidade a instrumentação preliminar a investigação geotécnica.

Ainda nesta etapa antecedente à investigação, deve-se levantar informações hidrológicas relacionadas a pluviometria local, curso d'água e sua vazão na encosta, assim como os pontos de surgência de águas permanentes ou sazonais para posterior promoção

obrigatória do sistema de drenagem local. De mesmo modo, devem ser levantados os dados cartográficos, como mapas e aerofotogrametrias, e dados geológicos e geomorfológicos da região que geram contribuição para as investigações geotécnicas (NBR 11682:2009).

A respeito das investigações geológico-geotécnicas, a norma 11682:2009 é bem específica quanto a obrigatoriedade de realizações de planejamento, investigações de campo e amostragem do solo em questão. Em relação aos métodos diretos de investigação, é exigido uma mínima quantidade de três sondagens por seção para permitir a identificação da estratigrafia, as características das camadas de solo, a ocorrência de discontinuidades e, com o monitoramento, o nível d'água. Além disso, essas sondagens devem atingir o substrato mais resistente do terreno, sendo alertado para ocorrência de camadas resistentes intermediárias ou blocos de rochas, que devem ser ultrapassados. Entretanto, a norma dispensa a realização desse procedimento aos casos de taludes de solo homogêneo, com altura máxima de 3 metros e sem influência do nível d'água e sobrecarga, sendo o mesmo tendo que possuir superfícies planas a montante e jusante de comprimento superior a 5 vezes a altura da medida normal à face do talude.

Em relação ao processo de caracterização do solo, geralmente são extraídas amostras deformadas das sondagens, cuja cada camada de solo deve ser classificada de acordo com ABNT NBR 6502 e a ABNT NBR 6497. Já para caracterização das propriedades físicas e mecânicas, deve-se retirar amostras indeformadas, as quais devem ser embaladas, manuseadas e transportadas de forma a preservar as condições naturais. A quantidade mínima de 12 corpos de prova por camada é exigida e devem ser retiradas de pelo menos três amostras do mesmo solo. Os ensaios de determinação de umidade natural, granulometria, limites de liquidez e plasticidade e ensaios de cisalhamento são obrigatórios por norma em fase preliminar de projeto de encosta, salvo aqueles que são enquadrados nos tópicos listados no índice 6.3.5 da norma estabilidade de encostas (NBR 11682:2009).

Em específico para taludes rochosos, a normativa de estabilidade de encostas indica que além desses procedimentos citados devem ser realizados levantamentos que contenham areografia, foto convencional do conjunto ou ortografia do local, registro minucioso dos elementos instáveis, perfis esquemáticos indicando as dimensões desses elementos, plano de fratura e xistosidades, diques e as condições de apoio.

2.1.3 Obrigatoriedade de Instrumentação

Em certos casos é ressaltado, na normativa de estabilidade de encostas, a utilização de instrumentação para controle de deslocamentos horizontais e verticais, e do nível piezométrico. E indica que os monitoramentos podem ser iniciados antes da obra, em fase preliminar juntamente com as investigações geotécnicas e/ou durante a obra, sendo programadas de acordo com o planejamento determinado pelo engenheiro geotécnico ou geólogo responsável. A obrigatoriedade de monitoramento com instrumentação durante e pós-obra existe para algumas situações em que há tendências de deslocamentos, e são descritas no item 7.3.7.3 da NBR 11682:2009.

2.1.4 Análise da estabilidade

A análise preliminar de estabilidade de encosta é estabelecida pelo conjunto de todas as informações obtidas nos procedimentos citados nas alíneas acima, e tem por finalidade a identificação da condição atual da encosta em relação as possibilidades de ruptura com base em métodos de cálculos, sendo o mais comum a análise o equilíbrio limite entre fatias. Em seguida, caso necessário, é elaborado um anteprojeto que tem por objetivo a avaliação de orçamento e verificação das alternativas de soluções estabilizadoras.

Portanto, o resultado da análise preliminar deve ser comparado ao fator de segurança de estabilidade geral mínimo (FS), determinado de acordo com a perda de vidas humanas e as possibilidades de danos materiais e ao meio ambiente de influência, devendo seu valor ser estabelecido através das tabelas presentes tanto na norma NBR 11682:2009 de estabilidade de encostas, quanto na norma 16920-2:2021 de solo grampeado (Tabela 1, 2 e 3). O FS deve ser alcançado nas soluções de estabilização de encostas quando as condições atuais resultantes da análise preliminar não satisfazem o mínimo permitido pela norma.

Tabela 1 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas. (NBR 16920-2, 2021)

Nível de segurança	Critérios
Alto	<u>Áreas com intensa movimentação e/ou permanência de pessoas:</u> Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso. Vias públicas de centros urbanos. Edificações ocupadas (por exemplo, residências, escolas, estádios, prédios comerciais, indústrias e fábricas). Construções e/ou áreas com bens ou produtos perigosos (por exemplo, barragens de água e rejeito).
Médio	<u>Áreas com movimentação e permanência restrita de pessoas:</u> Fora da via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso. Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego moderado. Vias de serviço. Áreas de espera de serviços públicos em centros urbanos (por exemplo, plataformas de trem e metrô, pontos de ônibus). Instalações de edificações (por exemplo, estacionamentos, vias internas, áreas de lazer).
Baixo	<u>Áreas com movimentação e permanência eventual de pessoas:</u> Vias de ferrovias e rodovias de tráfego reduzido. Vias rurais. Áreas públicas abertas em centros urbanos (por exemplo, praças, estacionamentos, parques). Obras rurais. Obras temporárias com circulação restrita de pessoas e com equipe de obra e/ou monitoramento em operação.

Tabela 2 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais. (NBR 16920-2, 2021)

Nível de segurança	Critérios
Alto	<u>Danos materiais:</u> locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais por elevado período de tempo. <u>Danos ambientais:</u> locais sujeitos a acidentes ambientais graves (por exemplo, oleodutos, aterros sanitários, barragens de rejeito).
Médio	<u>Danos materiais:</u> locais próximos a propriedades de valor moderado, vias e estradas principais de acesso e áreas que afetem serviços essenciais por curto período de tempo. <u>Danos ambientais:</u> locais sujeitos a acidentes ambientais moderados (por exemplo, vias com circulação de produtos perigosos e fábricas de produtos químicos tóxicos próximos a áreas de proteção ambiental).
Baixo	<u>Danos materiais:</u> locais próximos a propriedades de valor reduzido e vias e estradas secundárias de acesso. <u>Danos ambientais:</u> locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Tabela 3 – Fator de segurança para estabilidade geral. (NBR 16920-2, 2021)

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

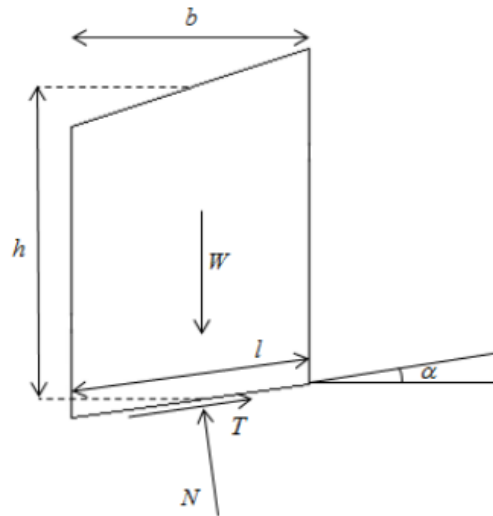
Um ponto importante de atenção, em fase de projeto, é atribuído as contenções de encostas, as quais são devem pela norma de estabilidade a serem projetadas para suportar uma sobrecarga acidental mínima de 20kPa uniformemente distribuída sobre a superfície do terreno arrimado, além dos esforços provenientes do solo. Caso essa carga seja implementada com valor inferior a 20kPa, o projetista necessita prestar devida justificativa. Outra, é obrigatoriedade da previsão de projeto e execução do sistema de drenagem, assim como a proteção contra a erosão ao longo de toda a face do talude, sendo de corte ou aterro.

Além desses pontos, a norma de estabilidade de encostas especifica a importância dos casos de projetos envolvendo contenção em rocha, expondo a necessidade do levantamento da litologia, das discontinuidades na representação estereográfica, grau de intemperização atual, inclinação do talude, condições de contato, possibilidade de sismos e demais riscos, com a finalidade de definição do mecanismo de ruptura, e respectivamente, dos tipos de soluções adequadas.

2.2 Conceitos de Alguns Métodos de Equilíbrio Limite

Segundo Gerscovich (2016), ao se formular as equações para o equilíbrio limite de um talude utilizando o método de fatias, a quantidade de incógnitas é de número superior à de equações disponíveis, com isso, o problema acaba se tornando estaticamente indeterminado. Portanto, para sua solução, criaram-se algumas hipóteses em relação à direção que é feito o equilíbrio de forças nas fatias, o que torna o problema solucionável, mas com certa diferença nos resultados.

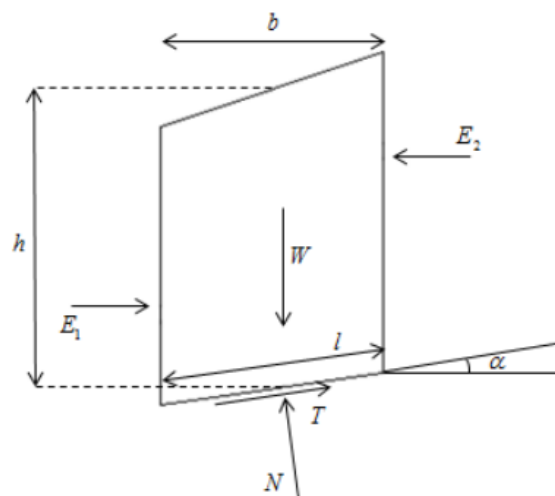
O método de Fellenius (Figura 1) foi o primeiro a ser criado e difundido (1936), onde o fator de segurança de um maciço é gerado através das equações lineares de força. Nesse modelo, as forças de interação entre fatias são consideradas paralelas inclinação média da mesma, portanto, se auto anulam, não exigindo processos iterativos e simplificando as análises de cálculos, mesmo sendo essa, uma representação na qual não se reflete a realidade (FERREIRA, 2012; GERSCOVICH, 2016).

Figura 1 – Método de Fellenius

Fonte: Ferreira, 2012

Já em 1955, Bishop (Figura 2) apresentou um modelo iterativo em que se satisfaz o equilíbrio de momentos, com a premissa na qual se ignora as forças cortantes entre as fatias, resultando em apenas forças horizontais. Esse método de cálculo apresenta bons resultados tanto em superfícies circulares, quando não-circulares (FERREIRA, 2012; GERSCOVICH, 2016).

“Zhu (2008) mostra que o facto de as forças de corte entre fatias não entrar na expressão de cálculo de FS, não quer dizer que estas sejam nulas, mas sim que um dos termos dessa equação seja zero. Isso acontece quando se adota uma distribuição ajustada das forças de corte verticais entre fatias que satisfaça, ao mesmo tempo, o equilíbrio de forças horizontais. Daí resulta a sua precisão quando comparado com outros métodos.” (FERREIRA, 2012)

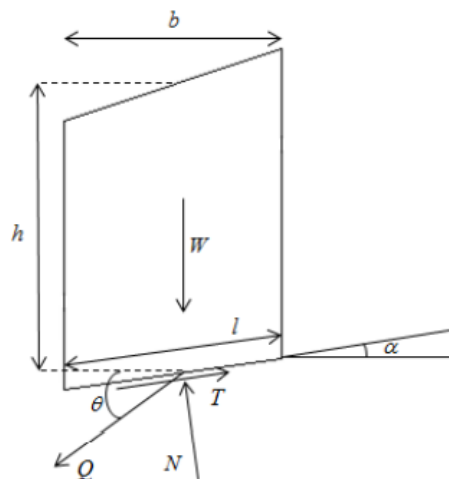
Figura 2 – Método de Bishop

Fonte: Ferreira, 2012

O método de Jambu despreza tanto as forças cisalhantes, quanto às normais entre fatias, satisfazendo o equilíbrio de forças, como a representação de Fellenius. Entretanto, induz uma multiplicação de um fator corretivo (f_0), relacionado ao tipo de solo, ao fator de segurança encontrado por iterações, que tem por finalidade certa consideração das forças antes desprezadas (FERREIRA, 2012).

Em 1967, Spencer (Figura 3) promoveu um método iterativo que satisfaz todas as equações de equilíbrio, se tornando o mais rigoroso dentre os anteriores. Para isso, foi introduzido uma força resultante Q no ponto médio da base de uma respectiva fatia, que representa a resultante estaticamente equivalente das forças de interação entre fatias, a qual possui inclinação constante ao longo de toda massa (FERREIRA, 2012; GERSCOVICH, 2016).

Figura 3 - Método de Spencer



Fonte: Ferreira, 2012

De acordo com Gerscovich (2016), os métodos de Bishop e Jambu são os mais usuais, embora não satisfaçam completamente os equilíbrios de momentos ou forças. Entretanto, em comparação com os métodos mais rigorosos, em caso de ruptura circular, a diferença em relação ao resultado do fator de segurança de Bishop não ultrapassa 5%, enquanto o de Jambu, para as superfícies não circulares, em geral, se demonstra mais conservador. Em resumo a Tabela 4 apresenta alguns Métodos de Equilíbrio Limite e suas suposições que permitem satisfazer alguma equação de equilíbrio.

Tabela 4 - Suposições, condições de equilíbrio e incógnitas em alguns procedimentos de Equilíbrio Limite. (DUNCAN; WRIGHT, 2005 *apud* SANDOVAL, 2012 adaptado)

Procedimento	Suposições	Equações de equilíbrio satisfeitas	Incógnitas a ser resolvidas
Método ordinário das fatias (<i>também conhecido como Método de Fellenius, Método sueco das fatias</i>).	A superfície de deslizamento é circular, as forças nas laterais das fatias são negligenciadas.	1 Σ Momentos sobre o centro do círculo	1 Fator de segurança
		1 Eq. total	1 Total de incógnitas
Bishop simplificado	A superfície de deslizamento é circular, as forças nas laterais das fatias são horizontais (i.e., não tem forças cisalhantes entre as fatias).	1 Σ Momentos sobre o centro do círculo	1 Fator de segurança
		$n \Sigma$ Forças verticais	n Força normal na base das fatias
		$n+1$ Equações totais	$n+1$ Total de incógnitas
Equilíbrio de forças (<i>Lowe & Karafiath, Janbu simplificado, USACE, Procedimento GPS de Janbu</i>).	A inclinação das forças entre fatias são assumidas, suposições variam com o procedimento.	$n \Sigma$ Forças horizontais	1 Fator de segurança
		$n \Sigma$ Forças verticais	n Força normal na base das fatias
		$2n$ Equações totais	$n-1$ Forças resultantes interfatias
			$2n$ Total de incógnitas
Spencer	Forças interfatias são paralelas, (i.e., todas possuem a mesma inclinação). A força normal atua no centro da base da fatia.	$n \Sigma$ Momentos sobre qualquer ponto	1 Fator de segurança
		$n \Sigma$ Forças horizontais	1 Forças interfatias com inclinação
		$n \Sigma$ Forças verticais	n Força normal na base das fatias
		$3n$ Equações totais	$n-1$ Forças resultantes interfatias
			$n-1$ Localização das forças interfatias
		$3n$ Total de incógnitas	
Sarma	Forças cisalhantes interfatias são relacionadas á resistência ao cisalhamento, S_u , por $X = \lambda f(x)S_u$; a resistência ao cisalhamento interfatias depende de: parâmetros de resistência ao cisalhamento, poropressões de água, e a componente horizontal da força interfatia; a força normal atua no centro da base da fatia.	$n \Sigma$ Momentos sobre qualquer ponto selecionado	1 Coeficiente sísmico [Fator de segurança se é usado uma tentativa de erro]
		$n \Sigma$ Forças horizontais	1 Forças interfatias fator de escala (λ).
		$n \Sigma$ Forças verticais	n Força normal na base das fatias
		$3n$ Equações totais	$n-1$ Forças horizontais interfatias (E)
			$n-1$ Localização das forças interfatias (linha de empuxo)
		$3n$ Total de incógnitas	
Morgenstern & Price	Forças cisalhantes interfatias são relacionadas às forças normais interfatias por $X = \lambda f(x)E$; a força normal atua no centro da base da fatia (usualmente).	$n \Sigma$ Momentos sobre qualquer ponto selecionado	1 Fator de segurança
		$n \Sigma$ Forças horizontais	1 Forças interfatias com inclinação, "fator de escala" (λ).
		$n \Sigma$ Forças verticais	n Força normal na base das fatias
		$3n$ Equações totais	$n-1$ Forças resultantes interfatias
			$n-1$ Localização das forças interfatias (linha de empuxo)
		$3n$ Total de incógnitas	

2.3 Solo Grampeado

2.3.1 Conceito

De acordo com a NBR 16920-2:2021, seja em taludes naturais ou de escavação, tendo função permanente ou temporária, a solução em solo grampeado é empregada com a finalidade de estabilizar o maciço de forma passiva. Ou seja, o acionamento da estrutura só ocorre quando houver a movimentação da massa a ser contida (MIKOS *et al.*, 2017). O processo de transferência de esforços para os elementos resistentes à tração, ocorre pela interação entre solo e o material ligante, que em geral é a calda de cimento (NBR 16920-2:2021).

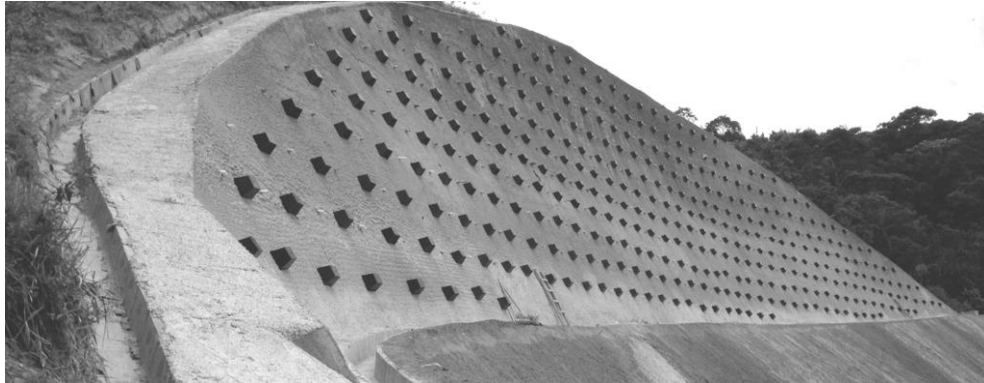
Esses elementos de recebimento dos esforços, são lineares, semirrígidos e de elevada resistência a tração e ao cisalhamento, limitando e minimizando as deformações do solo (ORTIGÃO; ZIRLIS; PALMEIRA, 1993 *apud* TEIXEIRA, 2011). Além desses materiais, a estrutura de contenção é composta de uma bainha preenchida por um material ligante, o qual realiza a transferência de esforços para os elementos a serem tensionados, e por um paramento que tem a função de evitar erosões superficiais ou possíveis instabilidades locais (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013; FREITAS, 2004).

Outro integrante, e não menos importante para o conjunto, é o sistema de drenagem, o qual tem função de redução do volume de água no interior do solo através de sua retirada ou por sua retenção prévia à acumulação ou infiltração no maciço. Em influência à estabilidade estrutural, esse sistema se propõe a evitar o aumento do empuxo hidrostático na contenção, o aumento da poro pressão e consequente redução da tensão efetiva ocasionada pela presença de água no solo (BASTOS *et al.*, 2014 *apud* MIKOS *et al.*, 2017). De acordo com Lima (2009), o não impedimento destes fenômenos como produto de um mau dimensionamento ou falta de manutenção do sistema de drenagem pode resultar em efeitos nocivos à estrutura.

Em relação à execução de contenção em solo grampeado (Figura 4), os custos são influenciados e podem variar em função à destinação permanente ou temporária da obra, tendo em vista as diferenças de obrigatoriedade na proteção contra corrosão dos grampos. Os quesitos de acessibilidade ao local, altura da contenção e o tipo de material a ser escavado e perfurado também são elementos fundamentais de formação do preço de execução da obra (LIMA, 2007). A introdução de fibras com a finalidade de substituir a armação no paramento e a calda de solo-cimento no lugar de calda de cimento, como material ligante, são tipos de medidas de redução de prazos e custos (LIMA, 2009).

“No solo grampeado o único elemento estrutural utilizado para a estabilização são os grampos. A proteção do talude em concreto projetado ou outro revestimento, como, por exemplo, revestimentos pré-fabricados, proteção superficial com vegetação, entre outros, têm custos relativamente mais baixos e podem permitir uma considerável economia em relação às outras soluções convencionais.” (TEIXEIRA, 2011)

Figura 4 - Exemplo de solo grampeado. São Bernardo do Campo, São Paulo



Fonte: solofort.com.br/. Acesso: 26 de agosto de 2021

2.3.2 Vantagens e Desvantagens

O solo grampeado pode se assemelhar com o muro de peso, em concepção na qual o agente estabilizador é a resistência ao cisalhamento que é desenvolvida no contato com reforço (SOUZA, 2019). Entretanto, para grandes desníveis, essas soluções de muros gravitacionais se tornam inviáveis, além dos casos em que há restrições na área livre horizontal para implementação de uma base de dimensões efetivas para a estabilização. Dessa forma, as contenções ativas, como a cortina atirantada, e passivas, de solo grampeado, ganharam espaço no mercado por serem compactas, utilizarem quantidade reduzida de material e terem baixo impacto ambiental (LIMA, 2007; SILVA, 2010).

“O solo grampeado é uma técnica de contenção de maciços que está inserida nesse contexto e atualmente tem sido amplamente utilizada no Brasil e no mundo por ser de rápida execução e apresentar alto desempenho” (GONDIM, 2018). De acordo com Clouterre (1991), a velocidade de construção desse tipo de contenção é rápida, tendo em vista a sua execução simultânea com a escavação.

Em comparação com as cortinas atirantadas, uma das principais vantagens do solo grampeado está relacionada ao custo geral da obra, que apresenta significativa economia, o que a faz atrativa também em soluções de estabilização que combinam mais de uma técnica de contenção ou aquelas com limitação de altura (LIMA, 2007). Além disso, por ter a tendência de redução de material em relação a outros tipos de contenção e por exigir apenas equipamentos de pequeno e médio porte, esse tipo de contenção é bastante vantajoso quando

se pretende empregá-lo em locais de difícil acesso (TEIXEIRA, 2011). Uma observação realizada pelo Manual Técnico de Encostas está relacionada a importância de previsão do espaço livre para as instalações dos equipamentos e das perfuratrizes.

O solo grampeado é uma solução bem interessante, tendo em vista sua adaptabilidade a solos heterogêneos e por existir a possibilidade de ajuste de projeto durante sua execução (FLORIANO, 2009). Entretanto, algumas das suas desvantagens estão relacionadas aos deslocamentos horizontais e verticais provocados pela flexibilidade da estrutura junto a escavação, impedindo sua implementação em locais com pouca tolerância ou obrigando a alocação de ancoragens convencionais para a diminuição das resultantes de deslocamento (CLOUTERRE, 1991; ORTIGÃO; ZIRLIS; PALMEIRA, 1993). Outra, é a impossibilidade de utilização em solos não-coesivos, como em alguns casos de areias ou argilas com baixos parâmetros de resistência, devido a não garantia de estabilidade durante as escavações. (CLOUTERRE, 1991; LIMA, 2007). Além dessas desvantagens, está a impossibilidade de construção desse tipo de contenção abaixo do nível d'água sem o seu devido rebaixamento (CLOUTERRE, 1991).

De acordo com a NBR 16920-2:2021, referente a solo grampeado, e Silva (2010), durante a execução dos grampos da estrutura, o preenchimento da bainha com o material ligante tem elevada importância, pois esse material injetado transfere as tensões do solo para as inclusões. Uma das principais falhas que geram acidentes em solos grampeados se dá pelo preenchimento incompleto de material ligante ao longo do furo, que pode causar instabilidade e deixar os grampos suscetíveis à corrosão (JAYAWICKRAMA *et al.*, 2007 *apud* MIKOS *et al.*, 2017). Esse tipo de falha pode ocorrer pela falta de detecção de erros no processo executivo, podendo ser prevenido com reinjeções de calda, controle da pressão de injeção, instrumentação e testes de arrancamento para confirmação da resistência solo-grampo (FLORIANO 2009; MIKOS *et al.*, 2017; SILVA 2010).

2.3.3 Composição e Execução

- Grampos

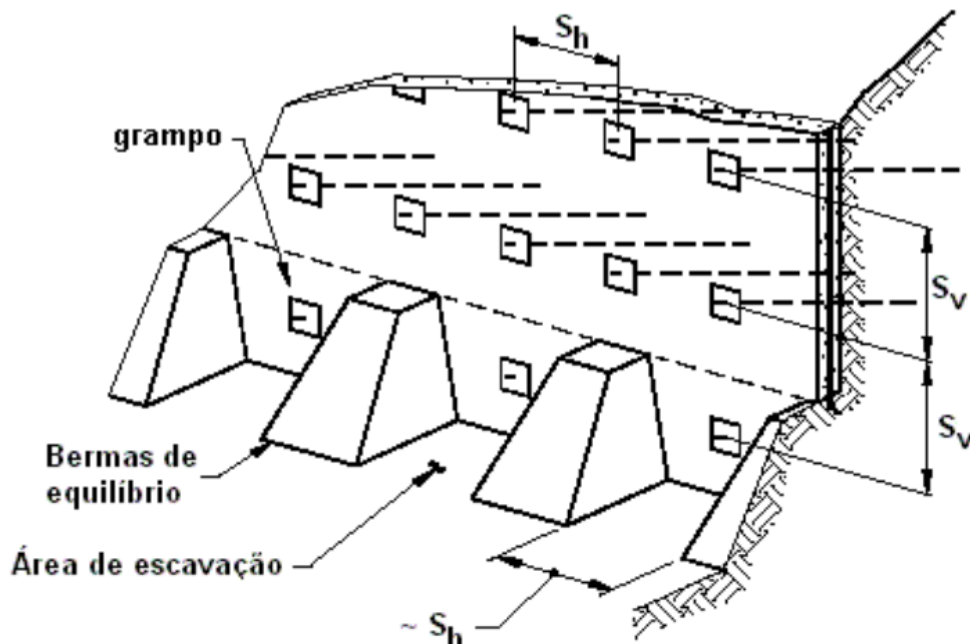
Segundo Teixeira (2011), as inclusões denominadas grampos, são submetidas aos esforços normais de tração, mas é possível a ocorrência de solicitações transversais resultando em tensões de cisalhamento e flexão. No decorrer da obra, os grampos já executados podem começar a ser progressivamente mobilizados, principalmente à esforços de tração, durante três ou quatro fases subsequentes de escavação, devido a descompressão lateral do solo

(CLOUTERRE, 1991). Desse fato e de movimentos de fluência ou rastejo chamado “*creep*”, derivam-se deformações que podem levar a carregamentos axiais adicionais nos grampos, os quais não são previamente calculados, mas podem ser considerados com a adoção de fator de segurança mais conservador (LAZARTE *et al.*, 2003 *apud* LIMA, 2007).

Esse processo de escavação ocorre quando há necessidade de ajuste da inclinação do maciço, e é feito de forma descendente, geralmente em bancadas ou bermas (Figura 5), de alturas dependentes do tipo de terreno e inclinação da face a ser escavada, com a finalidade de evitar maiores instabilidades (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013; GEO-RIO, 2020). Para aumento da produtividade, uma solução foi criada pela introdução de chumbadores verticais nas cristas previamente às escavações (Figura 6), aumentando a estabilidade e, por vezes, substituindo as bermas (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013; SOUZA, 2019). A metodologia de escavação, execução dos grampos e o grau de inclinação podem variar de acordo com a devida justificativa do projetista (ABNT NBR 16920-2:2021).

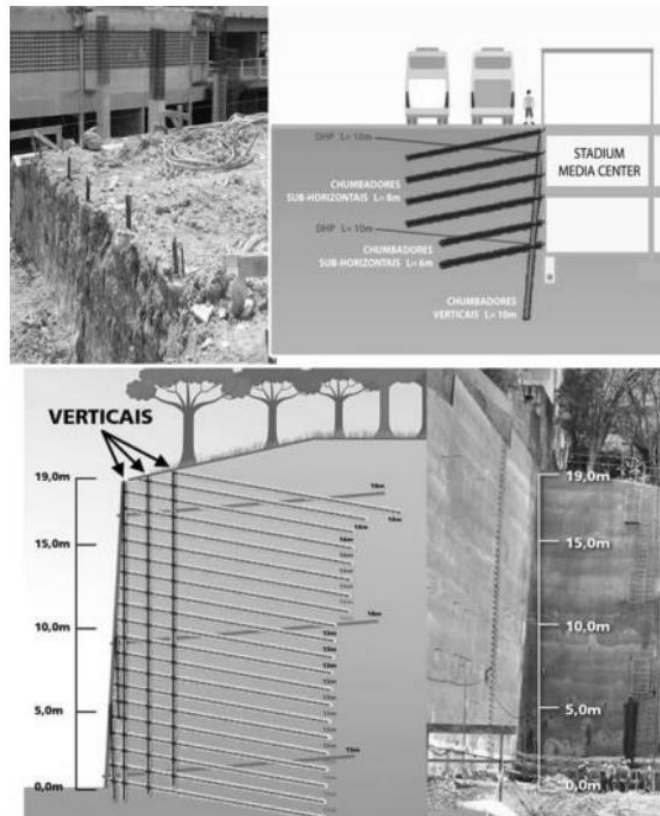
“A inclinação dos grampos é em relação à horizontal e deve estar compreendida entre 10° e 20° , sendo comumente empregado o valor de 15° . Entretanto, este valor não deve ser menor que 10° , pois pode criar bolsas de ar durante as injeções que consequentemente diminuiriam o valor da resistência de aderência.” (GONDIM, 2018)

Figura 5 - Processo de escavação em bermas



Fonte: LAZARTE *et al.*, 2003 *apud* LIMA, 2007

Figura 6 - Exemplo de chumbadores verticais



Fonte: PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013

O elemento linear incluso no solo com finalidade de suportar os esforços, varia em material entre aço e polímero, que pode ser de seção circular ou retangular (LIMA, 2019; NBR 16920-2:2021). Seguindo a norma de solo grampeado, para proteção contra a corrosão nos casos de barras de aço em obras permanentes (>2 anos), antes a sua inclusão no furo, é obrigatório realizar, adicionalmente ao preenchimento da bainha, pelo menos uma das medidas para assegurar seu desempenho ao longo da vida útil: a galvanização por imersão a quente, pintura industrial ou consideração da redução do diâmetro útil (Tabela 5), chamada espessura de sacrifício. Esses procedimentos podem ser realizados isoladamente ou em conjunto de acordo com a agressividade do meio.

Apesar da norma ser recente, já se iniciaram pontos de discussão em relação a pintura de proteção ser exclusivamente industrial. Devido à falta de controle da pintura dentro do canteiro de obra, tornou-se excludente esse método por norma, que a caracterizou como proteção não segura contra corrosão. Outra alegação, é que na aplicação de uma pintura realizada industrialmente, consegue se atingir maior qualidade no preparo, escolha correta da tinta, espessura e qualidade de aplicação. Entretanto, o que se discute é a resistência da pintura industrial em meio as operações que se desenvolvem em obra, como transporte,

montagem e instalação, a qual a barra de aço fica sujeita frequentemente a desgastes, danos e arranhões. Outro ponto de discussão é a distinção com a NBR 5629:2018, referente a tirantes ancorados que são utilizados em contenções ativas, na qual tipifica a opção de pintura somente com a caracterização de ser específica para proteção anticorrosiva, com deformação mínima igual ou superior à deformação elástica do aço, não restringindo um local ou modo de preparo.

Tabela 5 -Redução por corrosão superficial da armação de aço em função do meio e vida útil (mm). (NBR 16920-2, 2021)

Meio	Tipo de solo	Vida útil		
		5 anos	25 anos	50 anos
Não agressivo	Solos naturais inalterados	0	0,30	0,60
	Aterros compactados (areia, silte, argila etc.)	0,09	0,35	0,60
	Aterros não compactados (areia, silte, argila etc.)	0,18	0,70	1,20
Agressivo	Solos naturais poluídos e regiões industriais	0,15	0,75	1,50
	Solos naturais (pântano, turfa, solos orgânicos)	0,20	1,00	1,75
	Aterros não compactados ou compactados (cinzas, escórias etc.)	0,50	2,00	3,25

NOTA Considera-se meio agressivo o solo que apresente pH igual ou menor a 5 ou solo orgânico.

Citadas na norma, existem algumas técnicas de instalação, sendo as principais de perfuração, autoperfurantes e cravadas, a qual não há bainha. Outros modos de instalação podem ser realizados caso haja justificativa e podem variar com a adição de fibras de aço ou sintéticas em sua composição. O modo de inclusão baseada em perfuração consiste em realizar, com a utilização de perfuratriz, um furo circular no solo com diâmetro de 75 a 150 milímetros, cujo valor é determinado pelo projetista e baseada no diâmetro da inclusão e área de contato desejada entre o material ligante e o solo. Sua limpeza com fluidos é de grande importância, podendo melhorar o desempenho do grampo (ORTIGÃO 1997 *apud* LIMA 2007), e deve ser realizada com água, lama, ou a seco com ar comprimido (TEIXEIRA, 2011).

Por seguinte, acontece a introdução da barra de aço ou outro material de inclusão em conjunto com espaçadores e centralizadores, a cada 2 ou 3 metros, para a proteção e recobrimento (LIMA, 2007). Simultaneamente e atrelada com a inclusão, são inseridos tubos de injeção, geralmente de polietileno, com válvulas espaçadas para a garantir o preenchimento da bainha por calda de cimento ou outro material ligante. A calda tem fator água/cimento por

volta de 0,5 a 0,7 e é injetada com utilização de um sistema de ar comprimido, que preenche a bainha gradualmente a partir do fundo do furo de forma ascendente até o material extravasar na boca sem resíduos (GEO-RIO, 2020; TEIXEIRA, 2011).

Segundo Lima (2007), sendo função da calda a transferência dos esforços do solo para o aço, é importante a boa caracterização e propriedades da mesma. Ele ainda cita em seu trabalho que há casos de mais de uma injeção de calda de cimento, as quais devem ser espaçadas em no mínimo 12 horas com finalidade de melhorar a ancoragem. A cada injeção, os tubos são perdidos e com isso, a quantidade de tubos deve seguir as de fases de injeção, que devem ser decididas anteriormente ao início da execução das injeções.

A técnica de grampos autoperfurantes varia da primeira ao passo que o elemento metálico não é sólido, e sim, segundo a norma, uma monobarra vazada, a qual é incluída ao solo como elemento junto aos acessórios da perfuração pela perfuratriz rotativa. A injeção ocorre no centro de sua ponta após atingir a metragem total do furo, logo não há possibilidade de reinjeção.

A próxima técnica a ser citada, ocorre pela cravação no solo de cantoneiras ou barras de aço de seção circular, com auxílio de martelo, resultando na inexistência da bainha a preencher. Entretanto, sua maior suscetibilidade à corrosão exige uma proteção extra, além da espessura de sacrifício já obrigatória por norma nesse modo de inclusão. Esse método tem desvantagem com o resultado de uma menor resistência ao cisalhamento entre o solo e o grampo e sua utilização é limitada a 6 metros de comprimento (LIMA, 2007 *apud* TEIXEIRA, 2011).

Seguindo a norma em vigência de solo grampeado e atendendo a NBR 6118, as emendas das barras de aço devem ser feitas por soldas, com exceção das barras que forem galvanizadas, ou por luvas, as quais devem ser protegidas da mesma forma que o grampo. Se a proteção contra a corrosão for apenas por espessura de sacrifício e a emenda for feita por luva, as dimensões da emenda devem se apresentar de forma em que a perda da espessura de sacrifício não afete a resistência do elemento em sua totalidade.

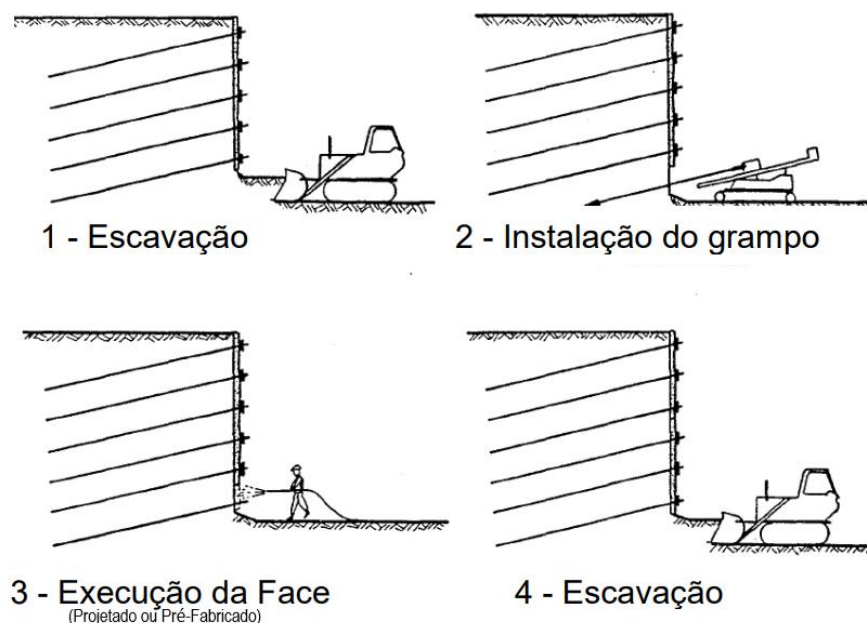
Segundo Lima (2007), sendo a corrosão um dos fenômenos mais importantes associados à durabilidade da estrutura, existem outras medidas que podem ser tomadas para garantir a vida útil, como aumento da seção do aço, revestimentos especiais e proteção com separadores plásticos reforçados com fibra ou recicláveis nos grampos. Uma alternativa seria a substituição do aço por grampos produzidos por argamassa reforçada com fibras de polipropileno, o que limita sua resistência ao arrancamento, mas se torna viável no ponto de vista econômico (MAGALHÃES, 2005; LEITE, 2007 *apud* LIMA, 2007).

- Paramento

“Paramento é um conjunto de elementos que produzem o revestimento externo dos muros e taludes de solo reforçado ou grampeado” (NBR 16920-2:2021). Sendo assim, sua função é evitar as erosões superficiais do maciço e ainda, pode garantir a estabilidade local (FREITAS, 2004). Em essência, não possui função estrutural no conjunto de contenção, mas em verificações de punção, cisalhamento e flexão junto aos grampos, pode ganhar função de prevenir rupturas locais, e assim, deve ser dimensionada conforme a NBR 6118, seguindo a NBR 16920-2:2021. Segundo o Manual Técnico de Encostas do Instituto de Geotecnia do Município do Rio de Janeiro (Geo-Rio), quando a face não tem função na estabilização são leves, e em algumas situações podem até ser dispensadas.

De acordo com Ortigão, Zirlis e Palmeira (1993), essa face, na maioria das contenções em solo grampeado, é composta por tela soldada, com proteção à corrosão, e concreto projetado por via seca ou úmida, com suas juntas frias. Contudo, também encontramos outras soluções como fibras de aço, sintéticas ou termoplásticas introduzidas no próprio concreto a ser projetado, além de painéis pré-moldados de concreto ou geossintéticos associados a revestimentos vegetais (TEIXEIRA; 2011). Outra solução são os blocos pré-fabricados Terraes de encaixe seco que permitem a direta drenagem superficial da estrutura (SARAMAGO *et al.*, 2005 *apud* LIMA, 2007). Na Figura 7 são apresentadas as fases de execução do solo grampeado.

Figura 7 - Fases de construção do solo grampeado

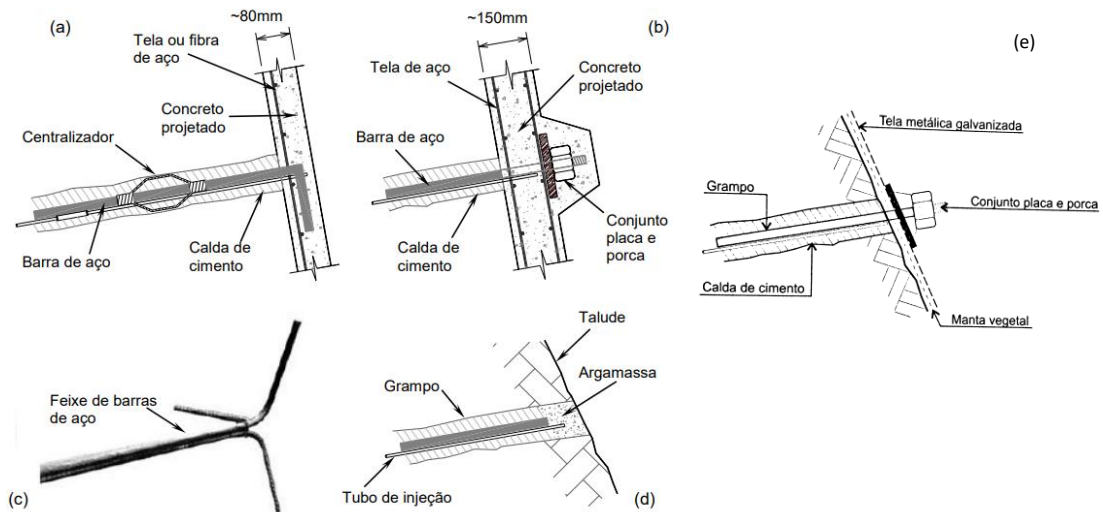


Fonte: CLOUTERRE, 1991 (adaptado)

Acessórios protegem e conectam o grampo com a face e impedem, junto a calda, o deslocamento do elemento a receber as tensões geradas pela tendência de movimentação do solo (SPRINGER *et al.*, 2001 *apud* Silva, 2010). Conforme a norma, placas metálicas, cunhas e porcas são os componentes mais usuais e devem ser cobertos, se não galvanizados, de concreto com recobrimento mínimo de 30 mm, que tem por finalidade proteção dos elementos à corrosão, chamando-se o conjunto de cabeça de ancoragem.

Citado por Lima (2009) e Freitas (2004), também encontramos finalizações com dobras dos elementos tensionados embutidos no concreto projetado para diâmetros de barras menores de 20 mm, sendo obrigatório por norma adoção de proteção contra corrosão que atenda à vida útil do projeto. Outra opção possível, é o emprego dos grampos sem a cabeça nos casos de associação à revegetação da face e drenagem superficial em taludes com inclinações inferiores a 60° (Figura 8) (Ehrlich, 2003 *apud* Geo-Rio, 2020).

Figura 8 - Tipos de cabeça para grampos: embutida na face por meio de dobra do aço (a), fixada por placa metálica, rosca e porca (b), feixe de barra embutido na face por dobra (c), sem cabeça (d) e com manta vegetal, tela, porca e placa (e)



Fonte: DIAS *et al.*, 2006 *apud* GEO-RIO, 2020, EHRLICH, 2003 *apud* GEO-RIO, 2020 e GEO-RIO; 2020 (adaptado)

- **Drenagem**

Segundo Gerscovich (2016), a taxa de infiltração de água no maciço depende de vários fatores, que entre eles estão a inclinação do talude, a condutividade hidráulica do solo superficial, que é a propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta no meio, e a intensidade das chuvas. Para o correto direcionamento do fluxo de água externo e interno do maciço, deve ser realizado o estudo hidrológico e, em sequência, o projeto de

drenagem, que segundo Mikos *et al.* (2007), tem o custo muito baixo em comparação ao aumento da segurança gerado quando o sistema previsto for eficiente.

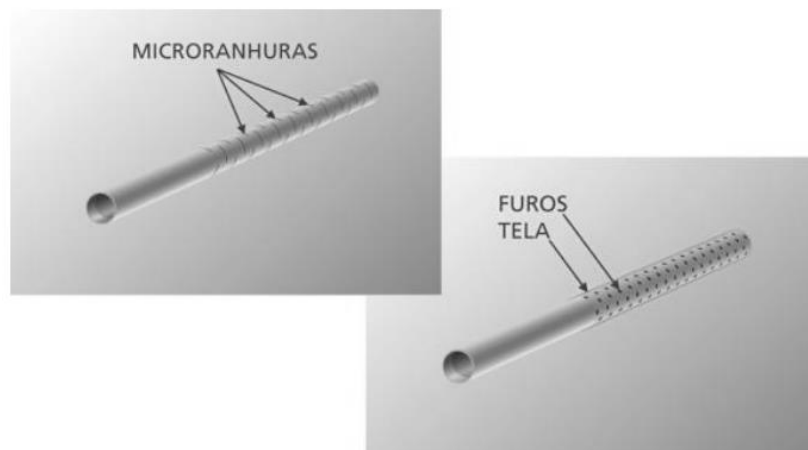
A drenagem é projetada seguindo o nível de água obtido pelas sondagens e deve ser realizada concomitante à estrutura de contenção (LIMA, 2007; LIMA, 2009). Geralmente é composta por dispositivos externos, os quais devem estar contemplados no projeto geral de drenagem ou no da contenção, e internos, que devem estar detalhados no projeto da contenção (NBR 16920-2:2021).

“Durante a execução da obra, deve ser definida a profundidade do nível do lençol freático a fim de verificar o dimensionamento dos drenos no projeto. De tal modo, os dispositivos devem ser instalados antes da construção da parede de concreto, para evitar o fluxo de água dentro do maciço.” (MIKOS *et al.*, 2007)

I) Drenagem Profunda (Interna)

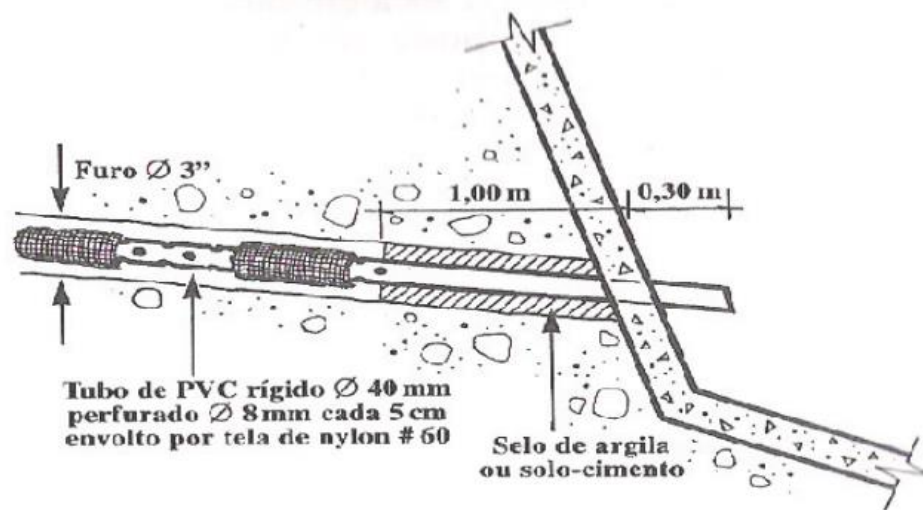
Segundo Teixeira (2011), são utilizados para captação e afloramento das águas que se encontram distantes da face, infiltradas ou até abaixo do nível d’água, os elementos chamados DHP’s (Drenos Sub-horizontais Profundos) (Figura 10). Esses tubos plásticos de PVC devem ter comprimento maior que os grampos e podem variar de 6 a 24 metros e 1 ¼” a 2” de diâmetro e são introduzidos em perfurações que variam de 2 ½” a 4” (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013). Possuem ao longo de todo seu comprimento furos para a captação da água e, para evitar colmatações, tela de nylon ou mantas geotêxtil recobrem o dreno. Há soluções de substituição dos furos de captação por microrranhuras de 0,4 mm que dispensam o uso do recobrimento (Figura 9) (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013). O espaçamento dos drenos depende da permeabilidade do solo, índice pluviométrico da região e nível d’água (LIMA, 2009) e são inclinados de acordo com a pressão hidrostática, podendo ser ascendentes, horizontais ou descendentes.

Figura 9 - Microrranhuras ou Perfuração com tela



Fonte: PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013

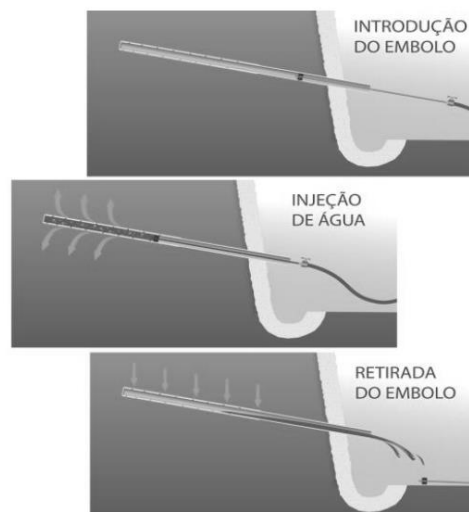
Figura 10 - Exemplo de detalhamento DHP



Fonte: PINI, 1998 *apud* FREITAS 2004

A manutenção das tubulações drenantes (Figura 11) e simples inspeções podem evitar manifestações patológicas nas estruturas (MIKOS *et al.*, 2017). Essas ações devem ser realizadas anualmente por meio da introdução até o fundo de um êmbolo de mesmo diâmetro, ou da ordem de 1mm inferior, e mesmo comprimento das tubulações sequenciado pelo bombeamento de água através dele e sua retirada gradual mantendo a injeção de água para a limpeza total do interior do dreno (HACHICH *et al.*, 2002 *apud* CAMPOS, 2015). Esse procedimento deve ser repetido até que a água extravasada seja tão limpa quanto a injetada (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013).

Figura 111 - Manutenção DHP



Fonte: PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013

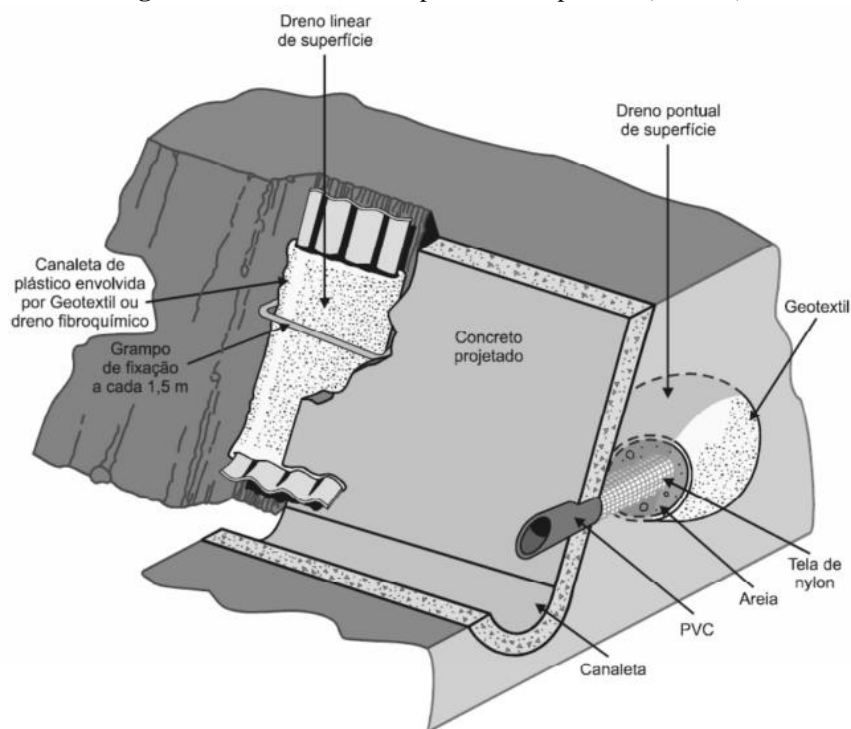
II) Drenagem de Paramento (Interna)

Para uma drenagem pontual e alívio da pressão da água que chega ao paramento, são realizados drenos curtos, conhecidos como barbacãs. Esse dreno interno é resultado de escavação cúbica no paramento com dimensões de 30 ou 40 cm, revestido por manta geotêxtil, preenchido com material granular ou areia e um tubo de PVC drenante curto, centralizado com saída no paramento e de inclinação descendente (PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013).

Outra solução de drenagem pontual é chamada de linear contínua ou dreno de paramento. Formada por uma calha plástica ondulada drenante envolta em manta geotêxtil e fixada por grampos, seu comprimento se estende ao longo de todo o paramento, da crista ao pé do talude, onde se prevê uma canaleta superficial para o direcionamento da água. A profundidade comum para a escavação do sistema é de 10 cm e sua largura é de 30 cm (GODIM,2018; FREITAS, 2004; MIKOS *et al.*, 2017).

Há soluções, citadas na norma de solo grampeado (NBR 16920-2:2021), que misturam os dois conjuntos de drenagem superficiais, com a captação da água pelo dreno linear, mas com acréscimo da possibilidade de escoamento por barbacãs ao longo dele, além da saída no pé do talude diretamente nas canaletas de concreto projetado ou pré-moldado. Os dois tipos de dreno de paramento estão representados na Figura 12.

Figura 12 - Dreno linear de paramento e pontual (barbacã)



Fonte: PITTA; SOUZA; ZIRLIS, 2013

Em áreas urbanas, os drenos profundos e de paramento devem ser executados mesmo em locais onde não se alcança lençol freático ou nível d'água, pois é recorrente vazamentos de água e esgoto no subsolo pelas tubulações e galerias (CAMPOS, 2015). Nas soluções onde se prevê face permeável, como a solução vegetal ou blocos pré-fabricados Terrae, se desobriga realização de sistema de drenagem de paramento (FERREIRA JR. *et al.*, 2006, SARAMAGO *et al.*, 2005 *apud* LIMA, 2007).

III) Drenagem Superficial (Externa)

A drenagem superficial é externa à estrutura e tem função de captar e direcionar a água até um local seguro com a finalidade de evitar processos erosivos na superfície, na crista e no pé do talude (SPRINGER, 2006 *apud* LIMA, 2009). São previstas canaletas na crista e no pé do muro para exercer esse papel, assim como caixas coletoras e descidas d'água por escadas hidráulicas ao longo do mesmo (Figura 13) (TEIXEIRA 2011). Segundo a norma de solo grampeado, como a estrutura de solo grampeado é dimensionada para permitir certos deslocamentos, devem ser tomadas algumas precauções e resoluções em relação a estanqueidade e deslocamentos das tubulações e canaletas.

Figura 13 - Solo grampeado com drenagem superficial de descida de água em escada. Piraí, RJ



Fonte: resitecontencoes.com.br/. Acesso: 26 de agosto de 2021

2.3.4 Mecanismo Solo-Grampo

Para o dimensionamento dos reforços em solo grampeado, é de grande importância a análise evolutiva das tensões durante o processo construtivo (TEIXEIRA, 2011). Devido a descompressão lateral do solo, gerada pelas escavações, os grampos são solicitados, em

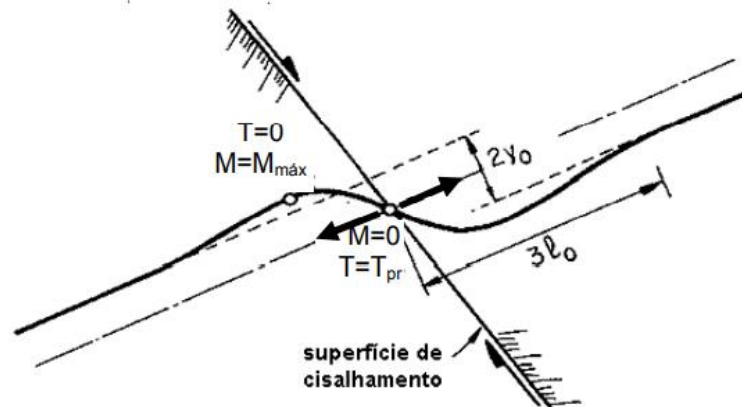
primeiro momento, a esforços axiais de tração. Para entendermos a associação entre grampo e solo é necessário conhecer os parâmetros e propriedades do solo e as características e método de execução dos grampos, que resultam no mecanismo de resistência ao cisalhamento entre esses dois elementos (LIMA, 2007; SOUZA, 2019). “Os esforços axiais podem aumentar moderadamente (em geral, cerca de 15%) no intervalo de tempo entre o final da construção e a longo-prazo” (LAZARTE *et al.*, 2003 *apud* TEIXEIRA, 2011).

Além das deformações geradas pelo processo executivo de escavação, outras deformações laterais do solo podem estar associadas à movimentação natural do talude, enquadrando os casos em que não há cortes no perfil do maciço (FEIJÓ, 2007). Em resultado a essas deformações, dois tipos de interações são desenvolvidos entre solo e o grampo. A primeira interação, é decorrente ao cisalhamento do solo aplicado ao longo do grampo, que induz a tensão principalmente de tração no aço (LIMA, 2007). Dessa interação de atrito, se extrai o parâmetro de resistência da interface solo-grampo (q_s) que deve ser superior ao valor gerado pela tensão de estabilização que é submetido o grampo.

Silva (2010) cita e detalha alguns aspectos que influenciam na resistência de cisalhamento solo-grampos: (i) fenômeno de dilatância em solos granulares compactos; (ii) processo de injeção da calda de cimento; (iii) teor de umidade no solo; (iv) deformação interna do maciço reforçado; (v) inclinação do grampo com a horizontal; (vi) método executivo da perfuração.

A segunda interação, se desenvolve caso ocorra uma zona de cisalhamento na massa de solo (Figura 14), que produz nos grampos momentos fletores e tensões cisalhantes (SOUZA, 2019). De acordo com Lima (2007), se os grampos forem considerados rígidos, a plastificação nos pontos de máximos momentos fletores, os quais sempre estarão localizados fora da superfície de ruptura, praticamente nunca corresponderá a ruptura.

Figura 14 - Grampos submetidos à flexão e esforços cisalhantes



Fonte: SCHLOSSER, 1982 *apud* LIMA, 2007

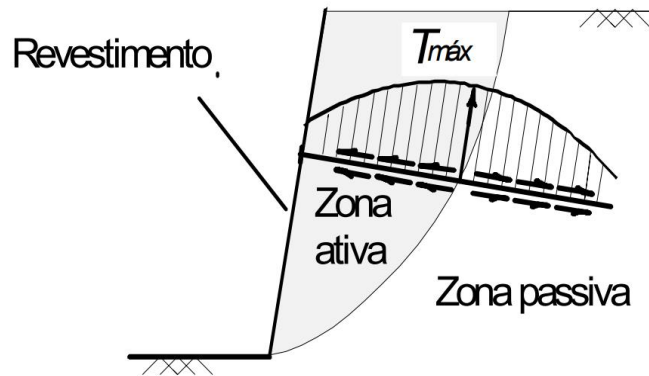
“Em geral, a flexão afeta no máximo 3% o fator de segurança em solos e por isso costuma ser desprezada.” (Geo-Rio, 2020). Em caso específico de estabilização de talude natural com inclinação suave em que a direção da superfície de ruptura é ou está quase perpendicular aos grampos, Feijó (2007) observou que os esforços de cisalhamento e flexão podem ser significativos nas análises de estabilização e os grampos devem ser dimensionados para tal, se atentando principalmente na influência dessas tensões sobre região da superfície de ruptura e junto à face devido à rigidez da parede. Em solos granulares, quando submetidos a esforços cisalhantes, provocam aumento na área de influência do grampo em função da consistência e compacidade do solo (SOUZA, 2019). E em caso de rochas, o comportamento da massa deslizante sobre a superfície de ruptura tende a ser rígido, como a de blocos rochosos, levando a formação de significativas tensões cisalhantes.

2.3.5 Ensaio de Arrancamento

A principal interação de estabilização é a do solo-grampo, tendo em vista que a indução das tensões no grampo é gerada pelo atrito mobilizado através dos esforços de movimentação do maciço e, com isso, seu subdimensionamento pode provocar o arrancamento do grampo no contato solo-calda. Portanto, o atrito desenvolvido ao longo da interface calda de cimento com o solo consiste no que chamamos de atrito unitário ou o parâmetro de resistência da interface solo-grampo q_s . “O valor de q_s pode ser influenciado pelo método de colocação do grampo no maciço e pelo grau de saturação do solo” (CLOUTERRE, 1991).

A tensão é transmitida do material ligante para o material a ser tracionado, o principal elemento de resistência e absorção dos esforços, no qual sua interface com a nata de cimento é geralmente mais resistente em relação à interface solo-calda. Dessa forma, podemos indagar que a máxima tensão de tração para arrancamento dos grampos ($T_{m\acute{a}x}$) será na intercessão do elemento com a superfície potencial de ruptura do solo, onde se separa as zonas ativas e passivas (Figura 15) (FREITAS, 2004).

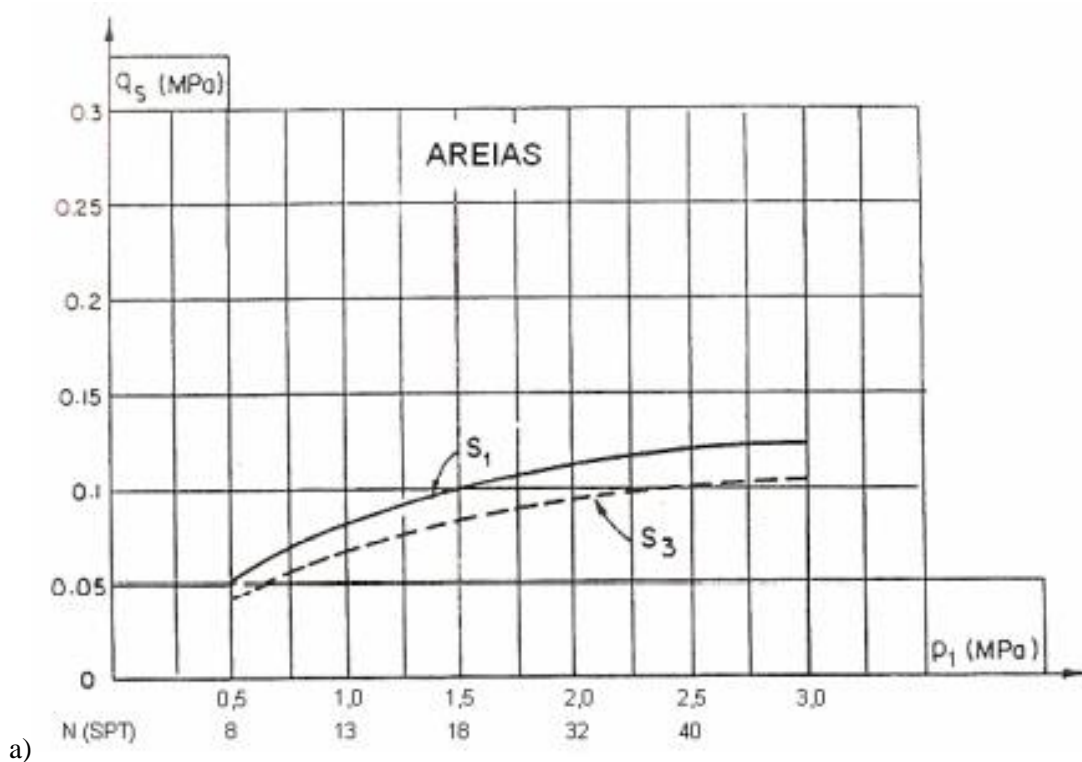
Figura 15 - Mecanismo de transferência de carga

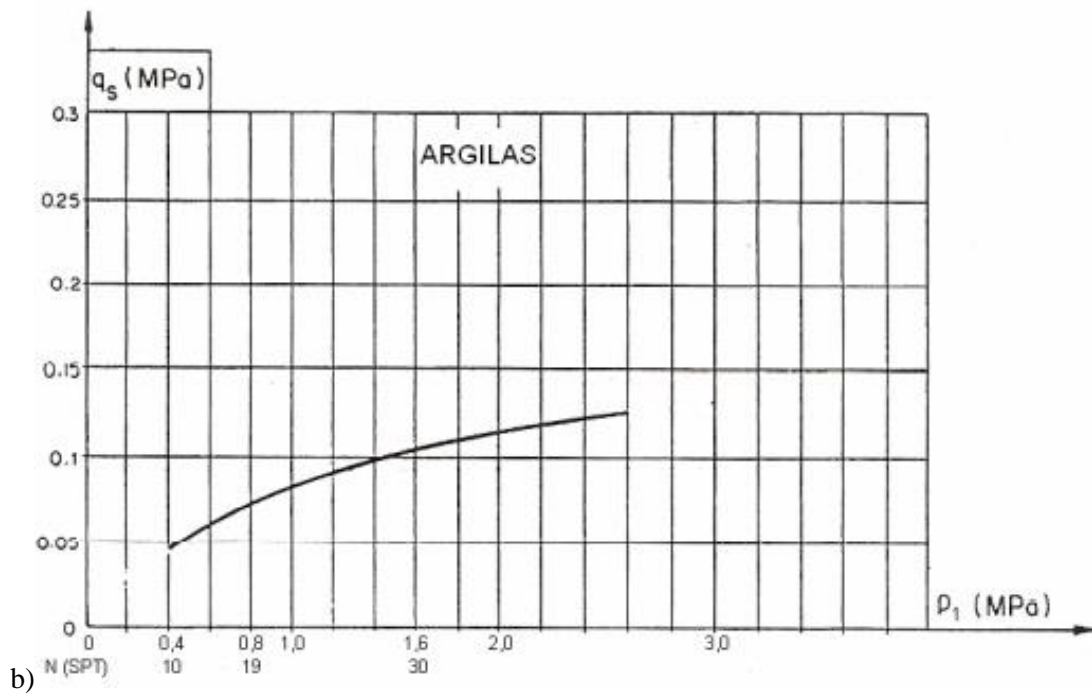


Fonte: ORTIGÃO; ZIRLIS; PALMEIRA, 1993

Existem várias correlações empíricas de q_s , com o N(SPT) em diferentes tipos de solo. Clouterre (1991) (Figura 16), Ortigão e Sayão (2000) (Figura 18), Bustamante e Doix (1985) (Figura 17) e Springer (2006) (Figura 19) possuem estudos dessas correlações.

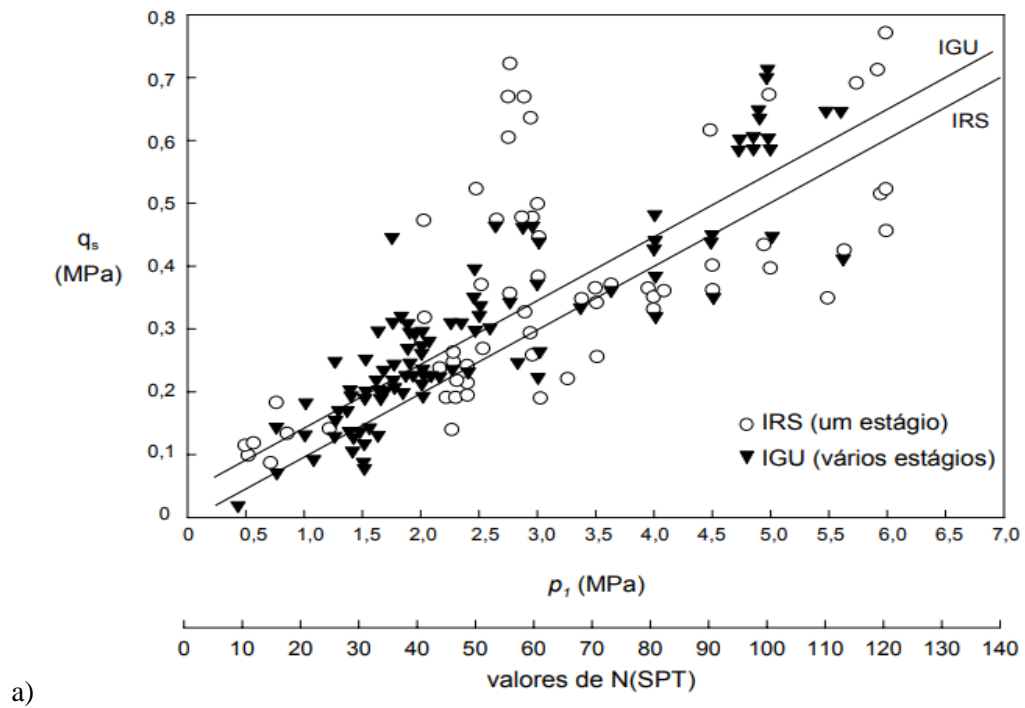
Figura 16 - Correlações empíricas para q_s com a pressão limite pressiómetro (p_1) para solos arenosos (a) e para solos argilosos (b)

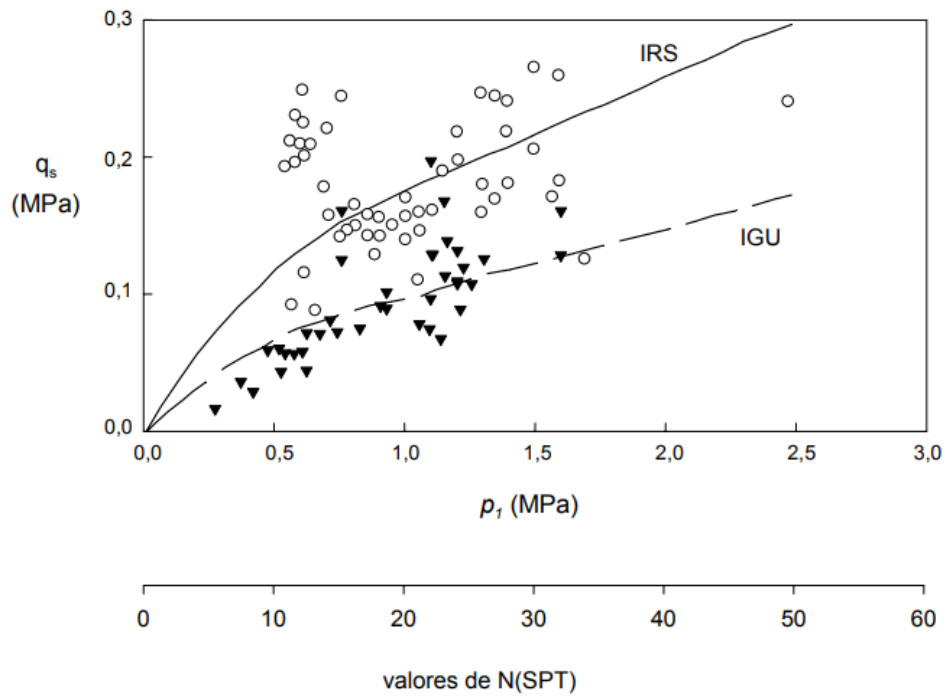




Fonte: CLOUTERRE, 1991 *apud* LIMA, 2007 (adaptado)

Figura 17 - Correlações empíricas para q_s em areias (a) e argilas e siltes (b)

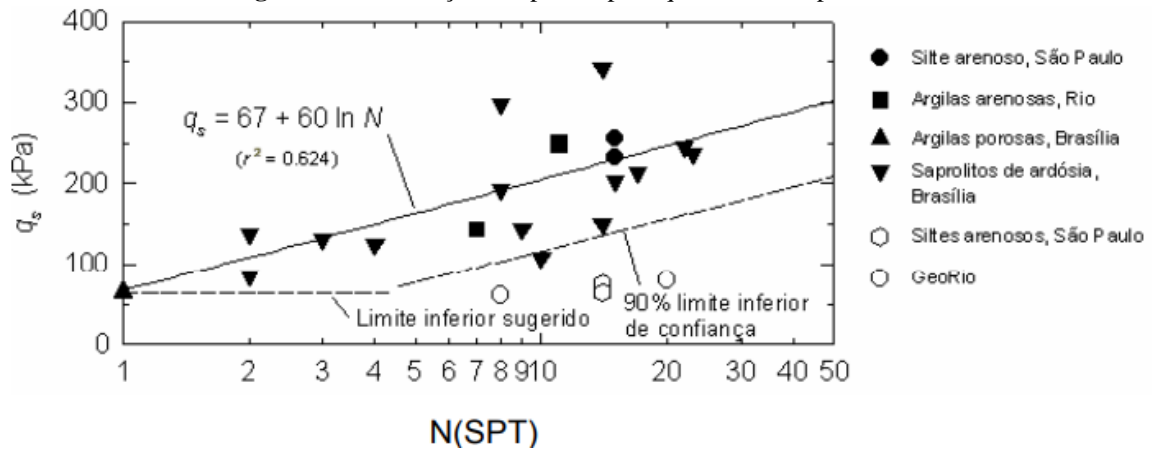




b)

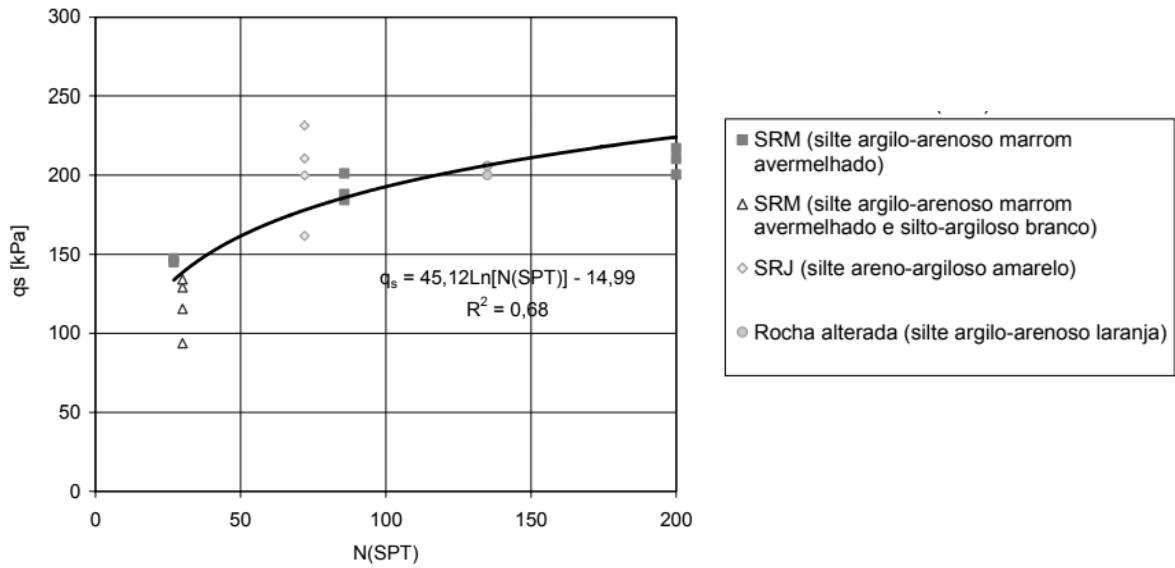
Fonte: BUSTAMANTE E DOIX, 1985 *apud* LIMA, 2007

Figura 18 - Correlações empíricas para q_s em vários tipos de solo



Fonte: ORTIGÃO; SAYÃO, 2000 *apud* LIMA, 2007

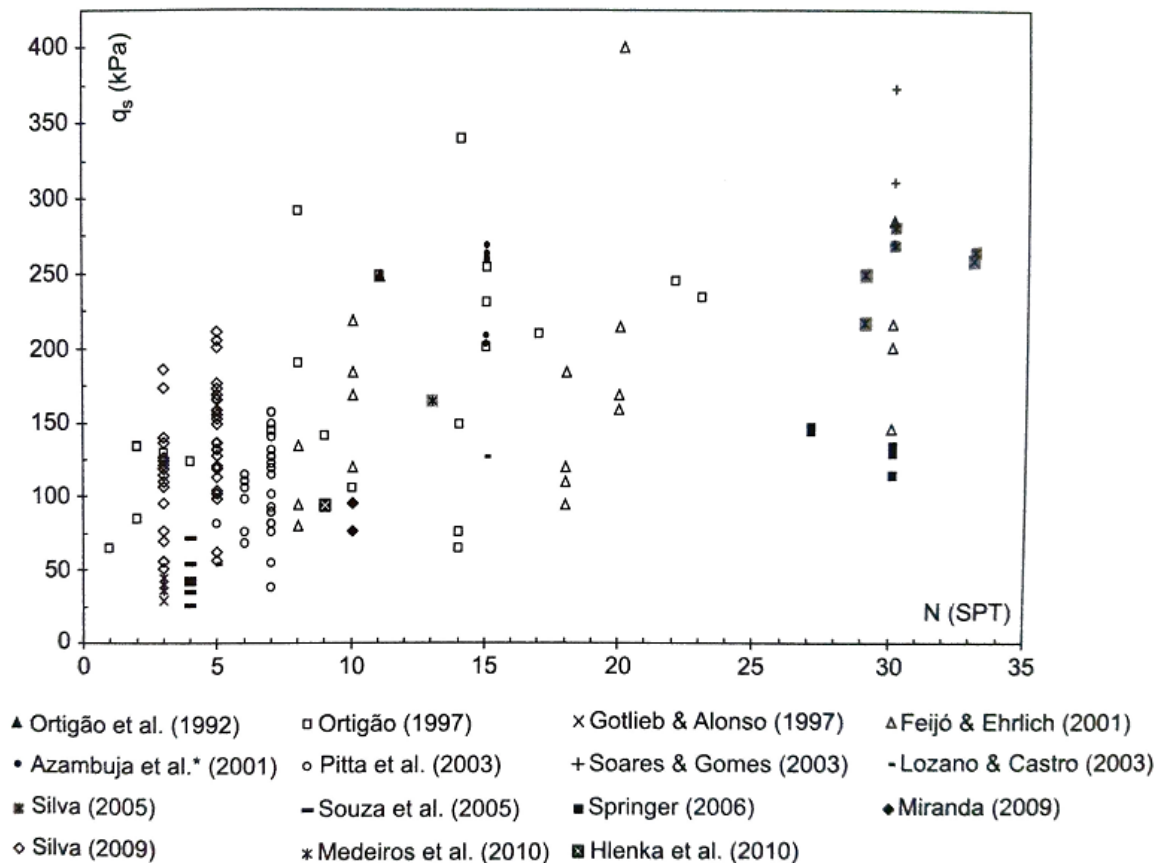
Figura 19 - Correlações empíricas para q_s para solo residual de gnaiss



Fonte: SPRINGER, 2006 *apud* LIMA, 2007

Em um gráfico (Figura 20), o Silva e Ehrlich (2012) *apud* Geo-Rio, realizaram um condensado de resultados brasileiros de ensaios de arrancamento.

Figura 20 - Resultado de ensaios de arrancamento no Brasil



Fonte: EHRLISH; SILVA, 2012 *apud* GEO-RIO, 2020

Entretanto, a grande variabilidade obtida nos resultados eleva as incertezas dessas correlações, nos levando a assinalar os ensaios de arrancamento como solução ideal e necessária para qualquer tipo de estudo, conforme preconizado pela NBR 16920-2:2021.

De acordo com a norma, para a realização dos ensaios de arrancamento, o grampo precisa ter trecho livre sem aderência ao solo entre o comprimento ancorado e a superfície de paramento de no mínimo 1 metro, para assegurar a condição de deformabilidade elástica do aço. O comprimento ancorado deve ter no mínimo 3 metros, o qual receberá material que ligará o aço a ser tencionado ao solo, geralmente calda de cimento.

O ensaio deve ser instalado em local que represente coerentemente a situação a ser executada e o trecho injetado deve representar a situação do terreno, ou seja, se existem muitas estratificações do solo, é melhor que sejam realizados ensaios para cada uma delas para se conhecer o parâmetro de cada parte do solo separadamente.

Ainda conforme a norma, os ensaios de arrancamento são opcionais quando realizados anteriormente à execução da estrutura, entretanto se realizados, devem ter o mínimo de três grampos por região representativa. Nos ensaios obrigatórios de desempenho realizados no decorrer da construção, a quantidade deve ser de no mínimo 1% das totalidades dos grampos ou no mínimo três, sendo esses grampos de sacrifício, ou seja, não pertençam ao conjunto da estrutura.

“Comumente, a análise de estabilidade interna é também desenvolvida utilizando métodos de equilíbrio limite. A determinação do valor da tensão máxima mobilizada nos reforços é um dos principais aspectos a ser considerado nessa etapa do projeto. Com o valor de tensão determinado se define a seção e espaçamento para evitar a ruptura dos grampos por tensão, e se estabelece o embutimento necessário na zona resistente de forma a se evitar o arrancamento” (Geo-Rio, 2020)

Para os cálculos, a tensão última é aquela que limita a resistência do aço ao seu escoamento, conforme a equação:

$$T_{\text{último}} \leq A_s \cdot f_{yk} / \gamma_s \quad (1)$$

$T_{\text{último}}$ – Carga última do aço selecionado para o grampo (kN);

A_s – Área da seção transversal da armação do grampo (m²);

f_{yk} – Tensão de escoamento característica do aço empregado (kPa);

γ_s – Coeficiente de minoração da resistência para barras de aço ($\gamma_s = 1,15$);

Uma das pequenas diferenças entre o Manual da Geo-Rio (2020) e a norma 16920-2 (2021), está no coeficiente que determina a tensão de escoamento do aço, que segundo o manual se determina com a utilização da equação:

$$T_{\text{último}} = 0,9 \cdot A_s \cdot f_{yk} \quad (2)$$

Previamente aos ensaios de desempenho obrigatórios é realizado uma análise de estabilidade e o desenvolvimento de uma solução do sistema estrutural, no qual são obtidas as tensões reativas necessárias para que o fator de segurança seja atingido, determinando as tensões máximas dispostas em cada grampo após a execução da estrutura. Com base em ensaios prévios ou nas correlações com o N(SPT), pode se prever um valor para a tensão de arrancamento previsto para ensaio (T_{ensaio}) de acordo com q_s' esperado.

$$T_{\text{ensaio}} = L_b \cdot \pi \cdot \phi_{\text{perf}} \cdot q_s' \quad (3)$$

T_{ensaio} – Carga máxima prevista para o ensaio (kN);

q_s' – Resistência da interface solo-grampo prevista (kPa);

Segundo o Manual Técnico de Encostas da GeoRio (2020), pelos grampos não serem protendidos neste tipo de contenção, há mais incertezas na determinação das cargas máximas nos grampos (T_i). E por isso, sugere determiná-la de acordo com a resistência ao arrancamento e ruptura do grampo.

$$T_i = T_{\text{ensaio}}/FS, \text{ se } T_{\text{ensaio}} < T_{\text{último}} \quad (4)$$

$$T_{\text{último}}/FS, \text{ se } T_{\text{último}} < T_{\text{ensaio}}$$

T_i – Valor máximo admissível das cargas nos grampos;

FS – Fator de segurança;

De acordo com a norma de solo grampeado, o fator de segurança global dos grampos junto à face nas verificações de estabilidade local deve ser de no mínimo 1,5.

Nos ensaios de arrancamento (Figura 21), é comum a utilização de bitolas de aço superiores aos selecionados para os grampos de estabilização, para não ocorrer seu escoamento, uma vez que ultrapassado o valor de T_{ensaio} e posterior a $T_{\text{última}}$ relacionada as bitolas dos grampos, o ensaio pode ser prosseguido até possibilidade de determinação de $T_{\text{máx}}$

de arrancamento quando menor do que $T_{\text{última}}$ do aço de ensaio, estabelecendo o q_s do solo-grampo.

$$q_s = T_{\text{máx}} / L_b \cdot \pi \cdot \phi_{\text{perf.}} \quad (5)$$

L_b – Comprimento ancorado do grampo ensaiado ≥ 3 (m);

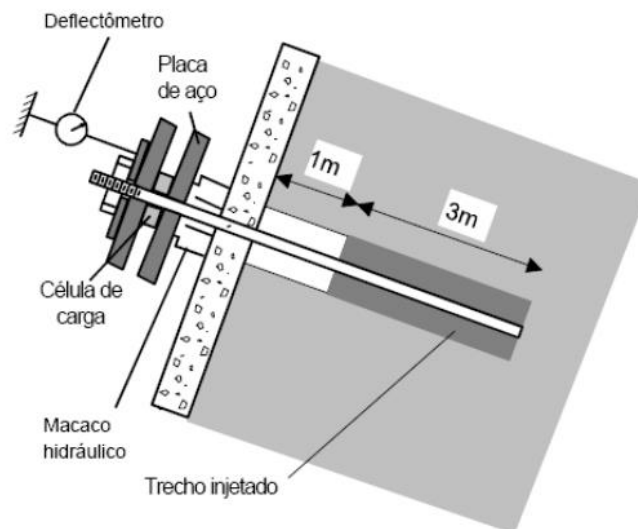
$\phi_{\text{perf.}}$ – Diâmetro da perfuração do grampo ensaiado (m);

q_s – Resistência da interface solo-grampo (kPa);

$T_{\text{máx}}$ – Carga máxima que se manteve estabilizada durante o ensaio, ou limitada pelo deslocamento máximo estabelecido (kN);

A execução do ensaio é definida por norma e deve ser realizada por meio de macacos hidráulicos que tracionam os grampos de forma axial. Os valores de pressão são medidos por uma célula de carga ou manômetro e obtém-se os registros de deslocamentos da cabeça do grampo através do deflectômetro, com precisão de 0,5 mm. A distribuição da carga pela base de reação na face deve se iniciar a partir de 10 cm do eixo do grampo (AZAMBUJA *et al.* 2003 *apud* FLORIANO 2009).

Figura 21 - Esquema de ensaio de arrancamento em solos grampeados



Fonte: PORTERFIELD *et al.*, 1994 *apud* LIMA, 2007

Para a execução do ensaio, a norma estabelece uma carga inicial da ordem de 10% de T_{ensaio} para ajuste de folgas e alinhamento do sistema com o eixo do grampo. Em no mínimo 5 estágios iguais, com aumento gradual de 20% da carga T_{ensaio} e intervalo mínimo de 5 minutos entre cada estágio, deve se obter os valores de tensão aplicada e deslocamento. Quando o

valor de carga for maior ou igual a T_{ensaio} a duração dos intervalos devem ser de 15 minutos e prosseguindo esse critério até o arrancamento.

Portanto, ao final obtém-se a curva tensão versus deslocamento e para aceitação dos resultados deve ser feita uma avaliação conforme análise estatística. Para o caso do resultado de q_s ser inferior ao de projeto, deve ser feita uma reanálise do mesmo para ajustamento conforme a medição ou a realização de ensaios adicionais para uma nova avaliação do parâmetro (NBR 16920-2:2021).

2.3.6 Deslocamentos

De acordo com Clouterre (1991), enquanto o grampo não atingir seu limite de resistência, o qual só é mobilizado próximo à ruptura, as deformações do solo grampeado devem ser pequenas em relação aos limites máximos de deformação da estrutura, tendo em vista que as tensões atuantes tendem a possuir valor abaixo da tensão de serviço, as quais são inicialmente mobilizadas em imediato após a escavação devido à descompressão lateral do solo e ao efeito *creep*. Mesmo Clouterre (1991) evidenciando esses pequenos valores de deslocamentos, vale ressaltar que as deformações do solo grampeado, cujo caráter é passivo, tendem a possuir maiores valores se comparado com os deslocamentos das contenções ativas, em decorrência à sua flexibilidade e comportamento dependente da movimentação do solo.

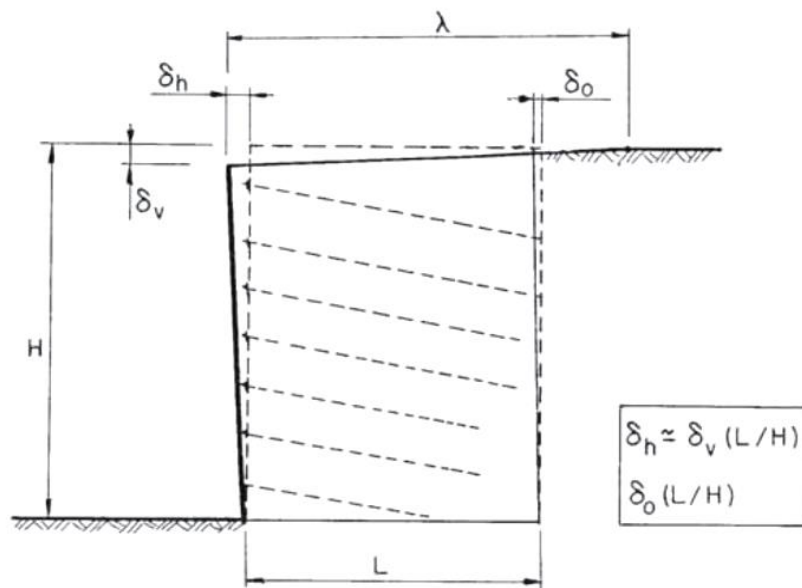
Em consequência dessas mobilizações, as maiores deformações se situam no topo da estrutura devido ao método de execução descendente das escavações. Com auxílio de experimentos realizados na França por Clouterre (1991), se obteve as definições e magnitudes das deformações que a estrutura de solo grampeado está sujeita (Figura 22). São elas: deformação horizontal atrás da estrutura (δ_o); deformação horizontal no topo da face da estrutura (δ_h); deformação vertical no topo da face da estrutura (δ_v) (CLOUTERRE, 1991; LIMA, 2007).

Pelos resultados dos experimentos foi determinada a variação normal da deformação horizontal δ_o sob tensões abaixo das de serviço, e sobre quais aspectos é influenciada diretamente, como o tipo de solo e altura da encosta, além da proporcionalidade inversa a relação comprimento do grampo com altura da estrutura (L/H). Uma observação feita nesse trabalho foi a similaridade dos valores de deformação horizontal δ_h e vertical δ_v no topo da face da estrutura. O modo e velocidade de construção, altura da escavação, distância entre os grampos, comprimento, inclinação e rigidez dos grampos, fator de segurança global, relação

(L/H), inclinação da parede e capacidade de carga do solo de fundação, são elementos de influência para esses dois tipos de deformação (CLOUTERRE, 1991).

“O efeito de arqueamento é um dos principais fenômenos em estabilidade local de escavações. O uso de suporte eficiente desde o topo até a base da escavação é recomendado. Existe uma altura crítica de escavação que não deve ser excedida, para manter o efeito de arco e evitar, deste modo, um processo de instabilidade global do solo. A altura crítica é principalmente função do tipo de solo, não devendo, na prática, ultrapassar 2m.” (LIMA, 2007)

Figura 22 - Deformação esquemática do solo grampeado



Fonte: CLOUTERRE, 1991

$$\delta_o = 4H/10.000 \text{ a } 5H/10.000;$$

$$\delta_v \approx \delta_v = H/1.000 \text{ A } 4H/1.000;$$

A instrumentação e o monitoramento dos deslocamentos laterais e verticais são de elevada importância em encostas construídas em meios urbanos, tendo em vista sua intervenção nas possibilidades de recalques das estruturas adjacentes. O comprimento de influência (Figura 23) está ligado ao fator de segurança estabelecido, à existência de fundação na estrutura de contenção e à inclinação da estrutura, a qual é geralmente maior que a relação altura do solo grampeado / comprimento do grampo.

O valor máximo dos deslocamentos estará situado no ponto junto a face da estrutura, e nulos ao final do comprimento de influência (λ). O dimensão de interferência da estrutura de contenção para com as outras ao redor e os deslocamentos máximos foram estabelecidos por Clouterre (1991) e estão relacionados ao tipo de solo (Tabela 6):

Tabela 6- Determinação do coeficiente de influência das deformações de acordo com o tipo de solo. (Clouterre, 1991)

	Intermediate soils (rocks)	Sand	Clay
$\delta_v = \delta_h$	$H/1\ 000$	$2H/1\ 000$	$4H/1\ 000$
κ	0.8	1.25	1.5

κ – coeficiente de determinação da influência em relação ao tipo de solo;

A expressão do comprimento de influência das deformações:

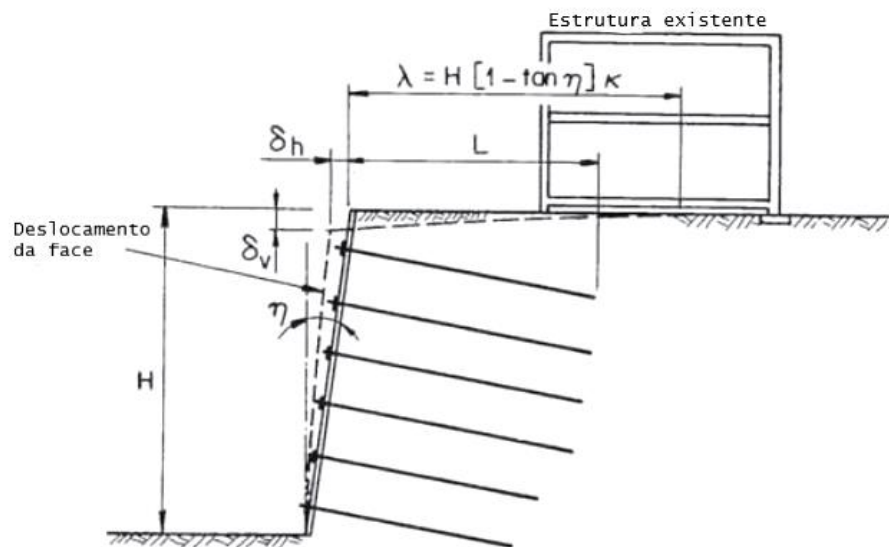
$$\lambda = H (1 - \tan \eta) \kappa \quad (6)$$

λ – Comprimento de influência;

η – Ângulo inclinação da estrutura;

H – Altura da estrutura de contenção em solo grampeado;

Figura 23 - Uso da técnica do solo grampeado em ambiente urbano com existência de estruturas ao redor



Fonte: CLOUTERRE, 1991 (adaptado)

2.3.7 Instrumentação

Conforme citado na NBR 16920-2:2021, as incertezas nas previsões das deformações e deslocamentos motivam a realização de um monitoramento da obra em seu início, decorrer e após seu término, através de um conjunto de dispositivos que são selecionados pelo nível de necessidade estabelecido pelo projetista e detalhado em um plano de instrumentação e monitoramento. Esse plano pode corresponder a ações de simples inspeções visuais até

instrumentação, com os tipos de aparelhos, quantidades e disposição definidos, e monitoramento com a determinação da frequência de leitura.

Essas medidas são estabelecidas conforme a sensibilidade da obra aos deslocamentos. Segundo o Christopher *et al.* (1990) *apud* Geo-Rio (2020), os objetivos da execução do monitoramento se estendem ao controle dos níveis de poro pressão, confirmação dos valores de tensão, controle dos gastos de recursos e nível de segurança da obra, além de, se realizada a longo prazo, permitir conhecimento das manutenções requeridas pela estrutura e criação de referências para o refinamento de projetos futuros. Segundo Lima (2007), é recomendável um período mínimo de 2 anos de monitoramento pós construção.

Uma síntese das etapas de maior importância para a elaboração em um plano de monitoramento é descrita por Christopher *et al.* (1990) e Dunicliff (1998) *apud* Geo-Rio (2020):

- Seleção das grandezas a monitorar: como precipitação, poro pressão, nível d'água, deslocamentos e forças;
- Estimativa da variação das grandezas;
- Escolha da localização dos instrumentos;
- Determinação da frequência de leitura: considerando os riscos envolvidos;
- Níveis de Alerta e Plano de Ação: referente a cada grandeza para os casos em que se atinge fatores de seguranças perigosos ou indesejados;

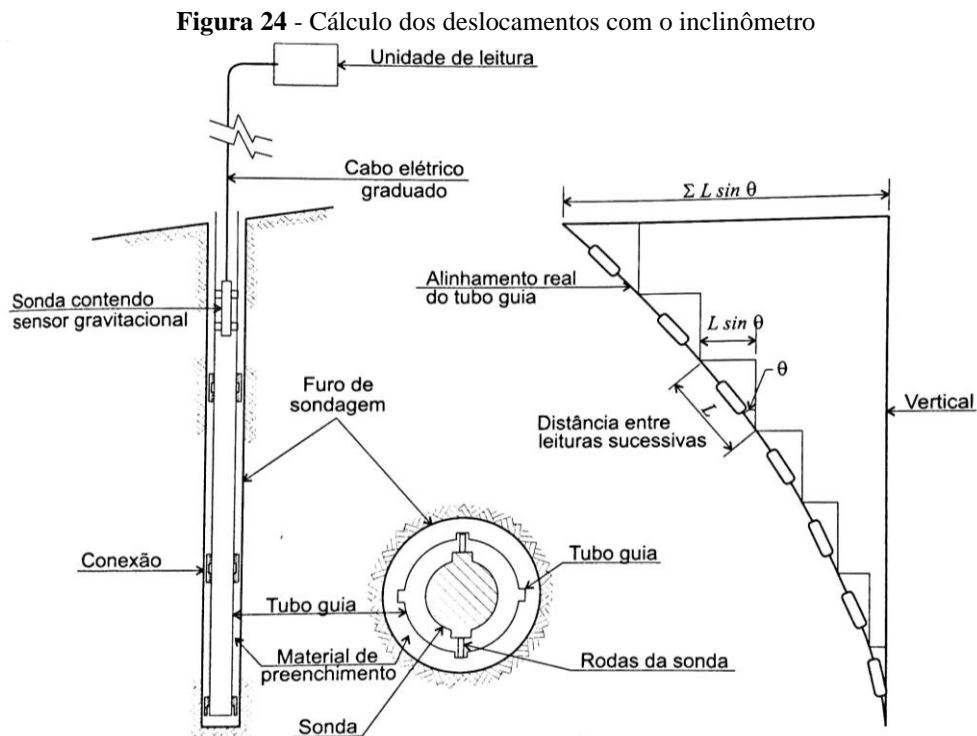
Na estimativa da variação das grandezas, principalmente para medição de recalques e deslocamentos, o manual alerta para previsões realistas de máximos e mínimos, os quais influenciam o valor de fundo de escala, que se refere ao maior valor da grandeza que o instrumento pode medir. O fundo de escala precisa superar o valor máximo da previsão, entretanto, não pode existir uma grande disparidade entre esses valores, tendo em vista que a sensibilidade, variação mínima de grandeza detectada, é gerada em função de uma porcentagem do fundo de escala. Já na escolha da localização, o manual atenta sobre a determinação das seções críticas, nas quais os equipamentos devem ser concentrados. Essas seções devem ser determinadas através da importância das consequências potenciais e probabilidade de ocorrência de movimentação de massa que são identificadas pelas investigações geotécnicas e análises de estabilidade.

Em obras de solo grampeado é sugerido, pelo Departamento de Transporte dos EUA (BRYRNE *et al.*, 1998 e LAZARTE *et al.*, 2003 *apud* LIMA, 2007) e pelo Manual Técnico de Encostas da Geo-Rio (2020), decorrentes da movimentação do solo, a medição dos

deslocamentos locais, que deve ser realizada por inclinômetros posicionados dentro do terreno em áreas críticas e marcos superficiais locados no topo da estrutura nos períodos durante e pós construção. “Diversas observações e monitoramento de obras em solo grampeado têm demonstrado que o fenômeno de “creep” ou fluência ocorre após o término da escavação” (PLUMELLE *et al.*, 1990 *apud* LIMA, 2007).

O inclinômetro (Figura 24) mede especificamente os deslocamentos horizontais, em profundidades determinadas, através de uma sonda com sensor gravitacional, conduzida por dois pares de ranhuras em um tubo guia de alumínio ou plástico, instalado em um furo no terreno com base em solo isento de movimentação (GEO-RIO, 2020). Outra opção de sistema é o extensômetro de fibra óptica que é composto de dispositivos de medição extremamente sensíveis a pequenas deformações, além de não sofrer interferência de campos eletromagnéticos. Seus sinais podem ser processados a grandes distâncias dos pontos monitorados, reduzindo a frequência de medições *in situ* (PINTO *et al.*, 2015).

Os marcos superficiais, locados na estrutura, são monitorados topograficamente com nível óptico ou estação total, e são referenciados por pontos visíveis e fixos chamados *benchmarks*, que devem ser alocados superficialmente em área livre de qualquer movimentação ou em profundidade através de ancoragem em rocha ou em solo, também livres de movimentação (GEO-RIO, 2020; LIMA, 2007).

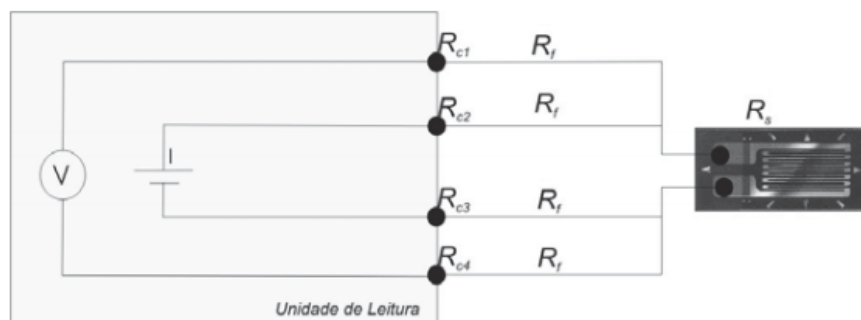


Fonte: WILSON; MIKKELSEN, 1978 *apud* GEO-RIO, 2020

Para a medição dos esforços de tração na cabeça dos grampos é sugerido, pelas mesmas instituições, a utilização de células de carga, que devem ser instaladas em grampos pré-definidos de ensaio. É bastante comum a utilização do conjunto bomba, macaco e manômetro que resulta na medição da pressão atuante, entretanto, o frequente desalinhamento do pistão leva a erros que variam entre 10% e 20% superior às forças reais atuantes axialmente nos grampos. Portanto, a célula de carga se torna solução para um resultado mais verídico. Esse instrumento é vazado e instalado na barra a ser tensionada entre duas placas de aço rígidas de espessura mínima de 30 milímetros para evitar a torção da célula no processo de carregamento (GEO-RIO, 2020; LIMA,2007).

Um segundo controle da resistência dos grampos citada, é a técnica de extensometria, a qual utiliza extensômetros de resistência elétrica (ERE - *strain gauges* em inglês) para as medições de deformação dos elementos tracionados. Esses instrumentos são sensíveis e transformam as variações de dimensões entre dois pontos em variações equivalentes elétricas a serem lidas, que são proporcionais a propriedade racional denominada *gage fator*. Construído por uma base de polímero colada na barra, o ERE possui uma matriz com um fio contínuo de pequeno diâmetro que gera um circuito elétrico com resistências de valores semelhantes. Vários tipos de circuitos podem ser empregados, mas um dos mais utilizados é o do tipo Ponte de Wheatstone. O extensômetro funciona de modo em que à medida que a barra se deforma, o valor da resistência do circuito se altera, e por consequência, gera uma diferença na tensão lida pelo voltímetro entre dois pontos (Figura 25). Essa diferença é transformada em grandeza de deformação através da relação *gage fator* (FEIJÓ, 2007; GEO-RIO, 2020).

Figura 25 - Circuito para medição direta de resistência - Método dos 4 Fios



Fonte: FEIJÓ, 2007

A Geo-Rio (2020) acrescenta a utilização de alguns tipos de pluviômetros, piezômetros e indicadores de nível d'água para o monitoramento da parcela hidrológica

influyente na estrutura. Em função, representam, respectivamente, o registro diário da água precipitada na região de interesse, a medida da carga de pressão ou poro pressão atuante e a indicação do nível de água em determinada localidade. Além disso, em seu manual alerta que a diferença entre a coluna d'água no piezômetro e a coluna no indicador de nível, nos casos quando há proximidade e instalação numa mesma cota, pode significar uma rede de fluxo em regime permanente, o que indicará a poro pressão atuante na cota de instalação e o nível representará a coluna d'água presente.

Além destes, têm sido utilizados também medidores de convergência, medidores de inclinação entre outros (ORTIGÃO E SAYÃO, 2000; SAYÃO *et al.*, 2005; NUNES *et al.*; 2006 *apud* LIMA, 2007).

2.4 Anisotropia

2.4.1 Comportamento dos Solos Anisotrópicos

As transformações mineralógicas, químicas e estruturais das rochas são resultados das mudanças físicas de pressão e temperatura, e químicas. Uma das principais consequências são as deformações da estrutura na forma de foliações e clivagem (CARNEIRO; GONÇALVES; LOPES, 2009). Segundo Jordan *et al.* (2006), os minerais placóides como a mica e clorita, quando presentes e expostas às forças compressivas, tendem a se cristalizar como cristais delgados em forma de placas, cujo alinhamento se dá perpendicular às forças e paralelo à foliação, chamada de orientação preferencial dos minerais. Essa mineralização resulta na deformação da estrutura preexistente e produz um conjunto de superfícies paralelas, planas ou onduladas que podem interceder o acamamento da rocha em qualquer ângulo ou ser paralela.

Essas rochas foliadas são classificadas quanto ao tamanho dos seus cristais, natureza da foliação, grau metamórfico e intensidade da segregação dos minerais em bandas claras e escuras. Quanto maior a intensidade do metamorfismo, maior o tamanho dos cristais e da espessura de foliação. Alguns exemplos de rochas foliadas são as ardósias, filitos, xisto, gnaisses e migmatito (JORDAN *et al.*, 2006).

A anisotropia é definida como característica de um material em que certas propriedades físicas são diferentes conforme as direções de análise. Segundo Rocha (1981), a anisotropia dos maciços rochosos provém, por um lado, da anisotropia da rocha e das famílias de diaclases, fraturas que cortam o maciço. A regularidade nas disposições das fraturas e

foliações podem influenciar de maneira decisiva a anisotropia das rochas, a qual interfere na deformabilidade, resistência e permeabilidade da mesma. De acordo com Queiroz (2009), “verifica-se que rochas fortemente anisotrópicas, como a maioria das rochas metamórficas e sedimentares, apresentam resistências diferentes em diferentes direções de aplicação de cargas.”

Na resultante da foliação e clivagem, o material tem a estrutura interna em que o número de contatos partícula-partícula em uma direção seja diferente em outra, o que chamamos de anisotropia inerente, ou seja, um comportamento reflexivo da força interpartícula e intrínseco do material, no que se refere a formas dos grãos e índice de vazios, independente das deformações aplicadas (CABRAL, 2005; JORDAN *et al.*, 2006; SANTOS, 2015; TEIXEIRA, 2015). Outra possibilidade de anisotropia inerente está relacionada ao processo de alinhamento das partículas durante a sedimentação, de modo em que a deposição se dá no plano de aplicação da tensão maior e o arranjo, quanto aos sedimentos, pode ser diversificado em camadas, além da compactação também gerar uma anisotropia inerente (SIVAKUGAN; CHAMEAU; HOLTZ, 1984, HOQUE; TATSUOKA, 1998; KONGSUKPRASERT; SANO; TATSUOKA, 2007 *apud* SANTOS, 2015).

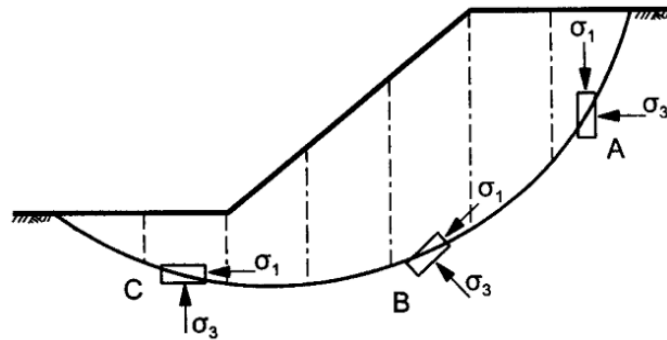
Podemos chamar de anisotropia transversa, aquela em que as propriedades são similares no plano de deposição e diferentes no eixo perpendicular, o que não deixa de ser inerente ao material (CABRAL, 2005). Mas, ao se aplicar algum nível de carga no solo, as deformações de natureza plástica tem a possibilidade de gerar uma reorganização interna das partículas, destruindo contatos entre partículas e construindo novos (ODA,1993 *apud* SANTOS, 2015). Portanto, o material adquire certo grau de anisotropia devido a um estado de tensão imposto, o que chamamos de anisotropia induzida (FONSECA *et al.*, 2013 *apud* TEIXEIRA, 2015).

“Devido a organização interna das partículas, ao se aplicar cargas nos materiais pode-se ter diferentes valores de deformações quando se muda a direção de aplicação da mesma carga. Nesta situação pode-se ter a anisotropia geral, e a anisotropia transversa.

Nos solos, além da anisotropia inerente, quando são aplicadas cargas surge nos mesmos a anisotropia induzida. Pode, portanto, ocorrer anisotropia inerente seguida da induzida. Este fato pode ocorrer em maior ou menor escala dependendo do formato das partículas constituintes do solo.” (CABRAL, 2005)

Em taludes anisotrópicos a orientação da amostragem para análise da resistência ao cisalhamento é de extrema relevância. A orientação do plano de ruptura (Figura 26) é fortemente influenciada pela localização quanto aos ângulos e disposição da anisotropia do maciço (SANTOS, 2015).

Figura 26 - Possibilidade de direção da anisotropia de resistência



Fonte: ABRAMSON, 2002 *apud* SANTOS, 2015

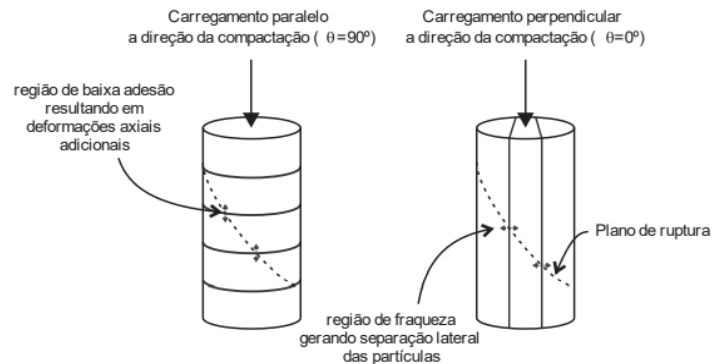
Para a determinação de alguns parâmetros de solos anisotrópicos, segundo Teixeira (2015), uma forma utilizada é por meio da determinação de velocidade das ondas S e por vezes determinando o módulo de distorção G e de confinamento M, quando se obtém a velocidade da onda P. Esse conjunto de ensaios de propagação de ondas permite avaliar a rigidez a deformações pequenas e a natureza anisotrópica (BELLOTTI *et al.*, 1996 *apud* TEIXEIRA, 2015).

Segundo Santos (2015), outra forma de determinação das propriedades resistivas de compressão de um solo anisotrópico é pelo ensaio triaxial. Sendo de extrema importância a adequação do ensaio às condições anisotrópicas de campo. Ele cita os métodos de Abramson (2002), que são:

- Obtenção de resistência não drenada em campo através do Vane Test (Palheta);
- Ensaio em caixas que permitem o cisalhamento das amostras em diferentes planos;
- Ensaio de compressão triaxial com incrementos axiais de cargas a partir de amostras compactadas em caixas e posteriormente talhadas na direção vertical e horizontal (Figura 27).

“Kongsukprasert, Sano e Tatsuoka. (2007) apontaram que quando submetidos a drenagem na fase de ruptura, os corpos de prova talhados na direção horizontal apresentaram maiores variações de volume do que aqueles talhados verticalmente. Os referidos autores justificam este fato a maior facilidade das partículas em se orientarem, principalmente ao longo da região perpendicular à aplicação dos esforços oriundos do processo de compactação (interface entre camadas). A facilidade das partículas em se orientarem ao longo desse plano pode contribuir para a separação lateral das partículas quando submetidas a incrementos de deformações”. (SANTOS, 2015)

Figura 27 - Comportamento típico do solo compactado e talhado na direção vertical e horizontal



Fonte: KONGSUKPRASERT; SANO; TATSUOKA, 2007 *apud* SANTOS, 2015

2.4.2 Conceito de Rochas Brandas e Filito

Conforme já citado, as rochas sofrem com solicitações e processos de intemperismos, e, como consequência, formam zonas de alteração até se transformarem em solos. Para Rocha (1977) *apud* Pinho (2003), após a realização de numerosos tipos de ensaios em uma ampla variedade de materiais geológicos, constatou-se que para estabelecer limites que objetivam categorizar esses materiais entre rocha e solo, os parâmetros de coesão e resistência à compressão uniaxial são os mais apropriados. Ainda considerou os limites mínimos de 0,3 MPa de coesão e 2 MPa de compressão uniaxial para se classificar o material como uma rocha. Segundo Silva (2010), os maciços, quando heterogêneos e anisotrópicos, tem sua qualidade condicionada à litologia, ao estado de alteração, à coerência e principalmente às discontinuidades e propriedades.

Rochas brandas podem ser definidas, de uma forma genérica, como materiais geológicos com características mecânicas que se situam na transição entre solo e as rochas duras. Esses materiais são chamados de brandos ou fracos devido a sua baixa resistência à compressão uniaxial, onde a caracterização e previsão do seu comportamento são difíceis de definir (CARVALHO, 2019; PINHO, 2003). Em consequência, muitas obras de engenharia são realizadas para garantir estabilidade de maciços com esse tipo de estrutura geológica, e frequentemente, encontramos esses materiais de transição sendo incluídos no grupo dos materiais apontados como problemáticos (RODRIGUES, 1990 *apud* PINHO, 2003).

Uma das caracterizações para se classificar maciços como fracos está relacionada à sua formação, que pode ser produto do próprio constituinte possuir uma baixa resistência, ou quando existe desenvolvimento de fraturas ou discontinuidades decorrentes dos intemperes, o

que resulta na formação de perfis complexos fracos, mesmo que o material constituinte seja de elevada resistência (CARVALHO, 2019; PINHO, 2003).

Além das propriedades de grau e causa da baixa resistência da rocha branda, podemos classificá-las quanto ao comportamento à uma sollicitação, como desagregabilidade e expansividade, que podem ser resultantes de mudanças no teor da água ou no estado de tensões. A expansividade está relacionada a composição da rocha, e a desagregabilidade, a sua textura (DUNCAN *et al.*, 1968 *apud* PINHO, 2003). Como esses materiais, quando heterogêneos e anisotrópicos, não são elasticamente ideais (PEÑA, 1989 *apud* LEÃO, 2017), para conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas, Carvalho (2019) apontou alguns ensaios que podem ser realizados, como a de compressão uniaxial, resistência à tração, propagação de ondas ultrassônicas e ensaios *in situ*, como o martelo de Schmidt.

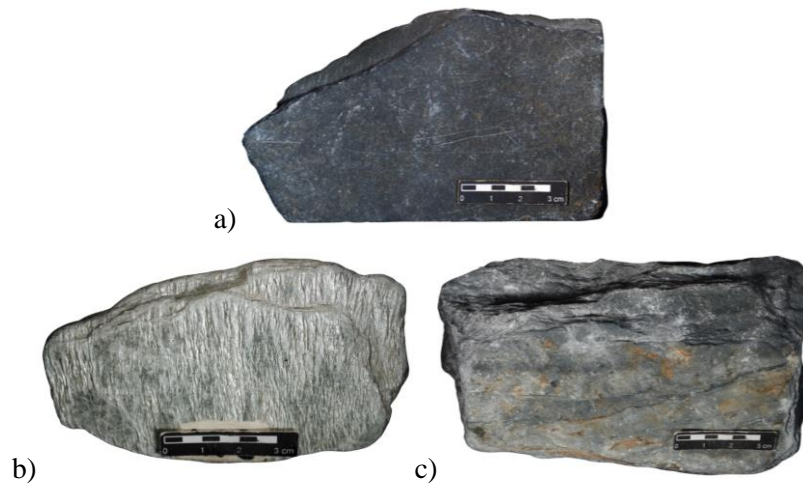
Aos casos de modificação da tensão inicial associadas às intervenções metamórficas e tectônicas, em materiais sedimentares de grande percentual de origem detrítica, química ou bioquímica e em materiais vulcânicos piroclásticos, resultando nas discontinuidades, deterioração ou formação de cavidades, pode-se exemplificar os filitos. (DOBEREINER & DE FREITAS, 1986 *apud* PINHO, 2003) Este é um típico caso de rocha branda com comportamento anisotrópico devido aos seus planos de fraqueza inerentes ou induzidos (RAMAMURTHY *et al.*, 1993 *apud* LEÃO, 2017).

Os planos gerados na matriz de uma rocha qualquer, quando bem definidos, são denominados discontinuidades. Entretanto, em maciços brandos, como o filito, existe uma tendência de repetição sistemática desses planos, gerando o que chamamos de foliação. O comportamento desse maciço é expresso como arranjo preferencial dos minerais, denominada anisotropia estrutural, com isso, não se portando com uma simples discontinuidade (ABGE, 1998 *apud* SILVA, 2010).

A velocidade de percolação da água, tanto na foliação quanto na discontinuidade, é elevada devido ao aumento de permeabilidade gerada pela fratura. Em consequência, a abertura desses caminhos pelo interior do maciço forma uma situação favorável ao intemperismo químico, acarretando nas possibilidades de desagregação de blocos rochosos e maiores níveis de alteração (SILVA, 2010). Especificamente para filito, Lopes (2006) realizou ensaios de resistência uniaxial nesse material em vários ciclos contínuos de umedecimento e secagem, etapas que simulavam certos graus de intemperismo e alterações, e, posteriormente, efetuava a análise das mudanças nos parâmetros, como de coesão e ângulo de atrito.

Em comparação, os filitos possuem os mesmos aspectos das ardósias no que se refere ao material de origem e os processos de cristalizações de mica e clorita. Entretanto, as ardósias possuem foliações de baixo grau, as quais não podem ser vistas facilmente sem um microscópio, diferentemente dos filitos, que possuem maior grau de foliação (Figura 28). Ambos possuem a coloração que varia de cinza escuro a preto, possuindo cor apenas quando há presença de matéria orgânica, e seu brilho tende a ser mais acentuado nos filitos, devido ao maior crescimento dos cristais (JORDAN *et al.*, 2006).

Figura 28 - Ardósia (a) e Filito (b) Filito com maior teor de matéria Orgânica (c)



Fonte: <https://didatico.igc.usp.br/rochas/metamorfica>, acesso 23/08/2021

2.4.3 Mecanismos de Ruptura de Filitos

Segundo Dilásccio (2004), o comportamento do filito, por ter elevado grau de foliações, se assemelha com a de um meio contínuo anisotrópico e não a de um meio descontínuo real, cujos blocos de rocha são definidos e representados como um corpo rígido ou capazes de se deformar como um meio contínuo. Com isso, deve-se observar a influência dessas foliações na estabilidade de um talude, que podem diferir de acordo com a escala de seu espaçamento e persistência em relação à altura do maciço. Para um mesmo grupo exato de foliação, sua influência na ruptura de um maciço com certa altura de mesma escala que o conjunto anisotrópico é muito superior do que em outro com altura quinze vezes maior, no qual a rocha alterada pode passar a se comportar como material homogêneo e isotrópico. Esse estudo foi realizado por Sjöberg (1999) e citado por Dilásccio (2004).

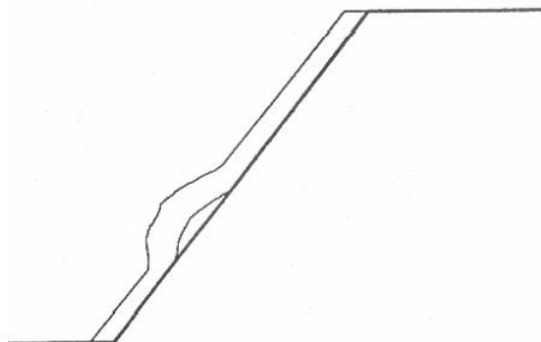
Em um maciço, quando não existe conjunto de descontinuidade de mesma escala da altura do talude, os modos de ruptura mais comuns são do tipo circular e rotacional, pela

relativa influência à instabilização dessa parcela de solo no maciço. Nos outros casos de maior atuação do complexo anisotrópico, as rupturas que podem ocorrer são do tipo planar, cunha, tombamento flexural (*flexural toppling*) e flambagem (*buckling*), sendo esses dois últimos mais comuns em filitos (HOEK & BRAY, 1977 *apud* DILÁSCIO, 2004). Quando a foliação mergulha para dentro do talude, existe a tendência de ocorrer a ruptura por tombamento flexural, ao passo que, quando mergulha no mesmo sentido, pode ocorrer qualquer dos outros tipos de ruptura citados (DILÁSCIO, 2004; SILVA, 2010).

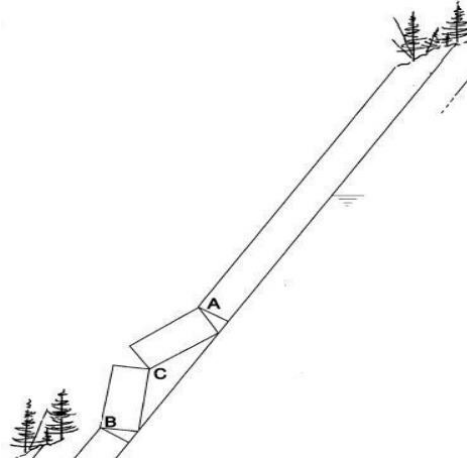
“Em taludes de rochas foliadas, como é o caso do filito, observam-se alguns mecanismos de ruptura (...) que são condicionados pelas discontinuidades presentes nas rochas. Dentre eles pode-se destacar o tombamento flexural e a flambagem.” (ADHIKARY et. al., 2001 *apud* SILVA, 2010)

As rochas brandas com clivagem elevada, de direção da foliação paralelas à face do talude, com uma angulação de mergulho maior do que o ângulo de atrito entre os estratos, e com nível de esbeltez elevado da coluna em relação ao comprimento, as influências das forças externas como a pressão da água, a concentração de tensões no plano ou o peso da própria lâmina, podem induzir o deslizamento inicial na parte inferior do talude. Seguindo pela formação de fissuras e conseqüente colapso, método de ruptura que chamamos de flambagem (Figura 29) (DILÁSCIO, 2004; SILVA, 2010). Ainda pode existir uma variação de flambagem, em que as lâminas deslizam uma sobre a outra, devido a ação de uma pressão neutra no pé do talude aliada ao peso da própria lâmina (QIN et. al., 2001 *apud* SILVA, 2010). Outra, que chamamos de flambagem de blocos (Figura 30), ocorre quando há formação de rótulas derivadas da presença de juntas subparalelas que cortam as foliações, mesmo de baixa angulação (FROLDI & LUNARDI, 1995 *apud* SILVA, 2010).

Figura 29 - Modelo esquemático de flambagem

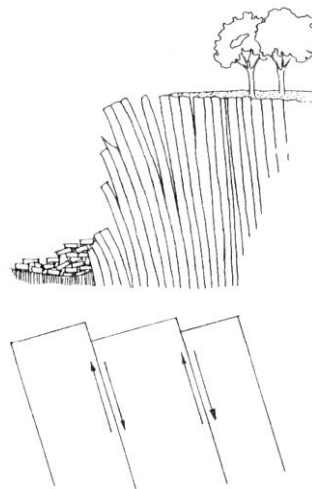


Fonte: SJÖBERG, 1999 *apud* DILÁSCIO, 2004

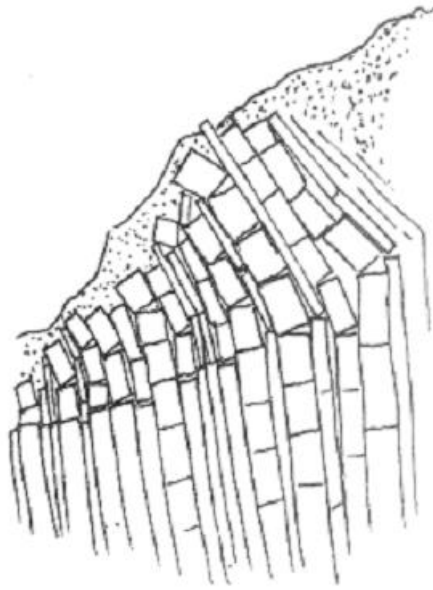
Figura 30 - Modelo de flambagem de blocos

Fonte: SEIJMONSBERGEM, 2005 *apud* SILVA, 2010

O tombamento flexural pode ocorrer quando as foliações mergulham para dentro do maciço (Figura 31). Devido ao não equilíbrio das forças decorrente da ação do peso próprio com relação às forças de atrito entre as lâminas, as colunas tendem a deslizar sobre as outras e fletir, o que cria uma rotação dos estrados e consequente ruptura por tração na base da lâmina, realizando um tombamento em relação a face do talude (SILVA, 2010). Segundo Dilácio (2004), uma condicionante para a não ocorrência dessa ruptura é o engastamento das lâminas que ocorre no caso de uma diferença de angulação das foliações ser maior que 15° em relação a face do talude, significando na inexistência de liberdade para tombamento. O tombamento bloco-flexural é uma variação desse mecanismo de ruptura e uma resultante de tombamento de blocos associada com flexural, devido a existência de juntas transversais às foliações (Figura 32) (DILÁSCIO, 2004).

Figura 31 - Ilustração do mecanismo de tombamento flexural e detalhe do movimento entre as lâminas

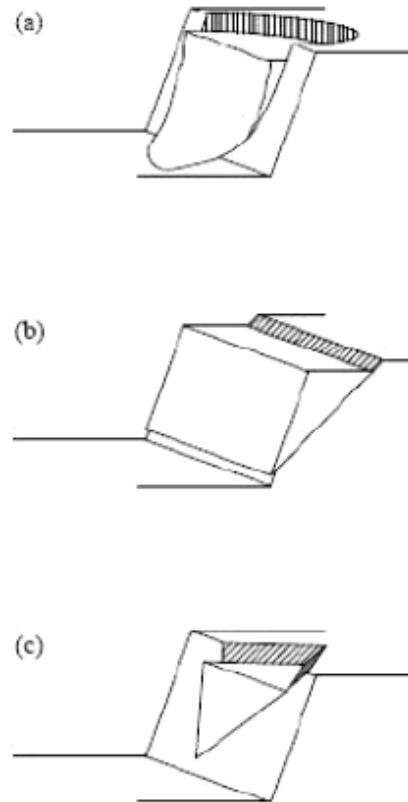
Fonte: HOEK & BRAY, 1977 *apud* DILÁSCIO, 2004

Figura 32 - Ilustração do tombamento bloco-flexural

Fonte: HOEK & BRAY, 1977 *apud* DILÁSCIO, 2004

Os outros métodos de ruptura possuem descrições mais simples. De acordo com Diláscio (2004), a ruptura do tipo circular ocorre nas rochas brandas quando seu grau de alteração e fraturamento estão muito elevados, ao ponto de o maciço passar a se comportar como material homogêneo e isotrópico e, assim, sua baixa resistência se tornar mais relevante do que suas descontinuidades. Nesse caso de ruptura, a superfície crítica é traçada pelo caminho de menor resistência do talude, as quais, por observação, são geralmente do formato circular, mas não existe um padrão. Já a ruptura planar consiste na existência de uma ou mais descontinuidades que mergulham em direção à face livre, em ângulo maior do que o de atrito interno da descontinuidade e menor do que o ângulo de inclinação do talude. O plano de descontinuidade deve respeitar uma variação de até 20° em relação a face, com propósito de sustentar a condição de liberdade de movimentação da massa. A ocorrência desse tipo de ruptura está relacionada a essas condições citadas e associadas com a força peso atuante em análise de equilíbrio limite. O último tipo de ruptura é equivalente a planar em suas condições e análise, porém possui caráter tridimensional, visto que são dois ou mais planos de descontinuidade que se interceptam e delimitam uma cunha, um bloco instável. Na Figura 33 é apresentado um esquema desses três mecanismos de ruptura.

Figura 33 - Mecanismos de ruptura de taludes rochosos: circular (a), planar (b) e cunha (c)



Fonte: HOEK & BRAY, 1981 modificado *apud* SILVA, 2010

As análises de equilíbrio limite tem certo êxito nos casos de ruptura circular, planar e cunha, tendo em vista que, nesses casos, inicialmente o maciço tem o comportamento rígido na movimentação sobre uma superfície crítica, que decorre devido as diferenças de tensão atuante e de resistência (DILÁSCIO, 2004). Entretanto, o comportamento rígido em ruptura planar, decorre do comportamento das camadas rígidas sobrejacentes, a qual pode se equiparar à um deslizamento de bloco rochoso, o que induz a uma análise de consideração das significantes tensões cisalhantes e de flexão nos grampos no caso de dimensionamento de solos grampeados.

Nos casos de tombamento flexural e flambagem, esse método de análise de equilíbrio limite não prevê as deformações rochosas e, portanto, não são adequados. Segundo Silva (2010), entre os métodos mais apropriados para análise de maciços anisotrópicos estão a análise de tensão-deformação via métodos numéricos como o método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e método dos elementos de contorno (DILÁSCIO, 2004; SILVA, 2010).

2.4.4 Mecanismo de Ruptura Planar - Rocha-Grampo

Em um mecanismo de ruptura planar de rochas com foliação, é sensato analisar o comportamento das tensões atuantes de maneira criteriosa. Com características rochosas de elevada rigidez em determinados espaçamentos, o desempenho pode ser comparado a de um bloco rochoso em primeiro instante em relação ao movimento de ruptura, desenvolvendo tensões cisalhantes e de flexão no grampo. No Manual Técnico de Encostas da Geo-Rio (2020), encontramos a solução de análise para casos de deslizamentos de blocos rochosos aplicado para chumbador pelo método de Tresca, o qual determina uma limitação de valor máximo das componentes atuantes de normal e cisalhamento, decorrente de uma tensão resultante relacionada as suas características. Essa metodologia pode ser aplicada de forma análoga aos grampos (Figura 35).

$$T_{a, \text{máx}} = f_{yk} \cdot A_s / 1,1 \quad (7)$$

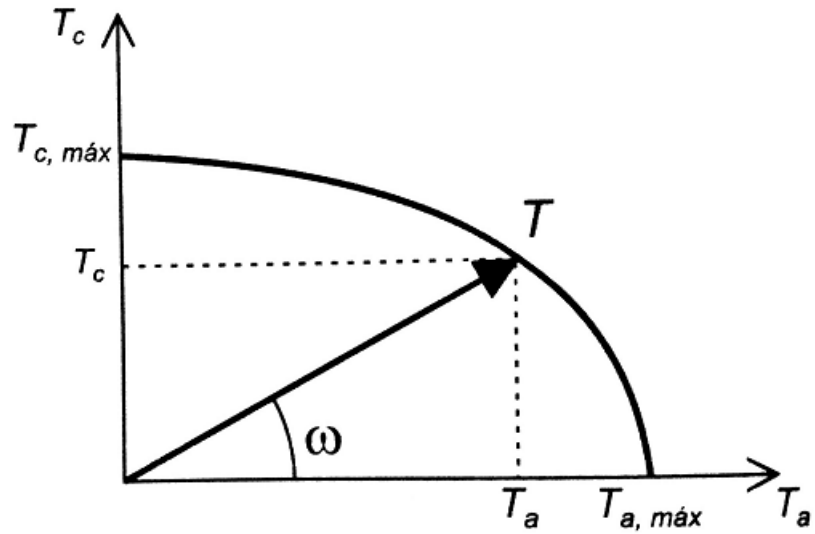
$$T_{c, \text{máx}} = 0,58 \cdot f_{yk} \cdot A_s / 1,1 \quad (8)$$

$T_{a, \text{máx}}$ – Componente de tensão de tração máxima do aço (kN);

$T_{c, \text{máx}}$ – Componente de tensão cisalhante máxima do aço (kN);

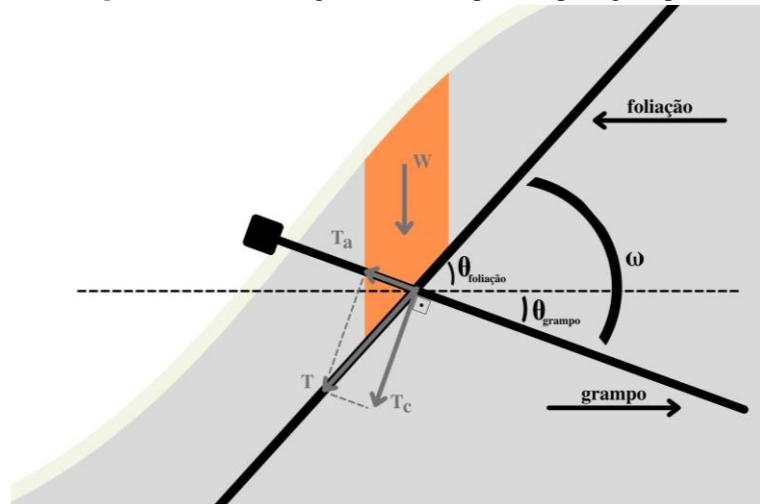
Através de limites máximos de cisalhamento e arrancamento de uma determinada bitola de aço, se constrói uma elipse que determina as tensões a serem utilizadas em relação ao ω , que corresponde ao ângulo entre o grampo e a tensão resultante aplicada a ele (Figura 34). Para os casos de ruptura planar em rochas anisotrópicas, o que se identifica é uma equivalência da direção da foliação com a resultante de tensão aplicada, pelo fato de as rupturas serem intimamente geradas ao longo do plano de foliação. Sendo assim, o ângulo ω pode ser descrito como ângulo entre a foliação e a direção axial do grampo, como representada na Figura 35.

Figura 34 - Gráfico da elipse com função do ângulo ω e a força de resistência resultante T



Fonte: Geo-Rio, 2020

Figura 35 - Metodologia de Tresca aplicada para grampos



Fonte: Autor

$$T_a = T_{a, \text{máx}} \cdot \cos\{ \text{atan} [(T_{a, \text{máx}} / T_{c, \text{máx}}) \cdot \tan \omega] \} \quad (9)$$

$$T_c = T_{c, \text{máx}} \cdot \text{sen}\{ \text{atan} [(T_{a, \text{máx}} / T_{c, \text{máx}}) \cdot \tan \omega] \} \quad (10)$$

$$T_{\text{resultante}}^2 = T_a^2 + T_c^2 \quad (11)$$

$$(T_a / T_{a, \text{máx}})^2 + (T_c / T_{c, \text{máx}})^2 \leq 1 \quad (12)$$

T_a – Componente de tensão de arrancamento máxima do aço para foliação em ω ;

T_c – Componente de tensão de cisalhamento máxima do aço para foliação em ω ;

2.5 *Softwares*

Atualmente já existem diversos softwares que possuem objetivo de dinamizar as análises de estabilidade de taludes. Em geral, a obtenção dos programas é feita de maneira comercial e não gratuita. Considerando a disponibilidade de acesso, foram selecionados os softwares Slope/W e Slide2 para a utilização nesse estudo, além de serem didáticos e muito utilizados por projetistas e acadêmicos.

2.5.1 SLOPE/W

Segundo a empresa GeoStudio (2021), em 1916, Petterson apresentou a primeira análise de estabilidade com o método de divisão em fatias de uma massa deslizante sobre uma superfície considerada circular em um talude localizado em Gothenberg, na Suécia. Mais tarde, em 1936, Fellenius legitimou esse método sueco de fatias e ao longo dos anos, em específico na década de 50, Jambu e Bishop desenvolveram avanços que induziram uma melhor precisão do processo. Na década seguinte, com a invenção da computação, foi apresentado por Price (1965) um método que governa o equilíbrio de momentos e forças em uma fatia em recorrência das equações diferenciais. Além desse, Spencer (1967) apresenta o método que substituiria o método de interação das forças das fatias por uma resultante equivalente estática atuante no ponto médio da base da fatia (FERREIRA, 2012; GEOSTUDIO, 2021).

Uma das razões para o método do equilíbrio limite em fatias ser ainda o mais adotado, é pela facilidade de cálculo manual das soluções e de entendimento do processo. Na década de 80, período em que computadores começaram a ser economicamente viáveis para a população, a implementação simples do método em *softwares* facilitou a disponibilidade de produtos comerciais de análises de estabilidade. Por isso, este tipo de processo foi difundido no meio da engenharia geotécnica. Na atualidade, os *softwares* estão se tornando mais modernos com a introdução de componentes e condições que permitem aperfeiçoar os mecanismos e analisar problemas cada vez mais complexos, além de possibilitar um melhor entendimento do próprio método do equilíbrio limite (GEOSTUDIO, 2021).

O programa SLOPE/W foi desenvolvido em 1977 na Universidade de Saskatchewan, no Canadá, pelo Professor D. G. Fredlund. Após reestruturações dos códigos para modernizações no hardware e implementação de interação gráfica, na década de 80, foi o primeiro produto de *software* geotécnico disponível comercialmente para análises de

estabilização. Desde então, este programa está sendo utilizado por educadores e profissionais. O produto está atualmente na sua oitava versão e possui diferencial na ferramenta de apresentação de gráficos relacionados a uma lista de variáveis diferentes ao longo da superfície crítica, além de detalhar as forças de cada lamela, elementos que criam confiabilidade nos resultados. SLOPE/W é um dos *softwares* oferecidos pela GeoStudio, o qual tem, além do método de equilíbrio limite desenvolvido através da geometria e parâmetros do solo, o potencial de utilização da poro pressão calculada por elemento finito e a capacidade de interação de uma estrutura de reforço ou de cargas impostas sobre o maciço analisado (GEOSTUDIO, 2021).

2.5.2 SLIDE2

Semelhante ao *software* SLOPE, SLIDE2 também foi produzido no Canadá, mas na Universidade de Toronto. Em 1987, liderado pelos professores Evert Hoek e John Curran e com suporte da Indústria Canadense de Mineração e governo, alunos da pós-graduação iniciaram o desenvolvimento de *softwares* geomecânicos que atendessem à necessidade da indústria da mineração, em relação as ferramentas para projetos e análises em 2D e 3D. Mais tarde, em 1996, a Rocscience foi fundada para dar continuidade a produção e evolução dos *softwares* geomecânicos e amplificar a distribuição dos produtos para esfera mundial. Atualmente é líder mundial no desenvolvimento de *softwares* para engenheiros civis, geotécnicos e de mineração (ROCSCIENCE, 2021).

O programa SLIDE2 é um programa da Rocscience desenvolvido para análises de estabilidade de taludes, com finalidade de valorização do fator de segurança, ou seja, verificar a probabilidade de ruptura do mesmo. As variedades de ruptura são de caráter circular ou não circular, que podem ser feitas análises em solos ou rochas. A simplicidade de utilização e viabilidade de inserção de modelos complexos são diferenciais do *software*, além de permitir a introdução de carga externa, linha piezométrica e modelagem de vários tipos de estruturas de contenção (ROCSCIENCE, 2021).

São vários tipos de análises que o *software* disponibiliza, podendo ser feitas em fatias verticais ou não verticais, pelos métodos de equilíbrio dos tipos Bishop, Jambu, Spencer, Sarma entre outros. As superfícies podem ser analisadas individualmente ou localizadas por buscas que geram a superfície crítica da seção analisada junto ao seu fator de segurança (ROCSCIENCE, 2021).

3. METODOLOGIA E PARÂMETROS

3.1 Metodologia

Com base em um estudo de caso real, se exemplifica a utilização de dois *softwares* geomecânicos. Em específico, se analisa os solos que possuem a condição anisotrópica, com a finalidade de demonstrar as resoluções propostas pelas ferramentas. Portanto, essa premissa desencadeia uma exposição do passo a passo das etapas desenvolvidas em cada um dos *softwares*, fundamentando as entradas nos programas pelas propriedades geométricas extraídas do caso exemplo e pelas propriedades mecânicas baseadas nos estudos de Lopes (2006).

Os passos a passos são semelhantes, se iniciam com a introdução da seção analisada nos *softwares* e colocação das propriedades mecânicas do solo em suas respectivas caixas de entrada, especificando a condição anisotrópica do material. Nessa mesma etapa, é formulada as condições angulares das componentes relacionadas aos valores de propriedade resistivas definidas em premissas, em posição paralela ou perpendicular à foliação. Em seguida, define-se os blocos de buscas não circulares, com suas respectivas angulações de entrada e saída, e por fim, analisa-se o maciço em sua condição de estabilidade global. Com essa resolução, se propõe uma solução de grampos com seus comprimentos, angulação, seção de aço e de perfuração específicos e sob critérios arbitrários, para a finalidade de atingir o fator de segurança esperado.

3.2 Características do Caso e seus Parâmetros

O caso exemplo de maciço anisotrópico homogêneo está localizado no estado de Minas Gerais, e em função do fluxo desordenado de água, oriundo de um canal de drenagem de uma grande obra de terra, o talude de filito vem sofrendo com um elevado processo de erosão na sua base. A situação tem princípio em uma análise de drenagem, com o objetivo de escoamento desse fluxo de água e minimização das erosões. Entretanto, as condições do maciço já se encontram críticas em âmbito de alteração rochosa de anisotropia e grau de erosão, o que amplia o risco de ruptura, contribuindo para a necessidade de uma implementação de solução estabilizadora.

Em estudos locais, geólogos classificaram litologicamente o caso como rocha branda, mais especificamente filito, e observaram que as foliações se apresentavam numa angulação de 45° com a horizontal, o que representou uma similaridade com a angulação da

face, as tornando paralelas entre si. Através de vistorias, informações tátil visuais e sondagens no entorno, não se constatou a existência de nível d'água no interior do maciço.

Como a área está relacionada com o manejo de produtos perigosos e está sujeita a acidentes ambientais graves, o valor do fator de segurança estabelecido a ser alcançado é de 1,5, mesmo que não haja edificações nas adjacências.

Para esse estudo, os parâmetros de peso específico, coesão e ângulo de atrito foram arbitrados com base nos estudos de Manoel da Conceição Lopes (2006), o qual realizou ensaios cisalhamento direto detalhados com método de alterabilidade acelerada de três amostras de rocha branda do tipo filito de graus de mineralogia distintos, localizados no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Os parâmetros da Rocha Branda (Filito) foram:

$$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3 \text{ (peso específico);}$$

Perpendicular à foliação

$$\phi = 32^\circ \text{ (ângulo de atrito);}$$

$$c = 34 \text{ kPa (coesão);}$$

Paralela à foliação

$$\phi = 32^\circ \text{ (ângulo de atrito);}$$

$$c = 17 \text{ kPa (coesão);}$$

O aço selecionado para os grampos tem diâmetro de 32mm (Dywidag, $f_y = 520\text{MPa}$) e ângulo de inserção de 15° . Uma das ideais na análise foi considerar a perda do diâmetro útil da barra, além da pintura industrial. Logo, de acordo com a tabela da norma para solos não agressivo e não compactados, a redução da espessura da barra deve ser do valor de 1,2 mm para uma vida útil de 50 anos.

$$\phi = 32 - (2 \cdot 1,2) = 29,6 \text{ mm}$$

$$A_s = \pi \cdot (29,6/2)^2 = 688,13 \text{ mm}^2$$

Pelo método de Tresca:

$$T_{a, \text{máx}} = f_{yk} \cdot A_s / 1,1 = 216,87 \text{ kN}$$

$$T_{c, \text{máx}} = 0,58 \cdot f_{yk} \cdot A_s / 1,1 = 125,78 \text{ kN}$$

$$\omega = 45^\circ \text{ (foliação)} + 15^\circ \text{ (grampos)} = 60^\circ$$

$$T_a = T_{a, \text{máx}} \cdot \cos\{ \text{atan} [(T_{a, \text{máx}} / T_{c, \text{máx}}) \cdot \tan \omega] \} = 68,86\text{kN}$$

$$T_c = T_{c, \text{máx}} \cdot \text{sen}\{ \text{atan} [(T_{a, \text{máx}} / T_{c, \text{máx}}) \cdot \tan \omega] \} = 119,27\text{kN}$$

$$(T_a / T_{a, \text{máx}})^2 + (T_c / T_{c, \text{máx}})^2 = 1$$

Pela Figura 20, a qual apresenta uma das correlações de N(SPT), o valor para resistência da interface solo-grampo (q_s) tende ser alto devido ao N(SPT) elevado, no entanto, estipulou-se 150kPa para um modelo mais conservador devido às foliações de elevado grau.

O diâmetro de perfuração escolhida foi de 75 mm, logo a tensão máxima a interação solo-calda por metro de grampo será:

$$T_{\text{máx}} = [q_s \cdot (\pi \cdot D)] / 1,5 = 23,56 \text{ kN/m}$$

Após o desenvolvimento de algumas análises com essas características de grampo e do solo objeto de estudo, o comprimento de grampo encontrado para satisfazer a condição do fator de segurança mínimo de 1,5 foi de 12 metros. Sendo a variação de 1 metro de comprimento realizada por cada processo teste, com a prerrogativa de simplificação no momento da execução do furo e corte do aço.

Ressalta-se a necessidade, conforme preconizado pela NBR 16920-2:2021, de realização de ensaios de arrancamento para validação, obrigatório em projeto executivo.

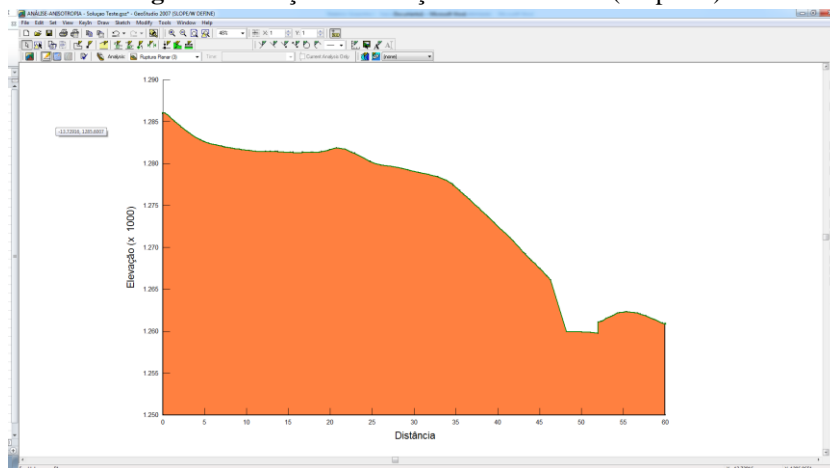
4. DESENVOLVIMENTO

Nesse Capítulo será demonstrado o passo a passo dos desenvolvimentos das análises de estabilidade e posterior solução em solo grampeado. Caso os resultados obtidos na primeira verificação sejam inferiores a determinada, ou seja, fator de segurança inferior a 1,5, ambas as análises serão detalhadas e ilustradas, com o início do desenvolvimento no software Slope/W e em sequência com o Slide2.

4.1 SLOPE/W

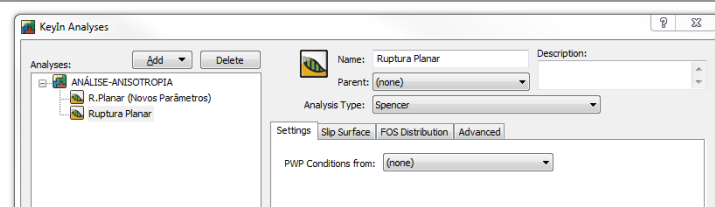
Passo 1 (Análise de Estabilidade) – Ao abrir o programa se importou o *boundary* referente a uma das seções do maciço na formatação dxf (autocad), com o ponto de origem já determinada através pelo zero na distância horizontal e a cota inicial na vertical. Em seguida, acrescentou-se os eixos e nomeou-os (Figura 36).

Figura 36 - Seção do maciço a ser analisado (Slope/W)



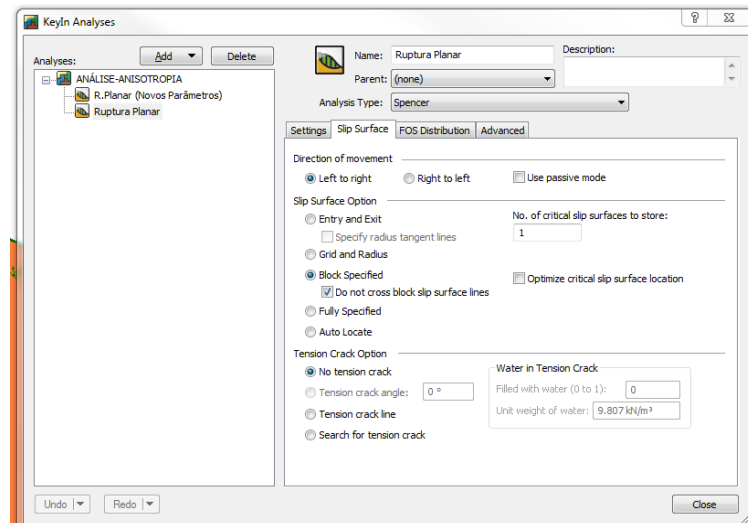
Passo 2 (Análise de Estabilidade) – Nas condições locais definidas através de vistorias, informações tátil visuais e sondagens no entorno, não constatou a existência de nível de água, logo inseriu-se “nenhum” nas condições de PWP. Ainda nas chaves de análise, se especificou o método Spencer como tipo principal para achar a superfície crítica, por satisfazer as condições de equilíbrio de forças e momentos (Figura 37).

Figura 37 - Propriedades para a análise PWP e tipo de análise (Slope/W)



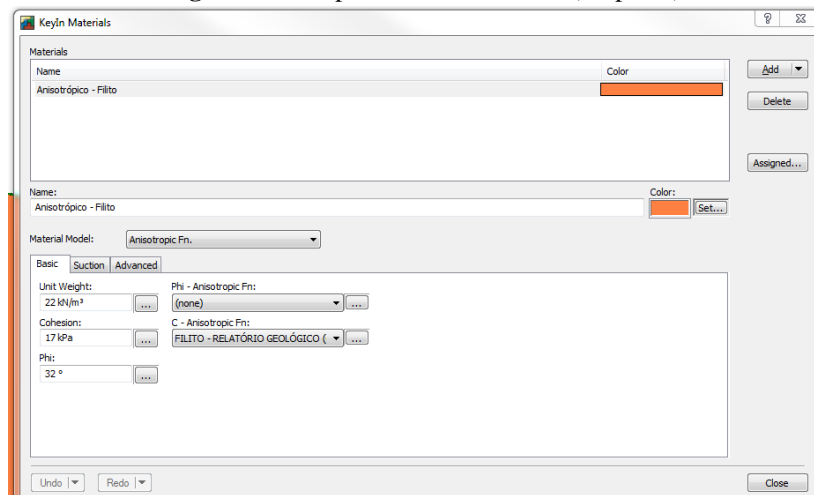
Passo 3 (Análise de Estabilidade) – Ainda nas propriedades gerais, na parte de busca por superfícies de ruptura, como já determinado pela seção, a direção do movimento será procurada da esquerda para direita, e como procuramos superfícies planares, aplicamos a opção de busca por bloco na qual definimos a angulação de busca dentro do bloco pelos pontos internos e as angulações de entrada e saída, e a condição de não cruzamento desses pontos para respeitar a angulação de foliação do maciço (Figura 38).

Figura 38 - Condições da busca pelas superfícies (Slope/W)



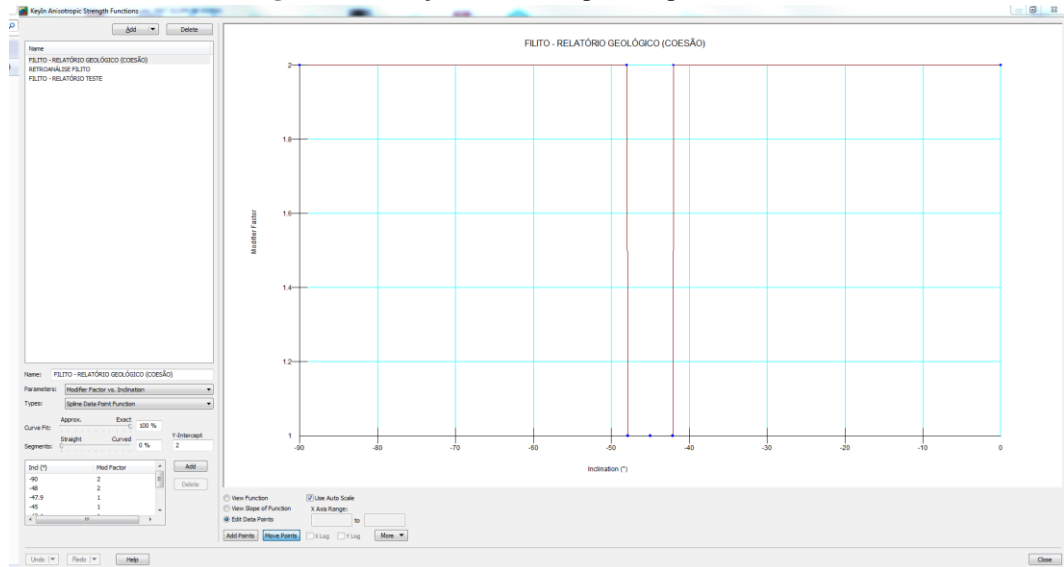
Passo 4 (Análise de Estabilidade) – Na parte de propriedade do material foram inseridas nas caixas os parâmetros de coesão, ângulo de atrito e o peso específico. Para função de anisotropia do solo foi selecionada a opção de função de acordo com a coesão, tendo em vista que as mudanças de atrito foram irrisórias para esse caso em específico de anisotropia (Figura 39).

Figura 39 - Propriedades do material (Slope/W)



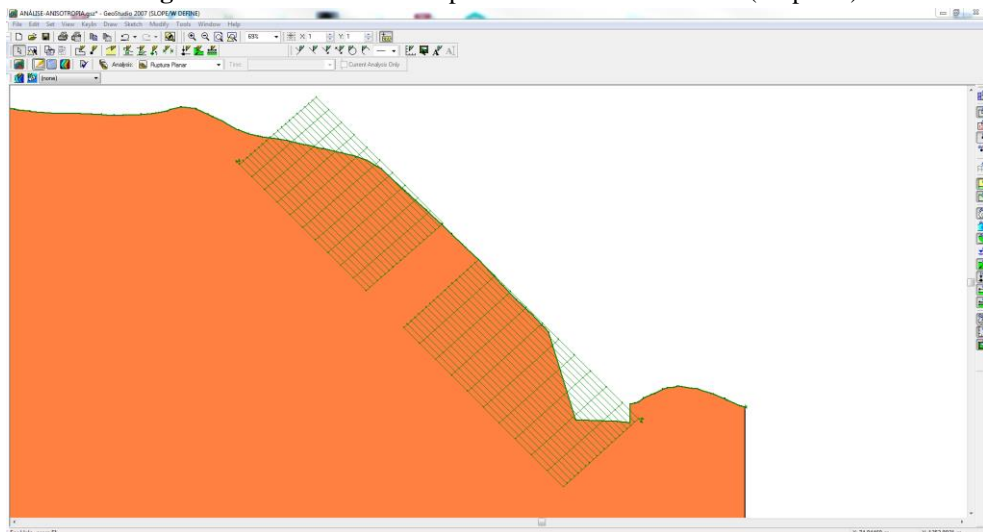
Passo 5 (Análise de Estabilidade) – Ao selecionar a opção de função, foi criada uma que baseou no comportamento mais crítico, ou seja, linear sem curvas de correção. Se definiu uma variação da angulação de ± 3 graus e então desenhou-se o gráfico correspondente ao fator de coesão 1 para os ângulos entre 48 e 42 graus, e coesão de fator 2 ($34 \text{ kPa}/17 \text{ kPa} = 2$) para os ângulos restantes (Figura 40).

Figura 40 - Função de anisotropia (Slope/W)



Passo 6 (Análise de Estabilidade) – Seguindo linhas guias de 135 graus, ou seja, 45° no sentido da ruptura, foram criados os blocos de busca (Figura 41).

Figura 41 - Blocos de busca para análise de estabilidade (Slope/W)



Passo 7 (Análise de Estabilidade) – O bloco esquerdo (Figura 42) foi desenhado e definiu-se linhas de incrementos de determinam os pontos de entrada na busca pela superfície crítica (10x20), e ainda nessa etapa se estabeleceu a variação dos ângulos de projeção para entrada de 135°, para dar continuidade a foliação, até a angulação de 95°, com incremento de 5 ângulos. O mesmo foi realizado para o bloco direito (Figura 43), mas com os ângulos de saída variando de 0° a -45°.

Figura 42 - Bloco esquerdo de entrada para análise de estabilidade (Slope/W)

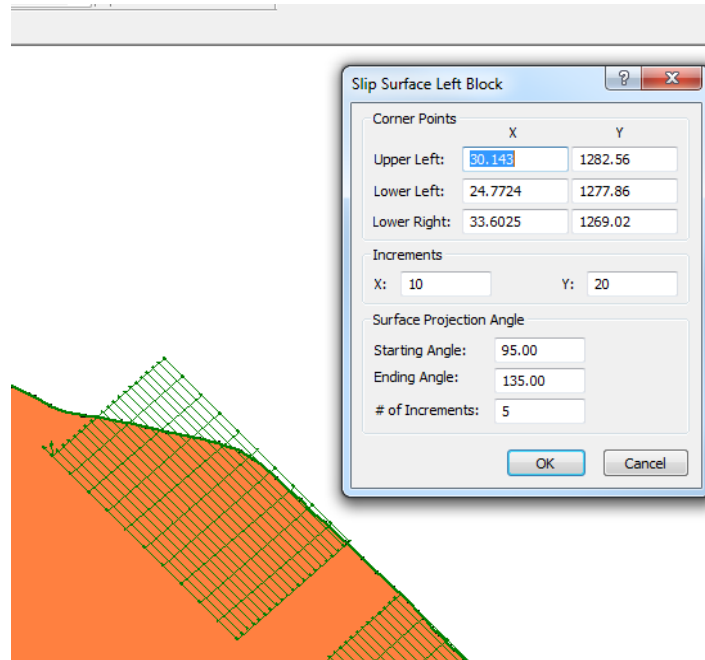
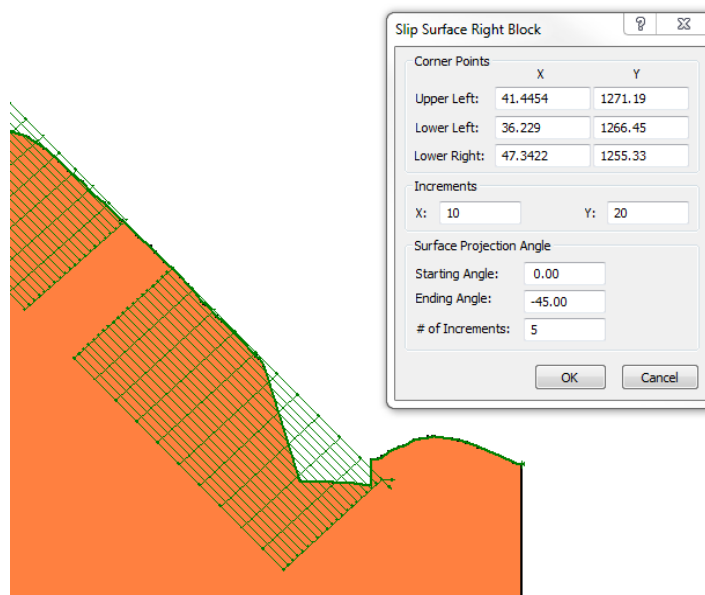
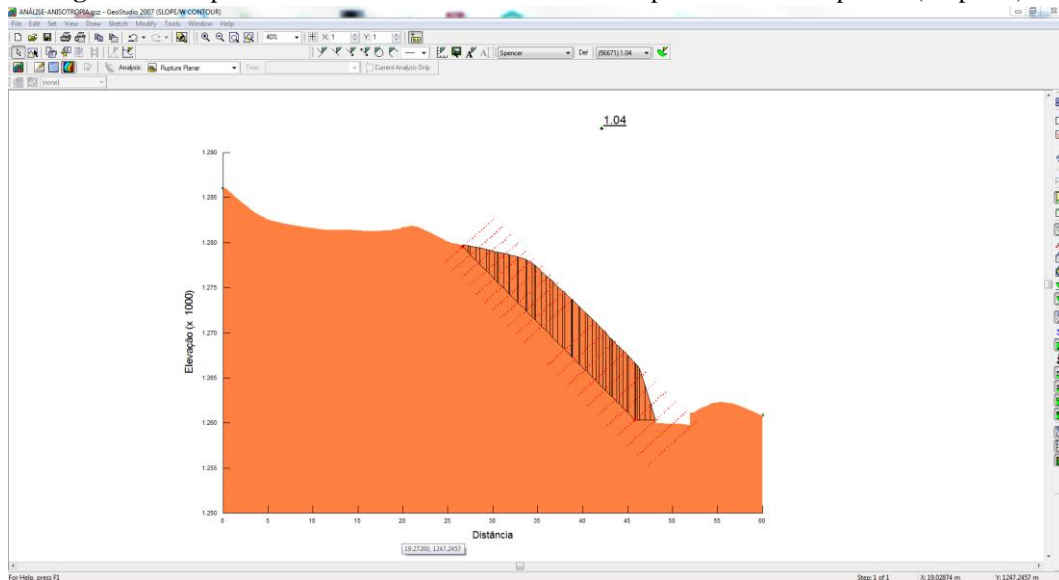


Figura 43 - Bloco direito de entrada para análise de estabilidade (Slope/W)



Passo 8 (Análise de Estabilidade) – A partir dessas condições foi gerada a superfície crítica através da busca em 90mil superfícies diferentes que passavam pelos blocos de busca. O fator gerado por essa superfície pelo método de Spencer foi de 1,04 (Figura 44).

Figura 44 - Superfície crítica da análise de estabilidade pelo método de Spencer (Slope/W)



Passo 9 (Análise de Estabilidade) – Em exemplo, se selecionou duas fatias para a demonstrações de forças e conferência das propriedades utilizadas. Verificou-se a utilização da coesão de 17kPa para o ângulo de -42° a -48° (Figura 45) e a coesão de 34kPa para os demais (Figura 46), o que corresponde com a caso analisado.

Figura 45 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para análise de estabilidade (Slope/W)

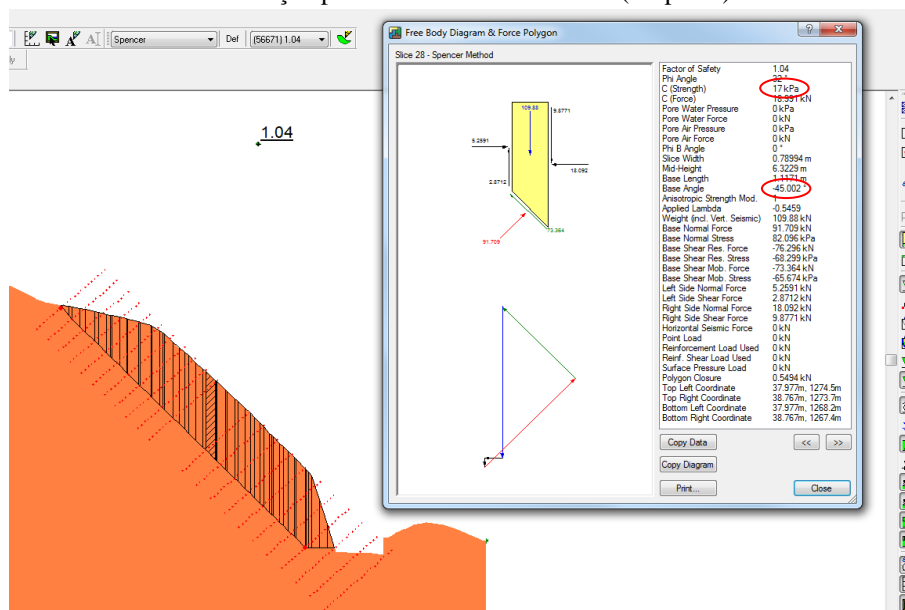
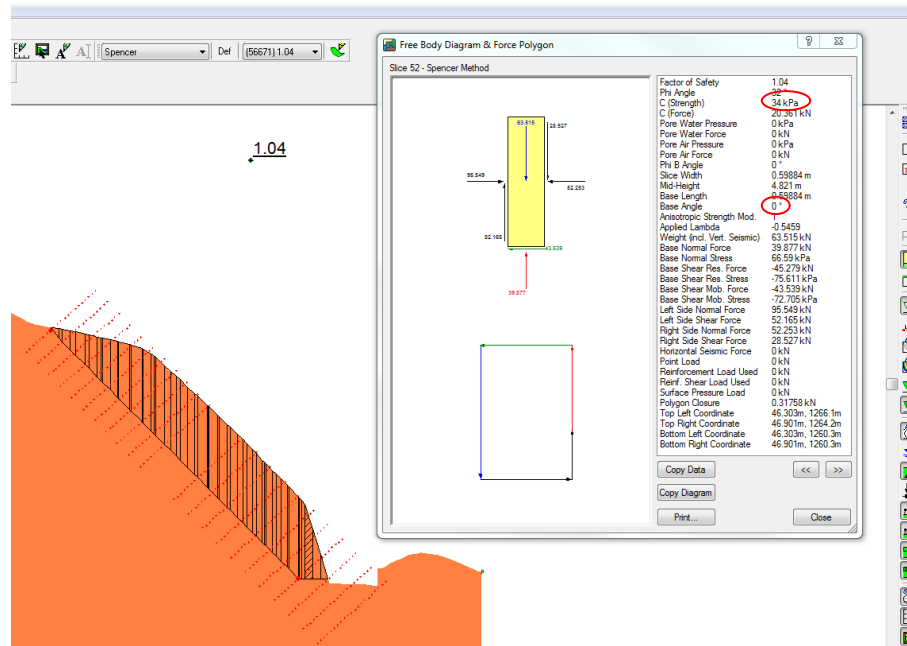
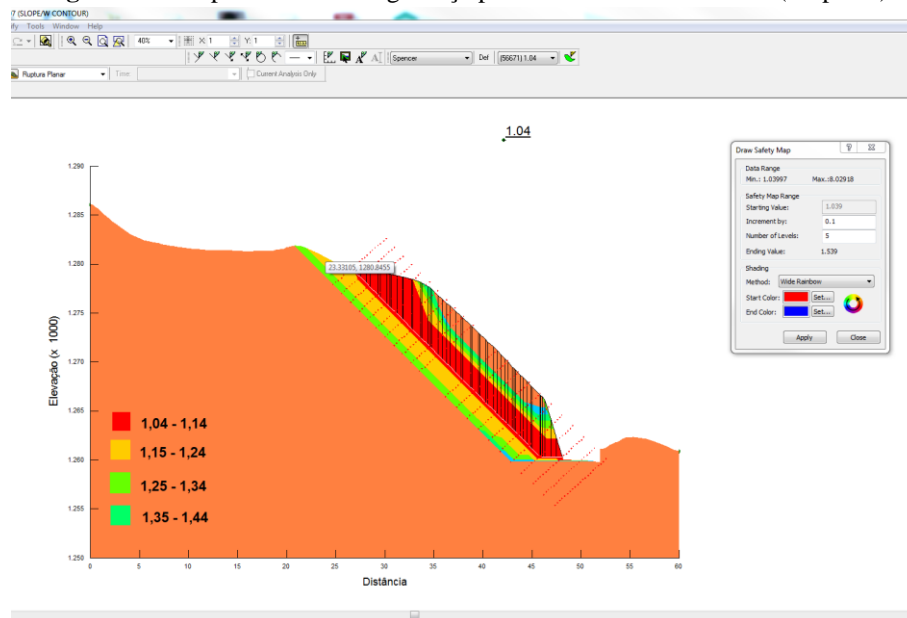


Figura 46 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente fora da variação do ângulo da foliação para análise de estabilidade (Slope/W)



Passo 10 (Análise de Estabilidade) – Para uma melhor visualização da busca, implementou-se um mapa dos fatores de segurança encontrados de acordo com a superfície gerada de menor valor (1,04) com incremento de 0,1 em 5 cores diferentes (Figura 47).

Figura 47 - Mapa do fator de segurança para análise de estabilidade (Slope/W)



Após a análise de estabilidade, constatou-se que o resultado foi inferior ao fator de segurança mínimo determinado através das tabelas da NBR 16920-2 para esse caso. Portanto foi proposto uma solução de solo grampeado que foi realizado nas seguintes etapas.

Segundo Manual do programa, existem dois métodos para os cálculos, o primeiro (YES) computa a redução das resistências, do aço e do solo-grampo, pelo fator de segurança encontrado da superfície de ruptura, gerando uma dependência. Se o método especificado for (No), os fatores de segurança entram separados e fixos, com seu valor de entrada manual, independentemente do valor de FS encontrado na superfície (Figura 48).

Figura 48 - Método (Yes) e (No) (Slope/W)

The "F of S Dependent" Yes option divides the specified reinforcement forces by the overall global factor of safety. The "F of S Dependent" No option uses the allowable specified reinforcement forces directly, and the reinforcement is not altered by the global factor of safety.

Fonte: GeoStudio, 2021

Ainda na etapa de propriedade dos grampos, existe a possibilidade de distribuição da carga de peso do solo ao longo do grampo ou pontual, no encontro do grampo com a base da fatia da superfície analisada. Ambos os modelos satisfazem as equações de equilíbrio, apenas geram uma pequena diferença nos valores de FS e a escolha se dá por critério do projetista.

Passo 1 (Solução de Solo Grampeado) – Selecionou-se o grampo como tipo de reforço, o método (No) para uma separação dos valores do FS, a carga sendo distribuída ao longo de todo o reforço e o espaçamento horizontal e vertical entre os grampos de 2,00 metros, sendo o primeiro colocado a 1 metro da base, resultou em um comprimento de 12 metros, para se alcançar o FS esperado. Foram introduzidos os valores anteriormente encontrados nas análises preliminares de tensão do reforço, se atentando que a capacidade da barra por arrancamento e cisalhamento, que já foi calculada pelo valor admissível computa o FS, logo, o fator de segurança introduzido foi de 1 para não existir duplicidade nos cálculos (Figura 49).

Figura 49 - Propriedade dos grampos (Slope/W)

Reinforcement	
Type:	Nail
F of S Dependent:	No
Load Distribution:	Even along reinf.
Length:	11.999996
Direction:	14.999 °
Bond Diameter:	0.075 m
Bond Safety Factor:	1.5
Bond Skin Friction (F/Area):	150 kPa
Nail Spacing:	2 m
Bar Capacity:	69 kN
Bar Safety Factor:	1
Shear Capacity:	119 kN
Shear Safety:	1
Apply Shear:	Perp. to Reinf.
Applied Load: 0 - 34.5 kN	
Bond Resistance: 11.781 kPa	

Passo 2 (Solução de Solo Grampeado) – Como obrigatório por norma, foi distribuído a carga de 20kPa ao longo de toda a superfície do terreno (Figura 50 e 51).

Figura 50 – Características da carga distribuída (Slope/W)

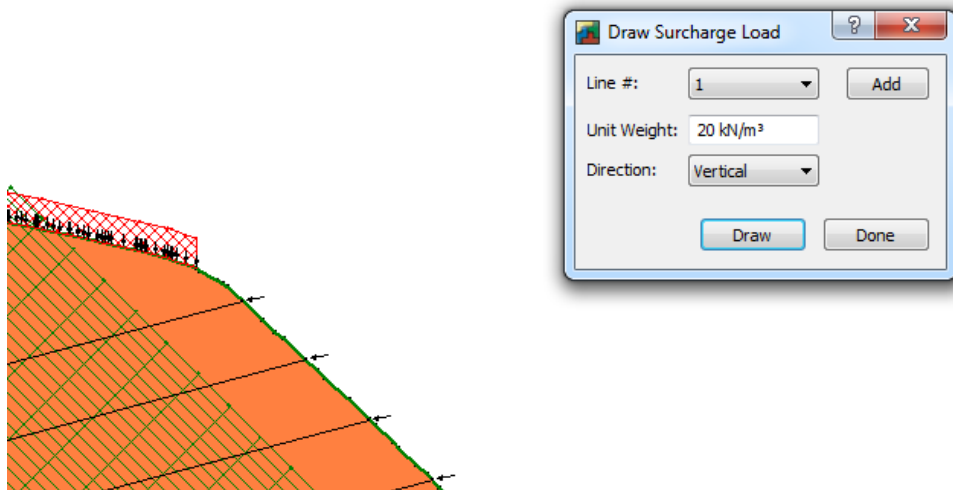
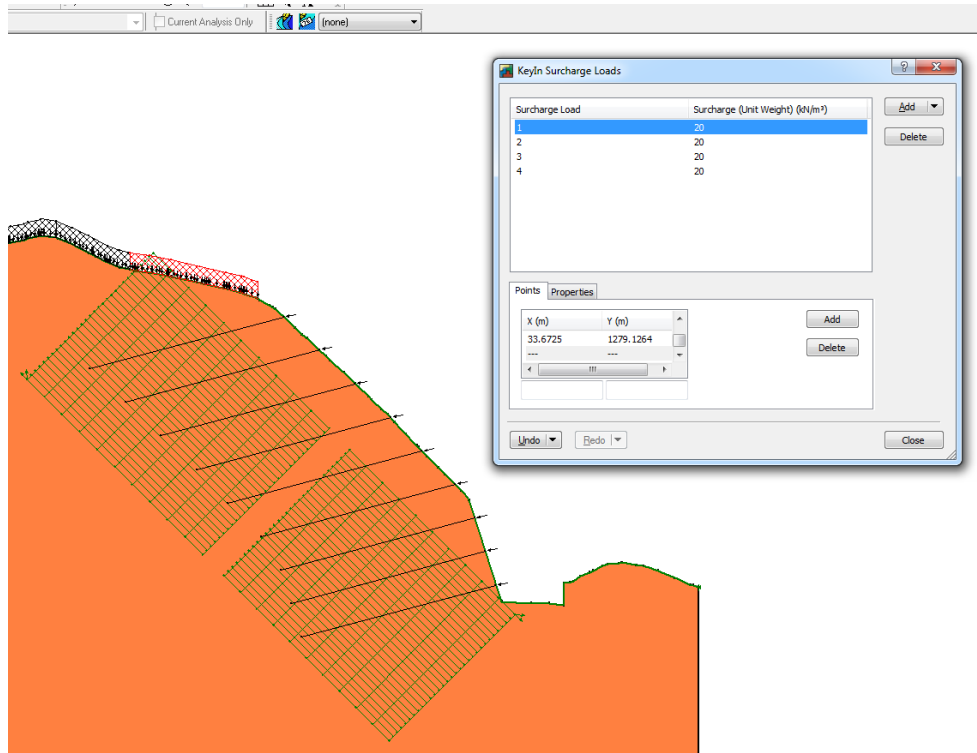


Figura 51 - Implementação da carga distribuída de 20kPa ao longo da superfície do terreno (Slope/w)



Passo 3 (Solução de Solo Grampeado) – Os blocos desenhados anteriormente para análise de estabilidade não se adequavam para a condição dos grampos. Então, foram realizados ajustes para posicioná-los envolvendo a superfície de ruptura encontrada na análise

de estabilidade e com o término dos grampos, posicionando-os mais ou menos ao centro em relação a coordenada x com incremento de pontos (10x30), com a finalidade de se visualizar no mapa o crescimento do fator de segurança para ambos os lados do bloco, confirmando a superfície crítica (Figura 52 e 53).

Figura 52 - Bloco esquerdo para solução de solo grampeado (Slope/w)

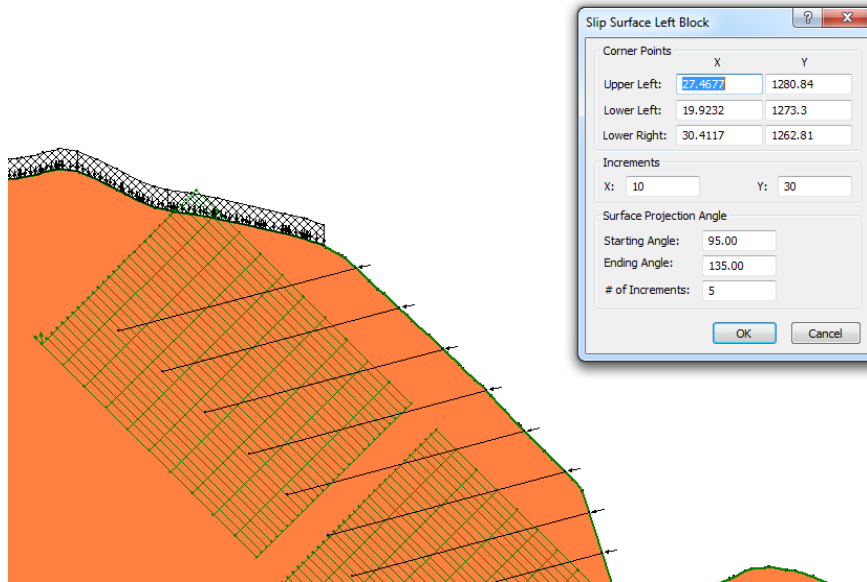
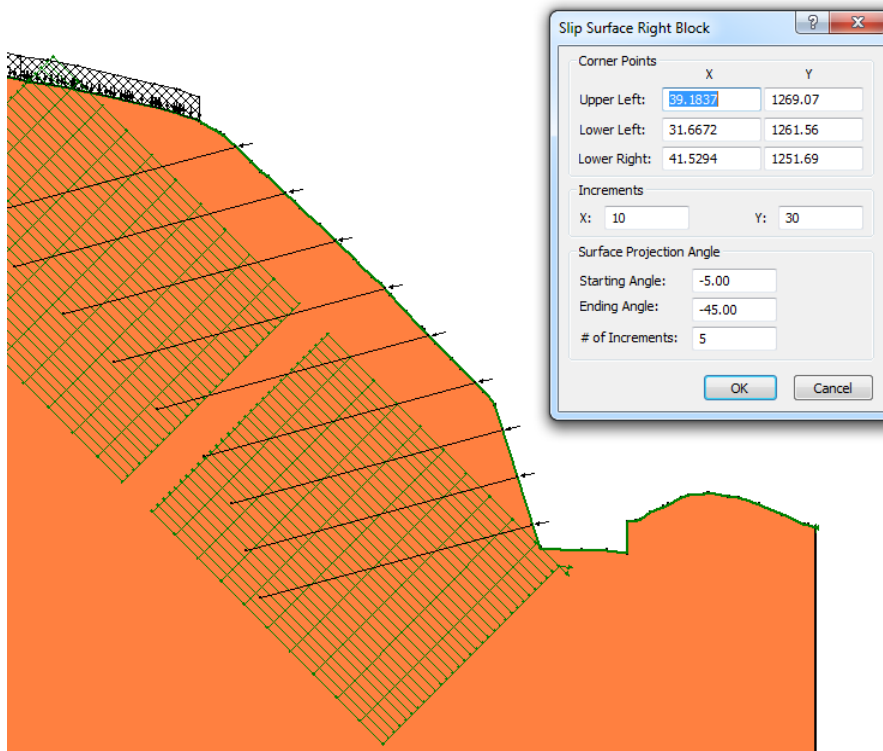
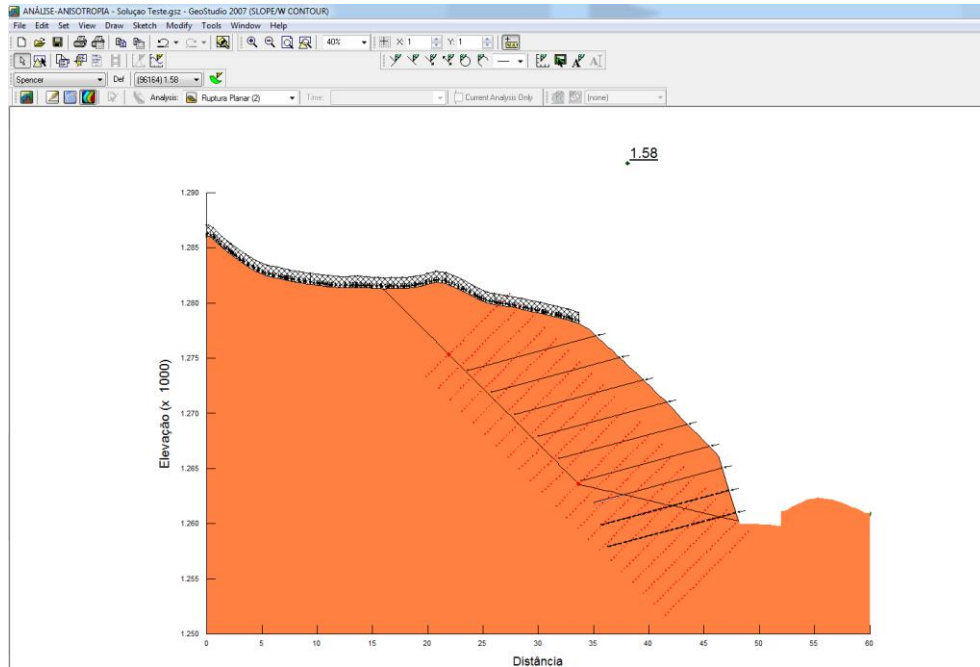


Figura 53 - Bloco direito para solução de solo grampeado (Slope/w)



Passo 4 (Solução de Solo Grampeado) – Com essas condições se obteve o resultado de FS esperado pelo método de Spencer de 1,58 e com angulação de 45° (Figura 54).

Figura 54 - Superfície crítica do Solução de solo grampeado pelo método de Spencer (Slope/W)



Passo 5 (Solução de Solo Grampeado) – Verificação da alocação das coesões nas fatias em relação à angulação da base (Figura 55 e 56).

Figura 55 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slope/W)

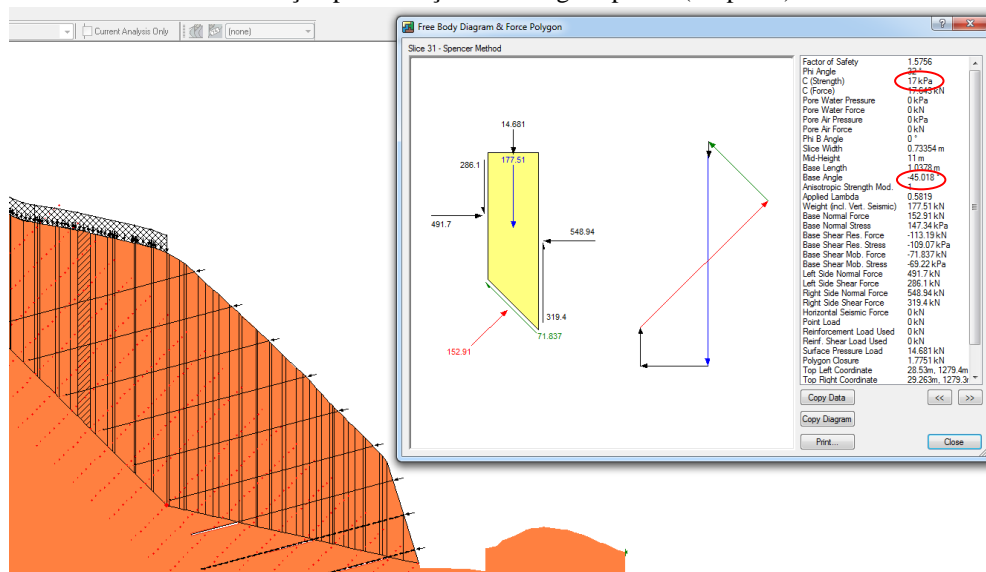
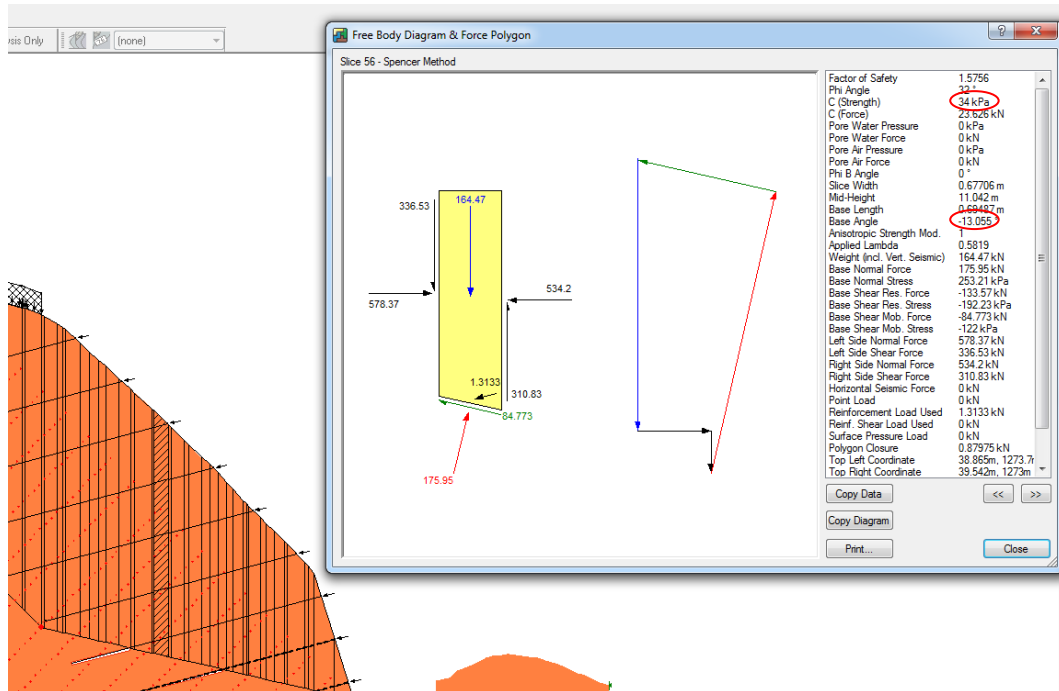
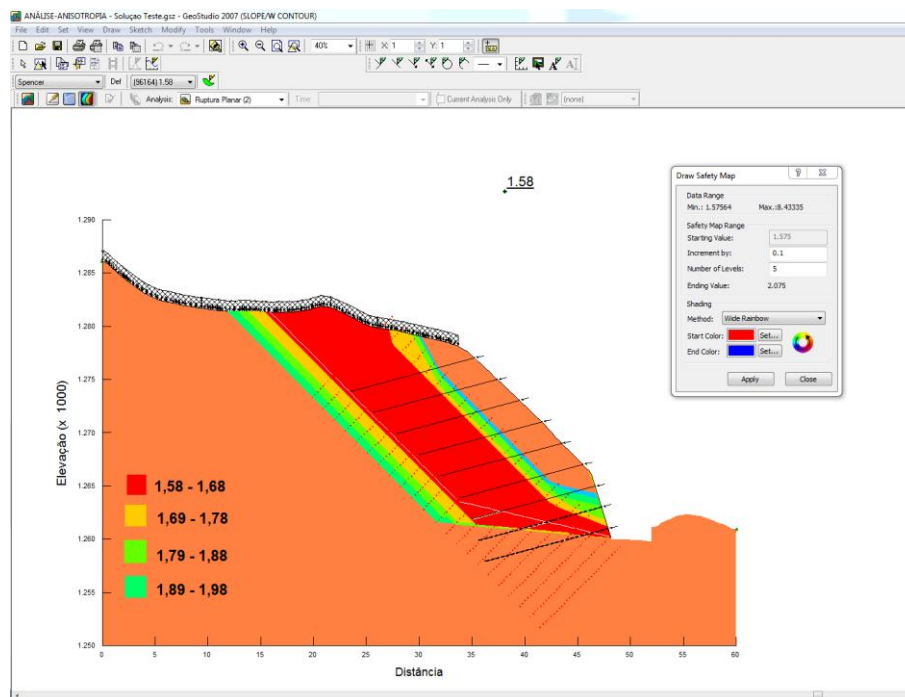


Figura 56 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente fora da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slope/W)



Passo 6 (Solução de Solo Grampeado) – Apresentação do mapa dos fatores de segurança encontrados de acordo com a superfície gerada de menor valor (1,58) com incremento de 0,1 em 5 cores diferentes (Figura 57).

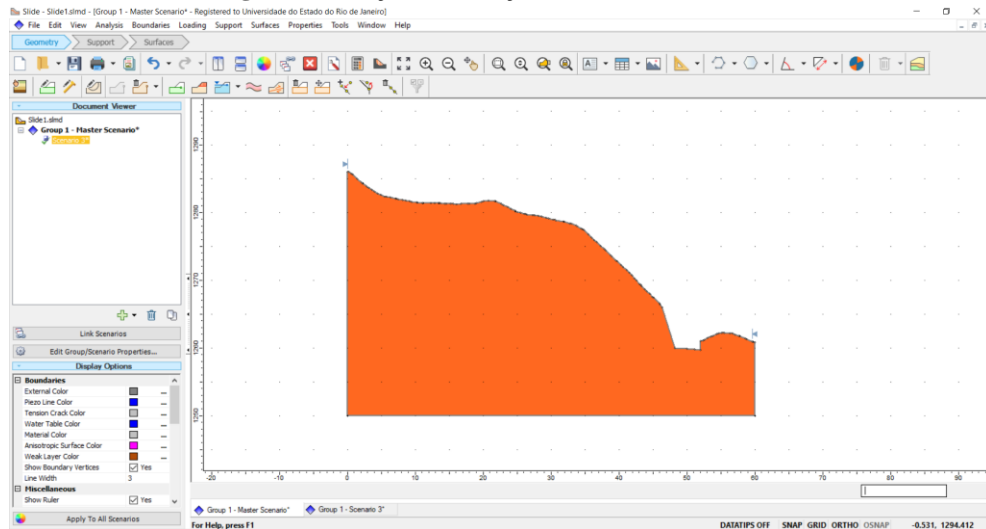
Figura 57 - Mapa do fator de segurança para solução de solo grampeado (Slope/W)



4.2 SLIDE2

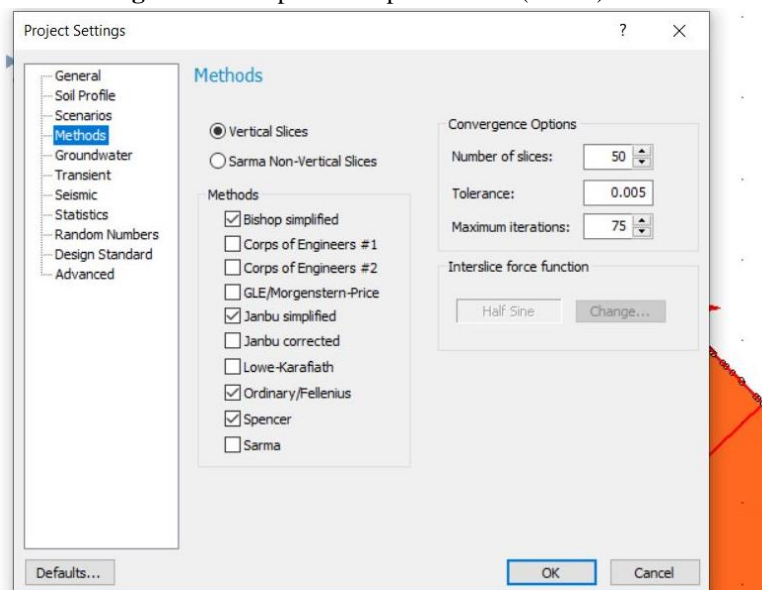
Passo 1 (Análise de Estabilidade) – Ao abrir o programa se importou o *boundary* referente a uma das seções do maciço na formatação dxf (autocad), com o ponto de origem já determinada através do zero na distância horizontal e a cota inicial na vertical (Figura 58).

Figura 58 - Seção do maciço a ser analisado (Slide2)



Passo 2 (Análise de Estabilidade) – Nas propriedades do projeto, foi acrescentado ao default o método de Spencer para a análise do caso, por satisfazer as condições de equilíbrio de forças e momentos. Na parte geral, selecionou-se a direção de ruptura da esquerda para direita para as buscas concordarem com a situação da seção (Figura 59).

Figura 59 - Propriedades para análise (Slide2)



Passo 3 (Análise de Estabilidade) – Na definição do material, se inseriu o peso específico do solo na caixa correspondente e no tipo de resistência selecionou-se uma função anisotrópica, e logo após, definiu-a com as propriedades de coesão sendo 17kPa para os ângulos 42° a 48° e 34kPa para os restantes (Figura 60 e 61). Outra opção, é selecionar a alternativa de anisotropia linear, a qual é demonstrada na Figura 62.

Figura 60 - Propriedades do material (Slide2)

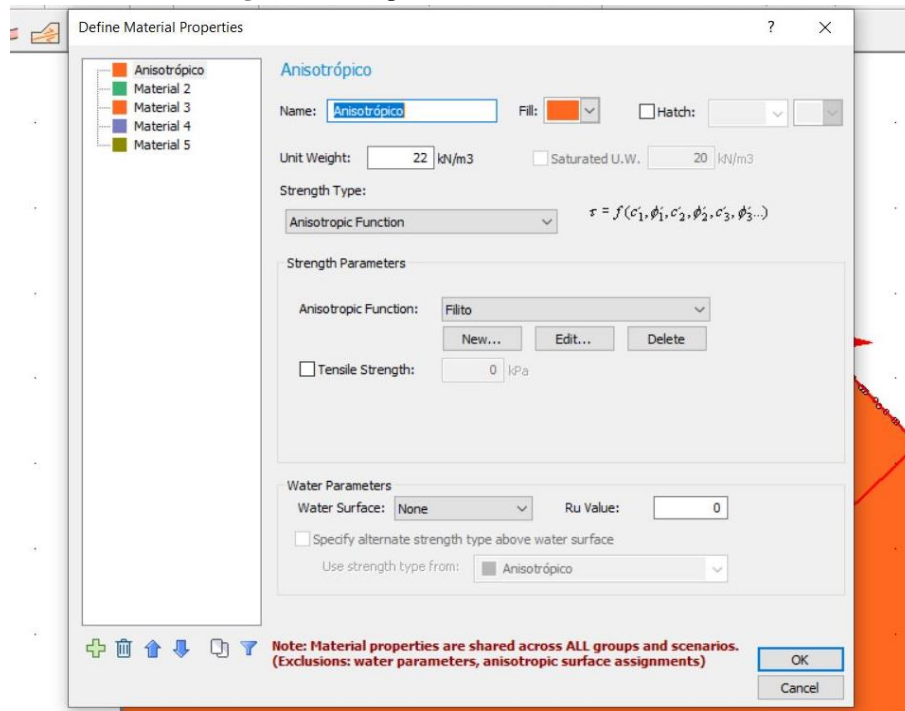


Figura 61 - Função da anisotropia do material (Slide2)

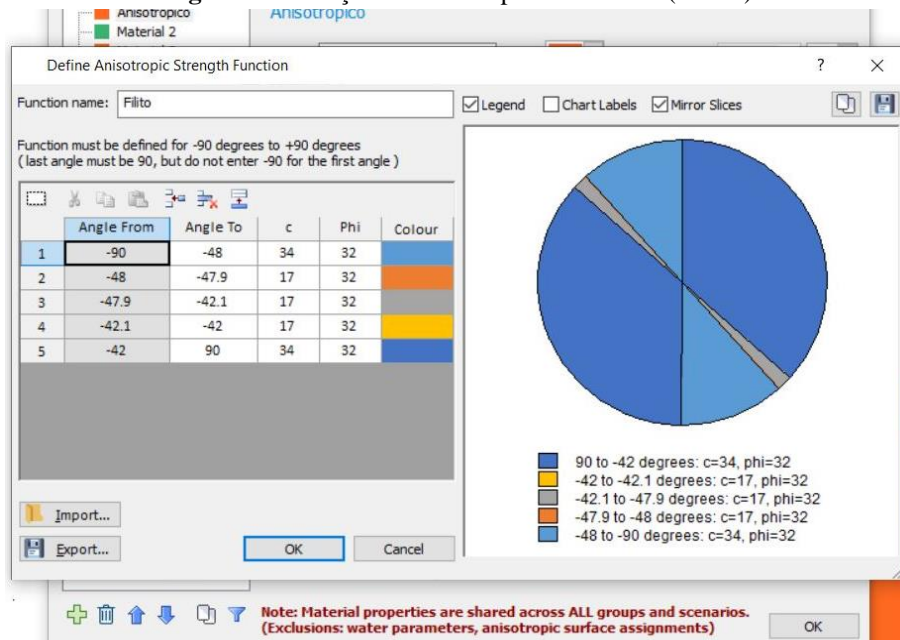
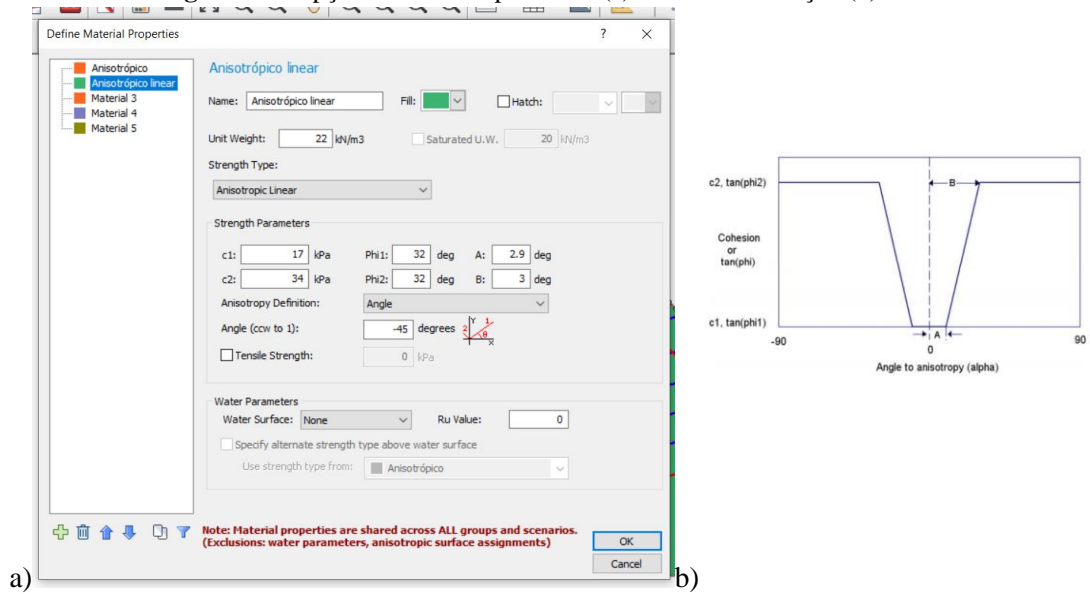


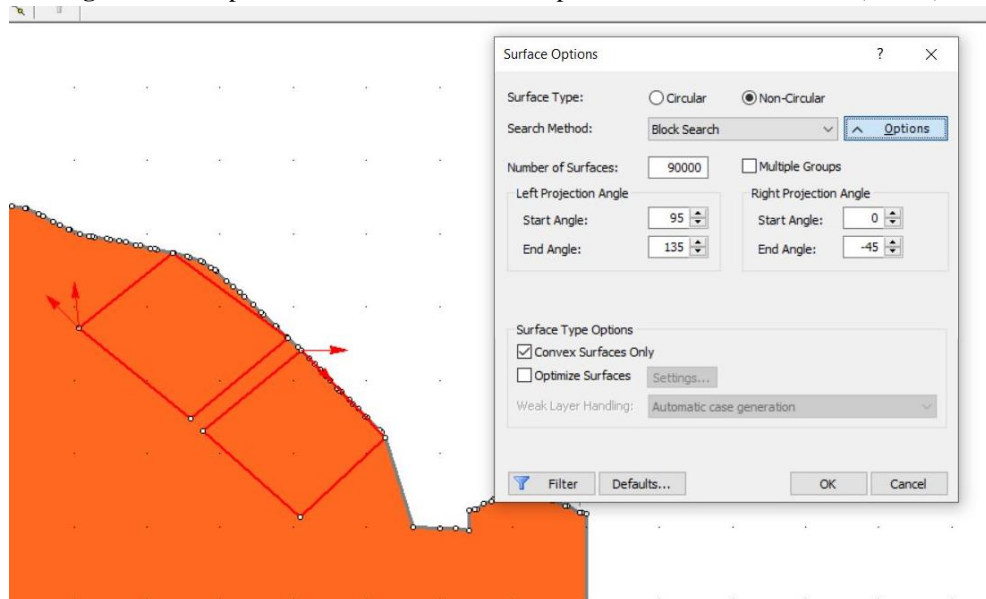
Figura 62 - Opção de Anisotropia linear (a) modo de utilização (b)



Fonte: (a) Autor (b) (Tutorial 32 – SLIDE2)

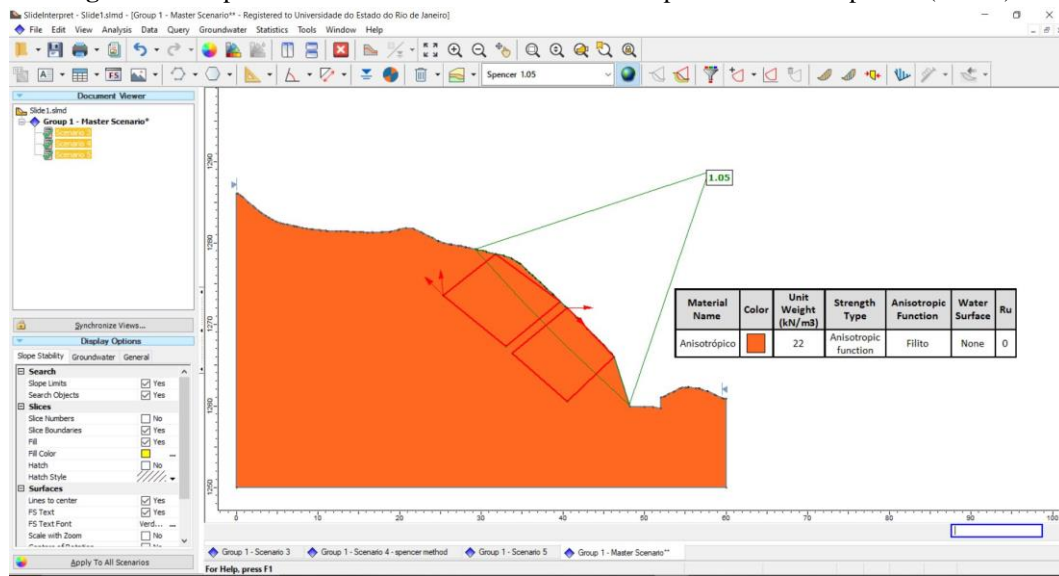
Passo 3 (Análise de Estabilidade) – Em opções de superfície, como a busca é por superfícies planares, foi selecionada a opção não circular, e no método a de procura por bloco. Para se comparar com o outro *software* se estipulou um número de 90 mil superfícies para a busca. E foi inserido os mesmos graus de entrada e saída do primeiro *software* para as projeções, de 135° a 95° para entrada e de 0° a -45° para a saída. E em seguida foram desenhados (Figura 63).

Figura 63 - Propriedades dos blocos de busca para análise de estabilidade (Slide2)



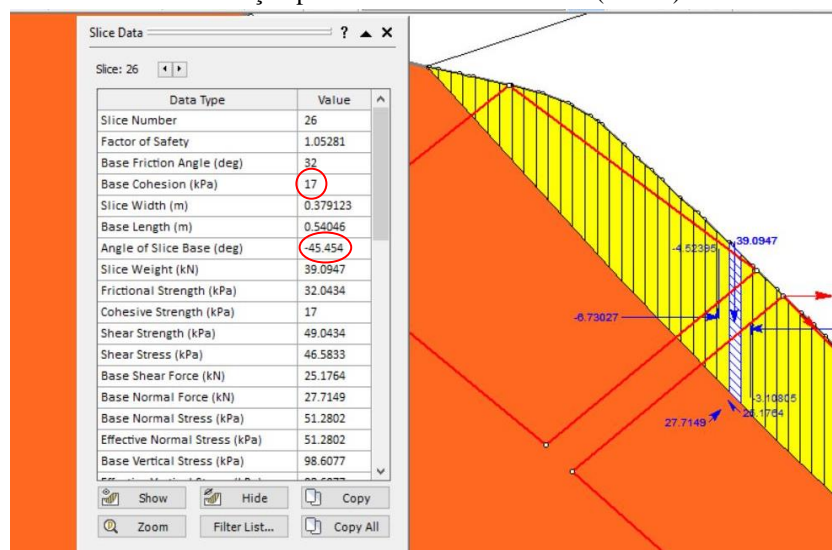
Passo 4 (Análise de Estabilidade) – A partir dessas condições foi gerada a superfície crítica, através da busca das superfícies por diferentes ângulos que passavam pelos blocos. O fator gerado por essa superfície, pelo método de Spencer, foi de 1,05 e como esperado a angulação da superfície ficou entre 42 e 48 graus, correspondendo à direção da foliação (Figura 64).

Figura 64 - Superfície crítica da análise de estabilidade pelo método de Spencer (Slide2)



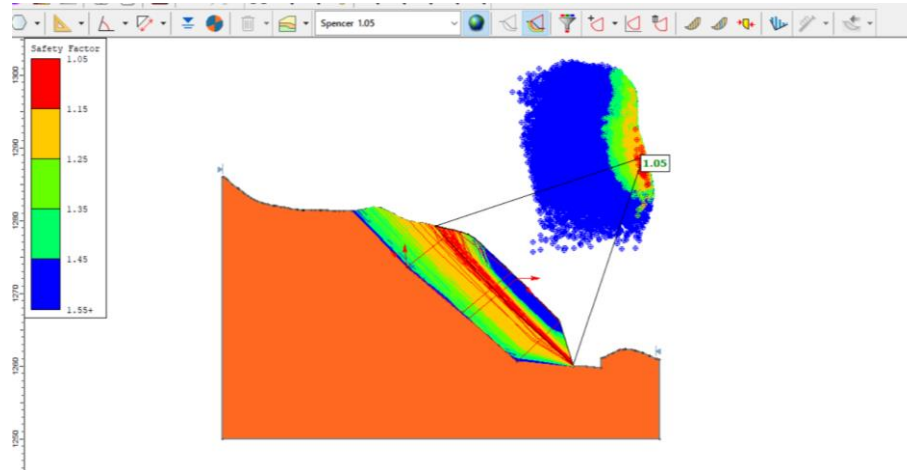
Passo 5 (Análise de Estabilidade) – Em exemplo, se selecionou uma fatia, já que a superfície crítica gerada possui somente uma angulação, para a demonstrações de forças e conferência das propriedades utilizadas. Verificou-se a utilização a coesão de 17kPa para o ângulo de -45° , o que corresponde com o caso analisado (Figura 65).

Figura 65 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para análise de estabilidade (Slide2)



Passo 6 (Análise de Estabilidade) – Para uma melhor visualização da busca, implementou-se um mapa dos fatores de segurança encontrados, de acordo com a superfície gerada do menor valor (1,05) com incremento de 0,1 em 5 cores diferentes (Figura 66).

Figura 66 - Mapa de segurança para análise de estabilidade (Slide2)



Após a análise de estabilidade, constatou-se que o resultado foi inferior ao fator de segurança mínimo determinado através das tabelas da NBR 16920-2 para esse caso. Portanto foi proposto uma solução estabilizadora de solo grampeado, realizado nas seguintes etapas.

De forma analítica, o Método A do Slide2 se equipara com o (No) do Slope/w, logo, o Método B com o (Yes). Podendo ser confirmado no manual na Figuras 67 e 68:

Figura 67 - Método ativo (A) e passivo (B)

Active Support is included in the SLIDE analysis as in Eqn.1.

$$F = \frac{\text{resisting force} + T_N \tan \phi}{\text{driving force} - T_S} \quad \text{Eqn.1}$$

where T_N is the normal component and T_S is the shear component of the force applied to the base of a slice, by the support.

Active Support is assumed to act in such a manner as to DECREASE the DRIVING FORCE in the Factor of Safety calculation. Grouted Tiebacks, tensioned cables or rockbolts, which exert a force on the sliding mass before any movement has taken place, could be considered as *Active* support.

Passive Support is included in the SLIDE analysis as in Eqn.2.

$$F = \frac{\text{resisting force} + T_N \tan \phi + T_S}{\text{driving force}} \quad \text{Eqn.2}$$

By this definition, *Passive* Support is assumed to INCREASE the RESISTING FORCE provided by shear restraint, in the Factor of Safety equation.

Figura 68 - Complemento Método A e B (Slope/W)

For Active support (Method A), because the support forces are included in the denominator of the safety factor equation (Eqn.1) the support force is NOT divided by the factor of safety calculated during the analysis. Only the soil strength is divided by the factor of safety. Hence the support capacity input by the user for Active (Method A) should be the ALLOWABLE support force.

For Passive support (Method B), because the support forces are included in the numerator of the safety factor equation (Eqn.2) the support forces ARE divided by the factor of safety calculated during the analysis (i.e. both soil strength and support forces are divided by the factor of safety). Hence the support capacity input by the user for Passive (Method B) should be the ULTIMATE support force.

Fonte: ROCSCIENCE – rocscience.com/help/slide2/slide_model/support/active_passive_force_application.htm.

Acesso em: 28/08/2021

Passo 1 (Solução de Solo Grampeado) – Selecionou-se o método (A) para uma separação dos valores do FS, o tipo de suporte de grampos, o espaçamento horizontal entre eles de 2,00 metros. Foram introduzidos os valores anteriormente encontrados nas análises preliminares, se atentando as tensões da barra por arrancamento e cisalhamento (Figura 69). O parâmetro de resistência ao cisalhamento solo-grampo (q_s) nesse programa, está em relação ao comprimento de grampo, e não pela área de contato, logo se introduziu o valor de kN/m calculado nas análises preliminares (Figura 70). E nessa mesma etapa, não houve necessidade de colocação de nenhum fator de segurança para uma não duplicidade de redução, tendo em vista que em todos os cálculos já se havia considerado os valores de FS (Figura 71).

Figura 69 - Propriedade dos grampos (Slide2)

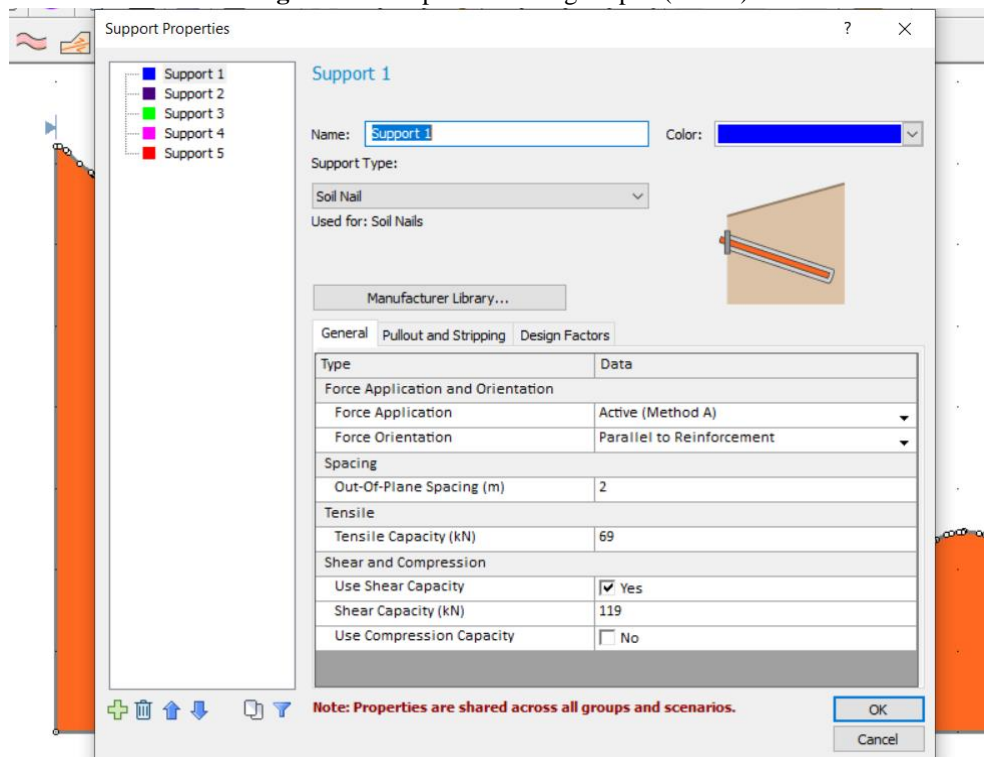


Figura 70 - Propriedade da placa e resistência ao cisalhamento solo-grampo q_s (Slide2)

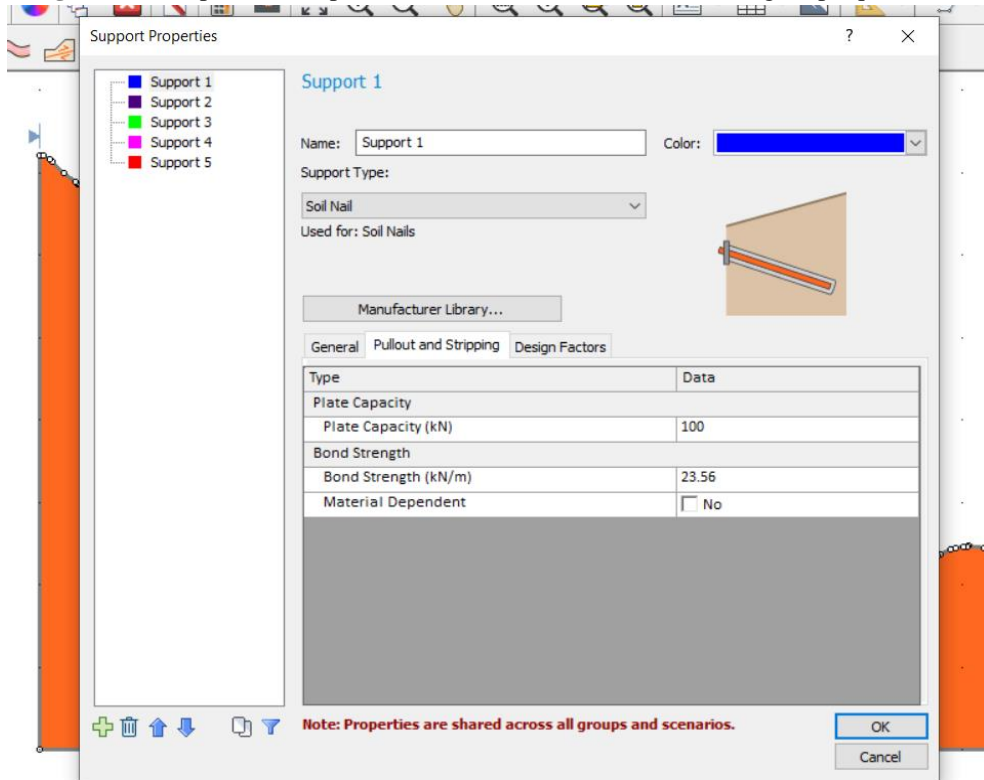
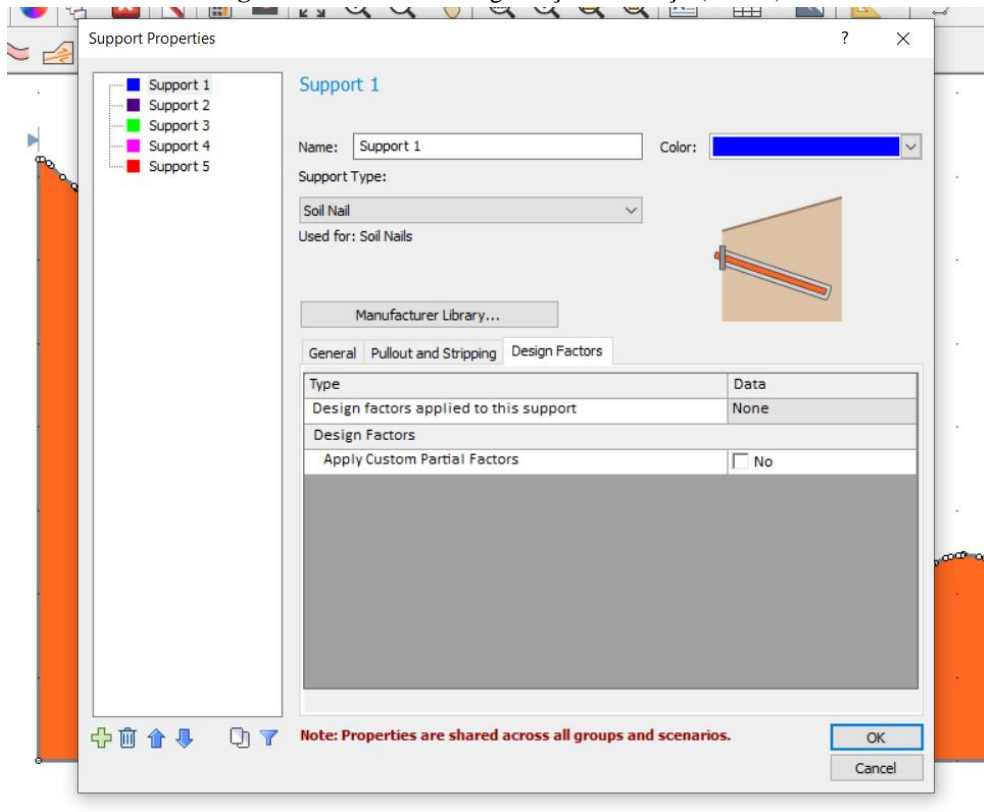
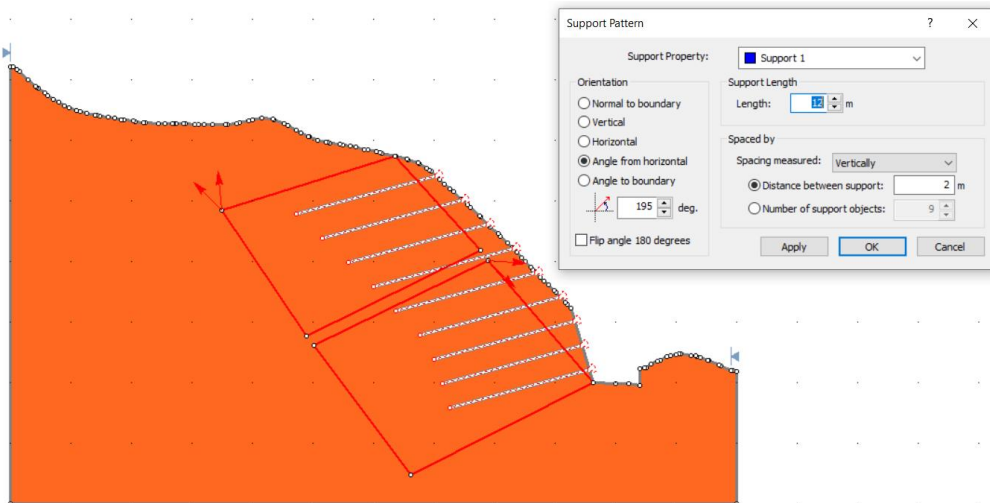


Figura 71 - Fatores de Segurança do reforço (Slide2)



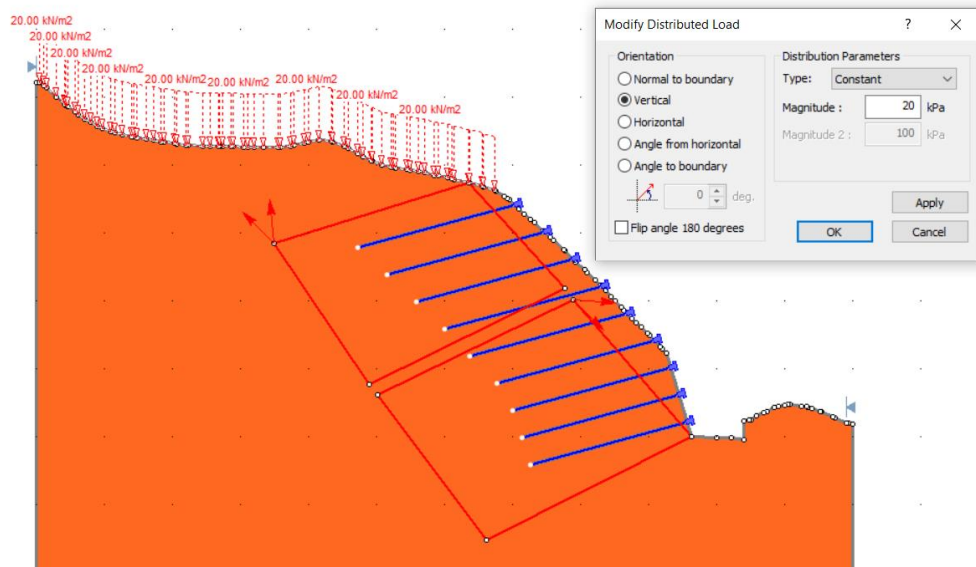
Passo 2 (Solução de Solo Grampeado) – Nessa etapa se introduziram os grampos, assim como seu comprimento (12 metros), angulação ($15^\circ = 195^\circ$ com a horizontal da direita para esquerda), espaçamento vertical de 2,00 metros, sendo o primeiro colocado a 1 metro da base. E os blocos foram redimensionados para envolver a superfície crítica da análise de estabilidade e o posicionamento do final dos grampos ao centro de sua largura, para a visualização de um crescimento de ambos os lados do fator de segurança (Figura 72).

Figura 72 - Aplicação do reforço (Slide2)



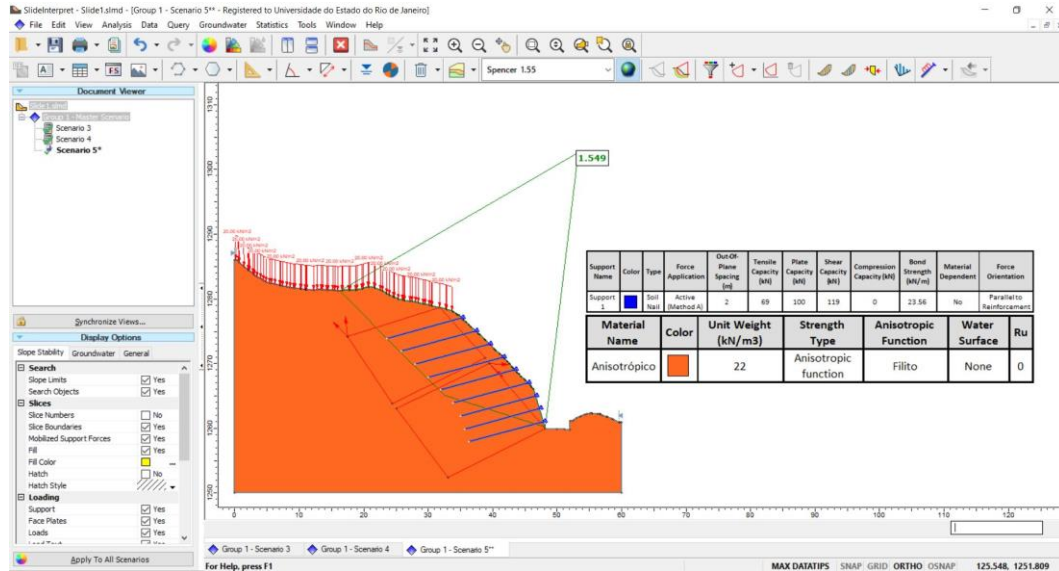
Passo 3 (Solução de Solo Grampeado) – Como obrigatório por norma, implementou-se a carga uniformemente distribuída de 20kPa ao longo de toda a superfície do terreno (Figura 73).

Figura 73 - Implementação da carga distribuída de 20kPa ao longo da superfície do terreno (Slide2)



Passo 4 (Solução de Solo Grampeado) – Com essas condições se obteve o resultado de FS pelo método de Spencer de 1,55 e angulação de 44° (Figura 74).

Figura 74 - Superfície crítica do solução de solo grampeado pelo método de Spencer (Slide2)



Passo 5 (Solução de Solo Grampeado) – Verificação da alocação das coesões em relação à angulação da base das fatias (Figura 75 e 76).

Figura 75 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente dentro da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slide2)

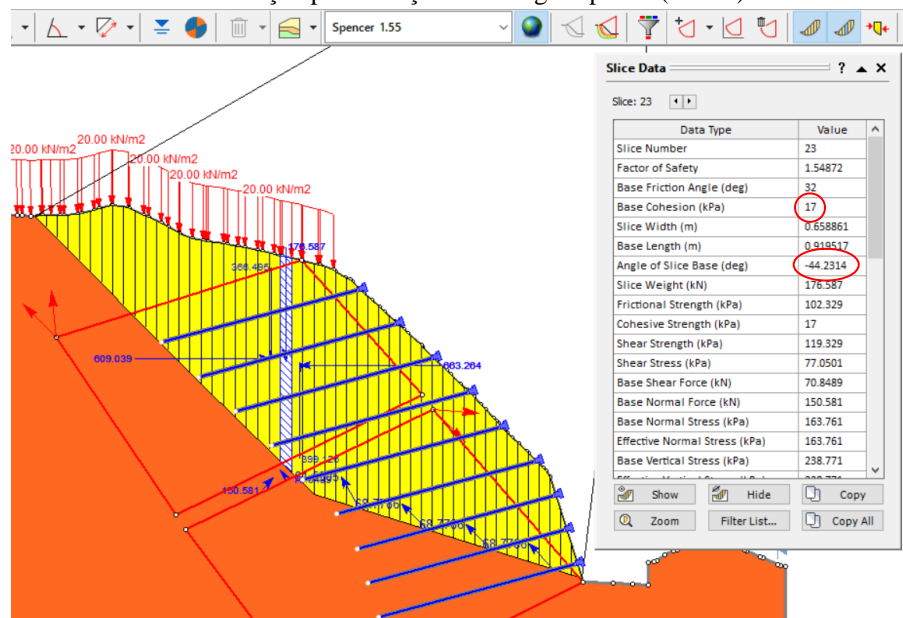
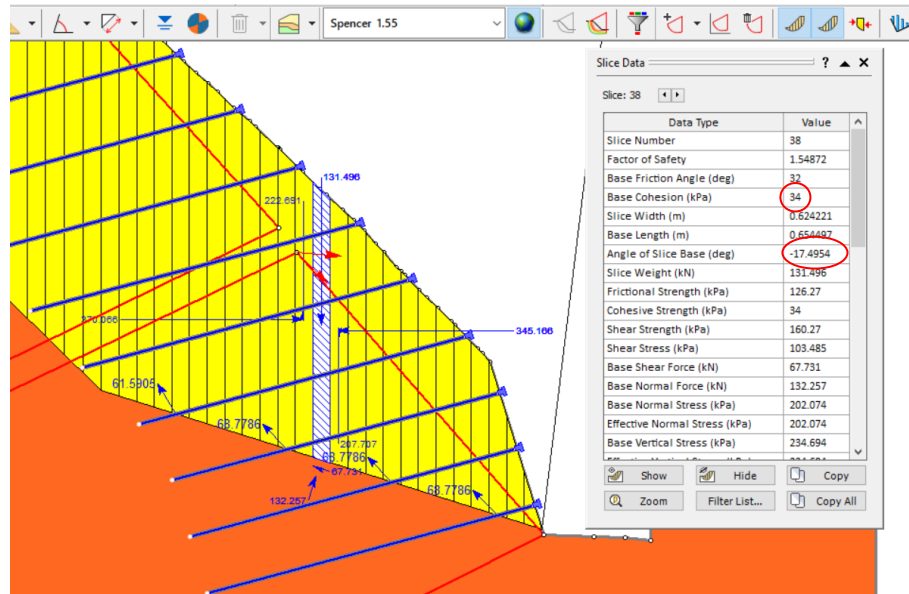
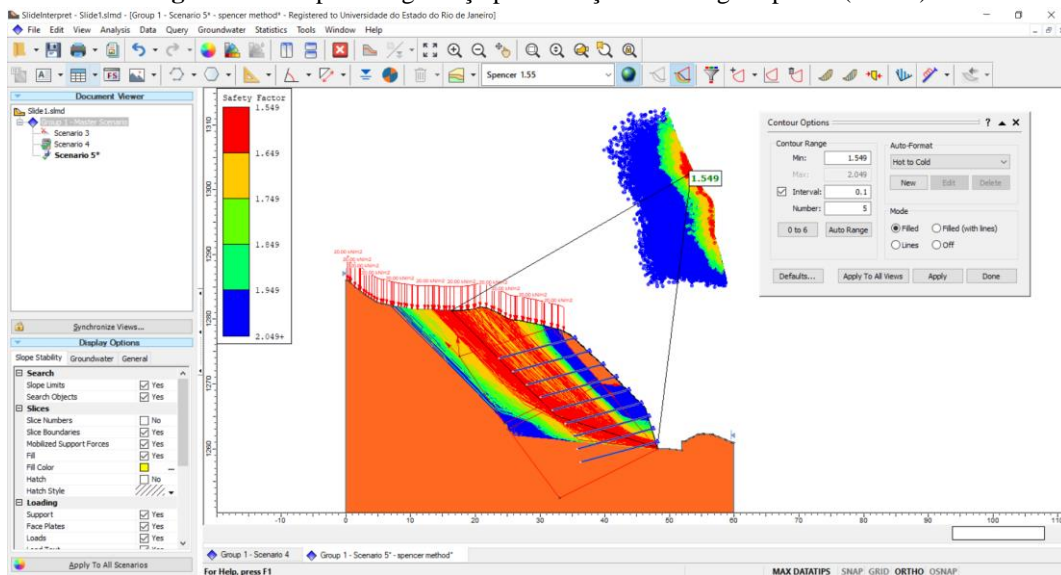


Figura 76 - Exemplo e demonstração das forças na fatia de coesão correspondente fora da variação do ângulo da foliação para solução de solo grampeado (Slide2)



Passo 6 (Solução de Solo Grampeado) – Mapa dos fatores de segurança encontrados, de acordo com a superfície gerada do menor valor (1,55) com incremento de 0,1 em 5 cores diferentes (Figura 77)

Figura 77 - Mapa de segurança para solução de solo grampeado (Slide2)



4.3 Resultados

De acordo com os desenvolvimentos nos softwares das análises de estabilidade do maciço e, após a verificação da necessidade de projeto estabilizante, solução de contenção em

solo grampeado, obtivemos os resultados dos fatores de segurança referentes às superfícies críticas. Ressaltando que esse fator é a resultante da relação entre os esforços resistentes e os esforços solicitantes. Segue a Tabela 7, que tem por finalidade a composição do quadro resumo dos resultados de FS obtidos.

Tabela 7 – Quadro resumo dos resultados obtidos

	Análise de Estabilidade	Solução de Solo Grampeado
Slope/W	1,04	1,58
Slide2	1,05	1,55

5. CONCLUSÃO

Com base nas modelagens, podemos ver a importância das atividades antecessoras às análises de estabilidade e ao projeto de estabilização para determinação dos parâmetros a serem implementados. Além de observarmos a influência da solução de solo grampeado nos resultados obtidos após sua implantação no projeto. Com relação à anisotropia, as análises expuseram os efeitos das suas propriedades mecânicas sobre o traçado e fator de segurança da superfície de ruptura. Entretanto, os efeitos dos deslocamentos não puderam ser determinados neste tipo de modelagem por equilíbrio limite.

As modelagens do maciço anisotrópico homogêneo do caso avaliado foram realizadas sem grandes problemas, ao passo que apenas foi requerido a seleção do tipo de resistência do solo e descrição da função anisotrópica referente a coesão e o ângulo de atrito. Fato que dispensa as formas manuais e de modelagem com criação das foliações com parâmetros diferentes para cada situação. Para estabelecer uma espessura entre as foliações no Slope/W, basta aumentar ou diminuir os incrementos no eixo “y” nos blocos de busca, o que aproxima ou distancia as superfícies analisadas, realizando um melhor detalhamento das mesmas. Essa propriedade não é possível no Slide2, ou seja, independente da espessura entre as foliações, a busca será a mesma, o que pode intervir no fator de segurança real de modo conservador, já que as espessuras consideradas são infinitesimais. Outra observação a ser realizada foi na angulação dentro do bloco, que não pode ser determinada como fixa à foliação nas buscas do Slide2, entretanto, como esperado a resultante da superfície crítica obtida esteve dentro da variação de 42° a 48°, correspondendo a direção da foliação.

Tanto para a análise de estabilidade quanto para a solução de estabilização, os resultados dos fatores de segurança críticos obtidos foram semelhantes nas comparações entre os *softwares*, com uma diferença nas casas centesimais (Análise de Estabilidade: 1,04 (Slope/W) e 1,05 (Slide2) / Solução de Solo Grampeado: 1,58 (Slope/W) e 1,55 (Slide2)). As metodologias de inserção dos parâmetros em ambos os *softwares* são muito simples e didáticas, entretanto um outro comentário está na facilidade de alocação dos grampos de forma automática no Slide2, diferentemente da forma manual do Slope/W. A busca pelo fator de segurança crítico ocorreu de forma automática e semelhante, realizada com base em 90 mil a 135 mil superfícies de ruptura e, em comparação, a velocidade de busca padrão do Slide2 se mostrou superior à do Slope/W, mas nada discrepante.

Portanto, ambos os *softwares* podem ser utilizados de forma a dinamizar as análises em maciços com anisotropia, além do estudo confirmar as suas simplicidades de utilização.

Sob critério do projetista os dois podem ser escolhidos. Ambos possuem pontos que podem ser vistos como vantajosos, além de, no caso do maciço anisotrópico homogêneo, como estudado, as análises realizadas levam a resultados semelhantes. Com isso, é válido analisar cada caso e determinar qual o melhor *software* a ser implementado.

Vale ressaltar que as conclusões apresentadas dizem respeito ao caso analisado, onde existia uma camada única de solo, homogênea. O caso com camadas diversas será analisado em outro trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16920-2: Solos Grampeados**. Rio de Janeiro. 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro. 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5629: Tirantes Ancorados No Terreno – Projeto e Execução**. Rio de Janeiro. 2018

CABRAL, B. P.. **Verificação Da Anisotropia Em Solos Do Subleito Da Região Metropolitana De Fortaleza Pertencentes À Formação Barreiras**. Orientador: Prof. Dr. Lucas Tadeu Barroso de Melo. 2005. 140 f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia de Transportes, UFC, Fortaleza, CE, Brasil.

CAMPOS, T. D. G.. **Análise Do Fator De Segurança De Um Muro De Solo Grampeado**. Orientador: Maurício Ehrlich. 2015. 72f. Tese de Graduação – Curso de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CARNEIRO, C. R. R.; GONÇALVES, P. W.; LOPES, O. R.. **O Ciclo Das Rochas Na Natureza**. Terrae Didatica, 2009. 5(1):50- 62. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica> , acesso em 15 de julho de 2021.

CARVALHO, T. R. R.. **Caracterização Mineralógica, Química, Física E Mecânica De Perfis De Intemperismo De Filito Sob Clima Tropical**. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. 2019. 129 f. Tese de Doutorado – Curso de Engenharia Civil, UFV, Viçosa, MG, Brasil.

CLOUTERRE. **Soil Nailing Recommendations**. 1991. Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussées (US Department of Transportation)

DILÁSCIO, M. V.. **Estudo Computacional Do Mecanismo De Tombamento Flexural Em Filitos**. Orientador: Rodrigo Peluci de Figueiredo. 2004. 130 f. Tese de Mestrado – Curso de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

DILÁSCIO, M. V.; FIGUEIREDO, R. P. **Estudo Computacional Do Mecanismo De Tombamento Flexural Em Filitos**. Revista Escola de Minas ISSN: 0370-4467. 2005. 7 f. Ouro Preto, MG, Brasil.

FEIJÓ, R. L.. **Monitoração De Uma Escavação Experimental Grampeada Em Solo Residual Gnáissico Não Saturado**. Orientador: Mauricio Ehrlich. 2007. 176 f. Tese de Doutorado – Curso de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. RJ, Brasil.

FEIJÓ, R. L.; ERHLICH, M.; CASTRO, J. T. P.. **Extensometria De Longo Prazo Em Uma Obra De Solo Grampeado**. 2002. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FERREIRA, J. L. F.. **Análise De Estabilidade De Taludes Pelos Métodos De Janbu E Spencer**. Orientador: Professor Doutor José Couto Marques. 2012. 144 f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

FLORIANO, C. F.. **Solo Grampeado: Comparação de Resultados de Análises Numéricas Com Dados De Monitoramento**. Orientador: Adriano Virgílio Damiani Bica. 2009. 101 f. Tese de Graduação – Curso de Engenharia Civil, UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil.

FREITAS, P. C.. **Estrutura De Contenção Em Solo Grampeado**. Orientador: Prof. Ribamar de Jesus Gomes. 2004. 37 f. Tese de Graduação – Curso de Geotecnia, USF, Itatiba, SP, Brasil.

GEOCIÊNCIAS USP. **Rochas metamórficas**. São Paulo, SP, Brasil, 2021. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/rochas/metamorficas/>. Acesso em: 12 de agosto de 2021.

GHOSTUDIO. **Stability Modeling With GeoStudio**. Calgary, AB, Canada. GEO-SLOPE International, Ltd, 2024-2021.

GEO-RIO, Prefeitura Do Rio De Janeiro. **Manual Técnico de Encostas**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.

GERSCOVICH, D. M .S. et. al.. **Estabilidade de Taludes**. 2ª Edição. Oficina de Texto, 2016, São Paulo, SP, Brasil.

GERSCOVICH, D. M .S. et. al.. **Técnicas De Modelagem Numérica De Escavações De Taludes Em Solo Grampeado**. IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – IV COBRAE. v.2. p.671 – 680. 2005. Salvador, BA, Brasil.

GODIM, A.. **Dimensionamento Geotécnico De Solo Grampeado**. Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia. 2018. 107 f. Tese de Graduação – Curso de Engenharia Civil, UFU, Uberlândia, MG, Brasil

HACHICH, W.; CAMARGO, V. E. L. B.. **Sobre A Contribuição Dos Grampos À Estabilidade De Estruturas De Solo Grampeado**. 2006. 7 f. USP, São Paulo, SP, Brasil.

HACHICH, W.; CAMARGO, V. E. L. B.. **Comparação De Processos De Dimensionamento De Estruturas Em Solo Grampeado**. 2003. 7 f. USP, São Paulo, SP, Brasil.

JORDAN *et. al.*. **Para Entender A Terra**. 4ª Edição. Brookman, 2008.

LEÃO, M. F.. **Comportamento Geomecânico De Frente De Intemperismo Em Filito Da Região Do Quadrilátero Ferrífero**. Orientadores: Eurípedes do Amaral Vargas Jr., Emílio Velloso Barroso e Eduardo Antônio Gomes Marques. 2017. 188 f. Tese de Doutorado – Curso de Geologia, IGeo/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LEÃO, M. F.. **Análise Tensão-Deformação De Uma Barragem De Concreto Em Solo Residual Preponderantemente Anisotrópico**. Orientador: Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco. 2015. 147 f. Tese de Mestrado – Curso de Geotecnia, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIMA, A. P.. **Comportamento De Uma Escavação Grampeada Em Solo Residual De Gnaisse**. Orientador: Prof. Alberto S. F. J. Sayão. 2007. 431 f. Tese de Doutorado – Curso de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIMA, A. P.; LIMA, S. P.. **Monitoramento Geotécnico E Verificação Do Desempenho, A Longo Prazo, De Uma Escavação Em Solo Residual, Estabilizada Com Tirantes E Grampos.** Revista Técnico-Científica do Crea-PR - ISSN 2358-5420 – Ed. Especial. 2018. 16f. São Paulo, SP, Brasil.

LIMA, J. M. F.. **Análise De Resistência Ao Cisalhamento De Interface Em Caldas De Cimento E Caldas Solo-Cimento Para Utilização Em Solos Grampeados.** Orientador: Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno. 2009. 110 f. Tese de Mestrado – Curso de Geotecnia, USP, São Paulo, SP, Brasil.

LOPES, M. C.. **Comportamento Geotécnico e Mecanismos De Ruptura Em Rochas Brandas Mina Córrego Do Sítio.** Orientador: Prof.^a Dr.^a Milene Sabino Lana. 2006. 125f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia Mineral, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

MIKOS, A. P. et. al.. **Estudo Das Manifestações Patológicas Em Solo Grampeado E Cortina Atirantada.** Revista Técnico-Científica do Crea-PR - ISSN 2358-5420. 2017. 13 f. Curitiba, PR, Brasil.

ORTIGÃO, J. A. R.; ZIRLIS, A. C.; PALMEIRA, E. M.. **Experiência com Solo Grampeado no Brasil – 1970-1993.** Solos e Rochas. 1993. 291-304 f. São Paulo, SP, Brasil.

PINHO, A. B.. **Caracterização Geotécnica De Maciços Rochosos De Baixa Resistência.** 2003. 283 f. Tese de Doutorado – Curso de Geologia, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

PINTO *et. al.*. **Inclinômetro Instrumentado Com Fibra Óptica Para Monitoramento De Encostas.** Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção 2015. 15f. Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PITTA, C. A.; SOUZA, G. J. T., ZIRLIS, A. C.. **Alguns Detalhes da Prática de Execução do Solo Grampeado:** Solotrat. Revista Fundações e Obras Geotécnicas, ano 4 n° 39. 2013. 27f. São Paulo, SP, Brasil.

QUEIROZ, R. C.. **Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil.** RiMa Editora, 2009. São Carlos, SP, Brasil.

RESITEC CONTENÇÕES. **Portifólio.** Teresópolis, RJ, Brasil, 2021. Disponível em: <https://resiteccontencoes.com.br/> . Acesso em: 26 de agosto de 2021.

ROCHA, M. **Mecânica das Rochas.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1981. Lisboa, Portugal.

ROCSCIENCE. **Slide2.** Canadá, 2021. Disponível em: <https://www.rocscience.com/software/slide2>. Acesso em: 24 de agosto de 2021.

SANDOVAL, M. A. P.. **Análise Determinística E Probabilística Da Estabilidade De Taludes.** Orientador: Prof. Celso Romanel. 2012. 140 f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, R. A.. **Comportamento Anisotrópico De Um Solo Laterítico Compactado.** Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogerio Esquivel. 2015. 26-48 f. Tese de Mestrado – Curso de Geotecnia, USP, São Paulo, SP, Brasil.

SILVA, C. H. C.. **Comportamento Geotécnico Dos Filitos No Talude Oeste Da Mina Pau Branco.** Orientadora: Prof.^a Dr.^a Milene Sabino Lana. 2010. 127f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

SILVA, R. C.. **Análise Do Comportamento De Estruturas De Solo Grampeado Através Da Monitoração De Obra E Modelos Físicos (Escala 1:1).** Orientador: Maurício Ehrlich. 2010. 367 f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOLOFORT. **Obras.** São Paulo, SP, Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.solofort.com.br/> . Acesso em: 26 de agosto de 2021.

SOUZA, T. F.. **Análise da Eficiência do Uso de Grampos Verticais em Estrutura de Solo Grampeado.** Orientador: Prof. D.Sc. Mário Vicente Riccio Filho. 2019. 178 f. Tese de Mestrado – Curso de Engenharia Civil, UFJF, Juíz de Fora, RJ, Brasil.

TEIXEIRA, I. J. R.. **Estudo Comparativo De Duas Alternativas Para Contenção De Taludes Verticais: Solo Grampeado E Cortina Atirantada.** Orientador: Prof. D.Sc. João Carlos Baptista Jorge da Silva. 2011. 123 f. Tese de Graduação – Curso de Engenharia Civil, UEFS, Feira de Santana, BA, Brasil.

TEIXEIRA, L. A.. **Avaliação Da Influência Da Anisotropia Na Rigidez De Solos Estabilizados Com Misturas Geopoliméricas.** Orientador: Professora Doutora Cristiana Maria da Fonseca Ferreira. 2015. 124 f. Tese de Mestrado – curso de Geotecnia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.