



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Patrícia Ferreira de Mello


Influência da face na estabilidade de taludes em solo grampeado

Rio de Janeiro

2018

Patrícia Ferreira de Mello

Influência da face na estabilidade de taludes em solo grampeado



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Ana Cristina Castro Fontenla Seira
Prof. Dr. Rogério Luiz Feijó

Rio de Janeiro
2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M527 Mello, Patrícia Ferreira de.
Influência da face na estabilidade de taludes em solo grampeado / Patrícia Ferreira de Mello. – 2018.
144f.

Orientadores: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira, Rogério Luiz Feijó.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade - Teses. 3. Engenharia geotécnica - Teses. 4. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 5. Deslizamentos (Geologia) - Teses. I. Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. II. Feijó, Rogério Luiz. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.131

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Patrícia Ferreira de Mello

Influência da face na estabilidade de taludes em solo grampeado

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 06 de setembro de 2018.


Banca Examinadora:



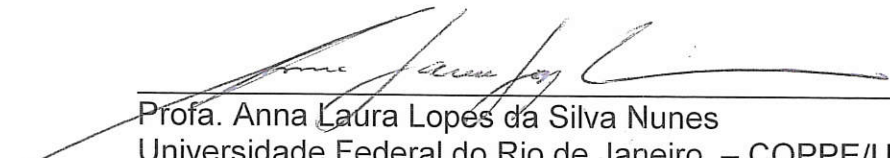
Prof.^a Ana Cristina Castro Fontenla Steira – Presidente / Orientadora
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Rogério Luiz Feijó
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Armando Prestes de Menezes Filho
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Anna Laura Lopes da Silva Nunes
Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

“Ohana quer dizer família.
Família quer dizer nunca abandonar ou esquecer.”

Lilo e Stitch

A Deus, por permitir mais essa vitória. Aos meus pais, Iza e Publio, que apesar de tudo, de todas as dificuldades e de todos os contratemplos, sempre me incentivaram e despertaram em mim o interesse pelos estudos. Ao meu irmão Publio Filho pelo apoio e ao meu namorado Thiago Akira pela paciência e carinho nestes anos e por estar ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para sempre seguir em frente superando e aprendendo com as dificuldades.

Agradeço a minha família por ter me ajudado e incentivado nessa jornada até aqui. Ao meu pai Publio por ter me apresentado a engenharia, ter me apoiado a seguir esta carreira e ter me ajudado a agregar conhecimento. A minha mãe Iza por ser uma mãe excepcional e acima de tudo ser minha amiga, confidente e companheira para todas as horas e por sempre estar do meu lado me ajudando a superar qualquer tipo de obstáculo e não medir esforços para me ver bem. Ao meu irmão Publio Filho por torcer por mim e pela minha felicidade. A minha cachorra Abigail, por sempre me receber com alegria e estar sempre do meu lado, por tentar me animar quando estou triste e pelo amor sincero e incondicional. As minhas gatas Mia e Kiara que com o jeitinho especial de cada uma me fazem feliz e me ajudam a relaxar.

Ao meu namorado Thiago Akira pela paciência, por estar ao meu lado em todos os momentos, por me incentivar e torcer pelas minhas conquistas.

Aos meus amigos de mestrado, em especial Filipe e Elisangela, que me ajudavam nos estudos e estavam sempre do meu lado. Agradeço também aos meus amigos que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho, me apoiaram e foram compreensivos quando eu tinha que ficar ausente para estudar.

Agradeço aos meus professores que foram os responsáveis pelo conhecimento que adquiri nessa caminhada. Aos meus orientadores Ana Cristina e Feijó pelos conhecimentos transmitidos, pela dedicação na orientação do trabalho, pelo incentivo, confiança e amizade.

À UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado este sonho de conquista.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A diferença entre ganhar e perder é muitas vezes não desistir.

Se você pode sonhar, você pode fazer.

Walt Disney

RESUMO

MELLO, Patrícia Ferreira de. *Influência de face do talude na estabilidade de obras geotécnicas em solo grampeado*. 2018. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Com o avanço dos conhecimentos na área da Geotecnia, técnicas que permitem a melhoria e o reforço do solo vêm sendo crescentemente utilizadas em obras de estabilização de taludes. O uso de sistemas computacionais em projetos de obras de reforço de solo por grampeamento vem se tornando cada vez mais presentes na Geotecnia. Neste trabalho, serão apresentados e discutidos os resultados de análises paramétricas em perfil de talude com solo grampeado. A análise será executada a partir do programa computacional PLAXIS, baseado no método dos elementos finitos, a fim de avaliar a influência da face de uma estrutura em solo grampeado na estabilidade do talude. A comparação deste modelo foi realizada entre os resultados fornecidos pelos programas PLAXIS e GeoSlope, e o cálculo pelo Método de Mitchell e Villet (1987), a fim de se obter maior confiabilidade nos resultados numéricos. As análises posteriores à comparação foram baseadas na variação de alguns parâmetros (inclinação dos grampos, espaçamento vertical dos grampos e espessura da camada de solo da face) que podem influenciar na magnitude dos deslocamentos horizontais máximos da estrutura e no fator de segurança. Os resultados sugerem que o PLAXIS é um *software* capaz de reproduzir o comportamento de estruturas em solo grampeado. Além disso, as análises também mostraram que a face do talude não tem função estrutural e que o seu revestimento se mostra importante para combater instabilidades locais e processos erosivos.

Palavras-chave: Estabilização de taludes; Solo Grampeado; Concreto projetado; Revestimento; Face do talude; Deslocamentos Horizontais; Fator de Segurança.

ABSTRACT

MELLO, Patrícia Ferreira de. *Influence of slope facing on stability of geotechnical building works in soil nailing*. 2018. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

With the advancement of knowledge in the area of geotechnics, the techniques that allow the improvement and reinforcement of the soil have been increasingly used in slope stabilization works. The use of computational systems in projects of soil nailing has been preparing more and more present in the geotechnics. This work was presented and discussed as a result of a series of parameters in a slope profile with soil nailing. The analysis was based on the PLAXIS computational program, based on the finite element method, with the objective of evaluating the influence of a structure in soil nailing on slope stability. The comparison of this model was performed through the software PLAXIS, GeoSlope and Mitchell and Villet (1987) method for validation of software, with the objective of obtaining greater reliability in the results. The post-calibration analyzes were based on the variation of some parameters (nail inclination, vertical nail spacing and face layer thickness) that may influence the magnitude of the maximum horizontal displacements of the structure and its safety factor. The analysis of the results allowed to confirm that the PLAXIS is a software capable of reproducing the behavior of structures in soil nailing. In addition, the analyzes also showed that the face of the slope has no structural function and that its coating proves important to combat local instabilities and erosive processes.

Keywords: Stabilization of slopes; Soil Nailing; Concrete designed; Facing; Slope facing; Horizontal Displacements; Security Factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de montagem de um grampo	21
Figura 2 - Aplicações mais comuns de solo grampeado: a) estabilização de taludes naturais; b) estabilização de taludes em corte devido ao processo de escavação	22
Figura 3 - Comparação esquemática entre os métodos convencional (a) e NATM (b) .	26
Figura 4 - Etapas construtivas de muros de solo grampeado (adaptado de Clouterre, 1991)	30
Figura 5 - Tipos de cabeças para grampos: (a) embutida na face por meio de dobra no aço; (b) fixada por placa metálica, rosca e porca; (c) feixe de barras embutido na face por dobra (Dias <i>et al.</i> , 2006); (d) sem cabeça (Ehrlich, 2003) e (e) com manta vegetal, tela, placa e porca (GEO-RIO, 2014)	31
Figura 6 - Processo de escavação em bermas de equilíbrio (Lazarte <i>et al</i> , 2003).....	32
Figura 7 - Fases construtivas da injeção do grampo: Perfuração, execução da bainha, introdução da barra de aço e tubos de injeção e injeção setorizada (Solotrat, 2018) ...	34
Figura 8 - Detalhe típico de projeto do DHP.....	37
Figura 9 - Detalhe típico de projeto do dreno barbacã	37
Figura 10 - Zonas ativa e passiva características de contenções em solo grampeado (Gerscovich <i>et al</i> , 2005)	40
Figura 11 - Mecanismos de ruptura em solos grampeados (Adaptado de Clouterre, 1991).....	40
Figura 12 - Tração no grampo (Ortigão et al, 1993).....	41
Figura 13 - Esquema para ensaios de arrancamento em diferentes camadas de solo (Clouterre, 1991)	43
Figura 14 - Sistema de aplicação de carga do ensaio de arrancamento. (Passini <i>et al</i> , 2012).....	44
Figura 15 - Curva deslocamento x força de um ensaio de arrancamento (Clouterre, 1991).....	44
Figura 16 - Analogia do grampo a uma estaca carregada horizontalmente no topo (Mitchell e Villet, 1987)	47

Figura 17 - Concreto projetado para a proteção de taludes (https://www.prolazer.com.br/concretoprojetado/obras_realizadas.html 21/04/17, 16:51)	50
Figura 18 - Efeito de sombra causado pela má distribuição do concreto projetado	50
Figura 19 - (a) Geomanta reforçada com malha de aço de dupla torção e (b) Efeito de enraizamento da vegetação na geomanta (Maccaferri, 2011)	51
Figura 20 - (a) Talude com a geomanta reforçada e (b) Talude com a geomanta reforçada após o crescimento da vegetação. (Maccaferri, 2011).....	52
Figura 21 - Exemplo de seção típica de muro de solo grampeado com face em blocos pré-moldados	53
Figura 22 - (a) Vista lateral e (b) Vista frontal do revestimento da face do talude por blocos Terraes	54
Figura 23 - Exemplos de aplicações de estudos de estabilidade (Gerscovivh, 2016)...	55
Figura 24 - Geometria do escorregamento (Gerscovich, 2009)	59
Figura 25 - Ciclo hidrológico (Teixeira, 2000).....	62
Figura 26 - Modelagem da curva experimental do ensaio de arrancamento pela lei de Frank e Zhao (1982). (Clouterre, 1991).....	69
Figura 27 - Correlações empíricas para a resistência ao arrancamento do grampo q_s devido a interação solo x grampo (Ortigão <i>et al</i> , 1997 apud Springer, 2001)	70
Figura 28 - Correlação entre q_s e o número de golpes N_{SPT} para solo residual de gnaisse (Springer, 2006).....	70
Figura 29 - Correlação entre q_s e p_1 para: (a) solos arenosos e (b) solos argilosos (Adaptado de Clouterre, 1991 por Lima, 2007)	71
Figura 30 - Resultados de ensaios de arrancamento no Brasil (GEO-RIO, 2014)	72
Figura 31 - Ruptura do solo grampeado experimental número 1 em 1986 (Clouterre, 1991).....	74
Figura 32 - Efeito da tensão no grampo (GEO-RIO, 2014)	78
Figura 33 - Método de Davis proposto por Shen <i>et al</i> (1981) adaptado por Feijó (2007)	81
Figura 34 - Diagrama de corpo livre quando a superfície de ruptura se estende além da massa de solo reforçado (Shen <i>et al</i> , 1981 adaptado por Feijó, 2007)	81

Figura 35 - Método de Juran, 1990 (Clouterre, 1991)	83
Figura 36 - Análise da estabilidade local do solo atrás da face (Mitchell e Villet, 1987 adaptado por GEO-RIO, 2014)	84
Figura 37 - Tensão na cabeça do grampo (Clouterre, 1991)	85
Figura 38 - Distribuição de tensões típicas na face de solo grampeado (Byrne, 1998). 86	
Figura 39 - Diagrama tensão-deformação de materiais elastoplástico.....	89
Figura 40 - Ilustração da modelagem numérica no programa PLAXIS	92
Figura 41 - Perfil de solo utilizado nas análises	93
Figura 42 - Tensões iniciais a serem calculadas no PLAXIS	95
Figura 43 - Propriedades do solo com k_0 preenchido com <i>default</i>	95
Figura 44 - Novos valores de k_0 encontrados no cálculo das tensões iniciais	95
Figura 45 - Configuração das etapas de cálculo das tensões do modelo	96
Figura 46 - Perfil do solo grampeado utilizado na etapa de comparação do modelo	98
Figura 47 - Parâmetros do grampo utilizados no GeoSlope.....	98
Figura 48 - Parâmetros do grampo no programa PLAXIS.....	98
Figura 49 - (a) Geometria do talude com solo grampeado do exemplo da comparação e (b) Resultado da análise de estabilidade do exemplo da comparação pelo programa GeoSlope (F.S.=1,559)	99
Figura 50 - (a) Geometria do talude com solo grampeado do exemplo de comparação e (b) Resultado da análise de estabilidade do exemplo de comparação com o programa PLAXIS (F.S. = 1,561).....	100
Figura 51 - Influência da inclinação dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado	102
Figura 52 - Influência da inclinação dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado	102
Figura 53 - Influência da inclinação dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado	104
Figura 54 - Influência da inclinação dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado	105
Figura 55- Influência da inclinação dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado	106

Figura 56 - Influência da inclinação dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado	106
Figura 57 - Influência do espaçamento vertical dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 5°	108
Figura 58 - Influência do espaçamento vertical dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 5°	109
Figura 59 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos F.S. da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 15°	109
Figura 60 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 15°	110
Figura 61 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 30°	112
Figura 62 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 30°	112
Figura 63 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v= 1,0\text{m}$ ($c'= 15\text{ kPa}$)	113
Figura 64 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v= 1,0\text{ m}$ ($c'= 30\text{ kPa}$)	114
Figura 65 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v= 2,0\text{m}$ ($c'= 15\text{ kPa}$)	114
Figura 66 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v= 2,0\text{ m}$ ($c'= 30\text{ kPa}$)	115
Figura 67 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v= 3,0\text{ m}$ ($c'= 15\text{ kPa}$)	115
Figura 68 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v= 3,0\text{ m}$ ($c'= 30\text{ kPa}$)	116
Figura 69 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a $1,0\text{ m}$ ($c'= 15\text{ kPa}$)	117

Figura 70 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 1,0 m ($c' = 30$ kPa)	117
Figura 71 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 2,0 m ($c' = 15$ kPa)	118
Figura 72 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 2,0 m ($c' = 30$ kPa)	119
Figura 73 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 3,0 m ($c' = 15$ kPa)	119
Figura 74 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 3,0 m ($c' = 30$ kPa)	120
Figura 75 - Resultado das análises de estabilidade para o espaçamento vertical igual a 1,0 m e $c' = 15$ kPa do solo mais resistente para as seguintes condições: (a) inclinação do grampo igual a 5° e solo da face com 1,0 m; (b) inclinação do grampo igual a 15° e solo da face com 1,0 m; (c) inclinação do grampo igual a 30° e face com 1,0 m; (d) inclinação do grampo igual a 5° e face com 2,0 m; (e) inclinação do grampo igual a 15° e face com 2,0 m e (f) inclinação do grampo com 30° e face com 2,0 m	121
Figura 76 - Resultado das análises de estabilidade para o espaçamento vertical igual a 2,0 m e $c' = 15$ kPa do solo mais resistente para as seguintes condições: (a) inclinação do grampo igual a 5° e solo da face com 1,0 m; (b) inclinação do grampo igual a 15° e solo da face com 1,0 m; (c) inclinação do grampo igual a 30° e face com 1,0 m; (d) inclinação do grampo igual a 5° e face com 2,0 m; (e) inclinação do grampo igual a 15° e face com 2,0 m e (f) inclinação do grampo com 30° e face com 2,0 m	122
Figura 77 - Resultado das análises de estabilidade para o espaçamento vertical igual a 3,0 m e $c' = 15$ kPa do solo mais resistente para as seguintes condições: (a) inclinação do grampo igual a 5° e solo da face com 1,0 m; (b) inclinação do grampo igual a 15° e solo da face com 1,0 m; (c) inclinação do grampo igual a 30° e face com 1,0 m; (d)	

inclinação do grampo igual a 5° e face com 2,0 m; (e) inclinação do grampo igual a 15° e face com 2,0 m e (f) inclinação do grampo com 30° e face com 2,0 m	122
Figura 78 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 5°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa	123
Figura 79 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 15°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa	123
Figura 80 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 30°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa	124
Figura 81 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 5°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa	124
Figura 82 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 15°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa	125
Figura 83 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 30°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa	125
Figura 84 - Parâmetros inseridos no PLAXIS do revestimento da face do talude	128
Figura 85 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 5°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)	128
Figura 86 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 15°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)	129
Figura 87 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 30°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)	129
Figura 88 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 5°, espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)	130
Figura 89 - $S_v = 3,0$ m, inclinação = 15°, espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)	130
Figura 90 - $S_v = 3,0$ m, inclinação = 30°, espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)	131
Figura 91 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado (considerando uma membrana de revestimento na face do talude na condição que apresenta $c' = 30$ kPa)	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas especificações de Projeto para grampos injetados (Ortigão, 1997)	35
Tabela 2 - Número de ensaios de arrancamento em função da área (Clouterre, 1991)	42
Tabela 3 - Valores da resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo (adaptado de Byrne, 1998).....	46
Tabela 4 - Classificação dos movimentos de encosta mais comuns do Rio de Janeiro (GEO-RIO, 2014)	57
Tabela 5 - Fatores deflagradores dos movimentos de massa (adaptada de Varnes, 1978).....	59
Tabela 6 - Causas e agentes relacionados aos movimentos de massa típicos do Rio de Janeiro (GEO-RIO, 2014).....	60
Tabela 7 - Classificação da velocidade de deslocamento (GEO-RIO, 2014)	62
Tabela 8 - Estado de atividade do escorregamento (GEO-RIO, 2014)	63
Tabela 9 - Classificação quanto à profundidade dos movimentos de massa (Gerscovich, 2009).....	63
Tabela 10 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos (NBR 11682/2009) ...	65
Tabela 11 - Valores preliminares de q_s para (a) solos não coesivos (granulares) e (b) solos coesivos (Byrne, 1996)	71
Tabela 12 - Resumo de correlações empíricas disponíveis na literatura para a determinação do parâmetro q_s	73
Tabela 13 – Sugestão de Fatores de Segurança de acordo com o tipo de material (Baêta e Sartor, 1999).....	77
Tabela 14 - Multicritério: hipóteses (Schlosser, 1983 apud Ortigão et al 1993)	79
Tabela 15 - Valores típicos do fator de redução de resistência Rinter (More, 2003).....	91
Tabela 16 - Parâmetros geotécnicos do solo adotados neste trabalho.....	93
Tabela 17 - Parâmetros do grampo.....	94
Tabela 18 - F.S. de cada método/programa utilizado na comparação	100

Tabela 19 - Resultados obtidos na modelagem para o espaçamento vertical de 1,0m e diferentes inclinações dos grampos	101
Tabela 20 - Resultados obtidos na modelagem para o espaçamento vertical de 2,0m e diferentes inclinações dos grampos	104
Tabela 21 - Resultados obtidos na modelagem para o espaçamento vertical de 3,0m e diferentes inclinações dos grampos	105
Tabela 22 - Resultados obtidos na modelagem para a inclinação de 5° e diferentes espaçamentos verticais entre os grampos	107
Tabela 23 - Resultados obtidos na modelagem para a inclinação de 15° e diferentes espaçamentos verticais entre os grampos	108
Tabela 24 - Resultados obtidos na modelagem para a inclinação de 30° e diferentes espaçamentos verticais entre os grampos	111
Tabela 25 - Parâmetros da proteção superficial da face do talude com concreto projetado	127
Tabela 26 - Comparação do F.S. do PLAXIS e GeoSlope antes e após a consideração do revestimento na face do talude	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DHP	Dreno Sub-Horizontal Profundo
FS	Fator de Segurança
MEF	Método dos Elementos Finitos
NATM	<i>New Austrian Tunnelling Method</i>
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s	Área da seção transversal
c	Coesão
D	Diâmetro
\emptyset_{furo}	Diâmetro do furo
e	Espessura
E	Módulo de Elasticidade
EA	Rigidez Axial
EI	Rigidez a Flexão
φ	Ângulo de atrito
f_{yk}	Tensão de escoamento característica do aço
γ	Peso específico
γ_c	Coeficiente de ponderação das resistências no estado limite último
γ_d	Peso específico seco
γ_{sat}	Peso específico saturado
I	Momento de Inércia
k_β	Inclinação inicial da curva carga de tração x deslocamento
k_x	permeabilidade horizontal
k_y	permeabilidade vertical
k_s	Coeficiente de reação horizontal
l_o	Comprimento de transferência de esforços do grampo
L_a	Comprimento ancorado do grampo
L_b	Comprimento do bulbo (zona passiva do grampo)
L_e	Comprimento da parcela do grampo embutida na zona resistente
L_s	Comprimento da interface solo-calda de cimento
q	Empuxo local
q_s	Atrito unitário na interface solo-grampo
σ_{adm}	Tensão admissível do grampo

σ_{rup}	Tensão de ruptura do grampo
R_{inter}	Fator de redução de resistência nas interfaces
S_h	Espaçamento horizontal
S_v	Espaçamento vertical
T_o	Força normal
T_i	Força de tração no grampo "i"
$T_{m\acute{a}x}$	Força máxima
T_n	Carga axial de tração cortante no grampo
T_p	Forças de arrancamento do grampo
T_r	Força de ruptura do aço
τ_f	Resistência ao cisalhamento
τ_{mob}	Tensões cisalhantes mobilizadas
ν	Coefficiente de Poisson
y	Deslocamento
ψ	Ângulo de dilatação

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	22
OBJETIVOS.....	23
ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
1.1 HISTÓRIA DO SOLO GRAMPEADO.....	25
1.1.1 DESCRIÇÃO DO SOLO GRAMPEADO	28
1.2 METODOLOGIA EXECUTIVA	30
1.2.1. ESCAVAÇÃO	32
1.2.2. PERFURAÇÃO	33
1.2.3. INJEÇÃO DOS GRAMPOS.....	33
1.2.4. DRENAGEM	35
1.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO GRAMPEADO	38
1.3.1. INTERAÇÃO SOLO-GRAMPO	38
1.3.2. TIPOS DE RUPTURA	39
1.4 ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	41
1.4.1. RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO (q_s).....	43
1.4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	46
1.4.3. RESISTÊNCIA AOS ESFORÇOS CISALHANTES E FLETORES....	46
1.5 TIPOS DE REVESTIMENTOS DA FACE DO TALUDE	48
1.5.1. CONCRETO PROJETADO.....	49
1.5.2. REVESTIMENTO VEGETAL	51
1.5.3. BLOCOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO.....	52
2. ESTABILIDADE DE TALUDES	55
2.1 MOVIMENTO DE MASSA.....	56
2.2 CAUSAS DO ESCORREGAMENTO	58
2.2.1. INFLUÊNCIA DA ÁGUA.....	61
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS.....	62

2.3.	MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	63
2.3.2.	EQUILÍBRIO LIMITE	65
2.3.3.	ANÁLISE DE TENSÕES – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	66
3.	DIMENSIONAMENTO INTERNO DO SOLO GRAMPEADO	68
3.1	ATRITO UNITÁRIO SOLO X GRAMPO (q_s)	68
3.2.	REGIME ELÁSTICO NOS GRAMPOS	73
3.3.	ESFORÇOS NOS GRAMPOS	75
3.4.	MÉTODOS DE ESTABILIDADE DE SOLO GRAMPEADO.....	79
3.4.1.	MÉTODO DE DAVIS.....	80
3.4.2.	MÉTODO FRANCÊS	82
3.4.3.	MÉTODO ALEMÃO.....	82
3.4.4.	MÉTODO DE JURAN.....	83
3.5.	RESISTÊNCIA DA FACE	84
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISES NUMÉRICAS.....	87
4.1.	INTRODUÇÃO	87
4.2.	PROGRAMA PLAXIS.....	88
4.2.1.	GEOMETRIA DO MODELO DE CÁLCULO	91
4.2.2.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS.....	92
4.3.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	96
4.3.1.	COMPARAÇÃO DOS MODELOS.....	97
4.3.2.	INFLUENCIA DA INCLINAÇÃO DOS GRAMPOS	101
4.3.3.	INFLUENCIA DO ESPAÇAMENTO VERTICAL DOS GRAMPOS..	107
4.3.4.	INFLUENCIA DA ESPESSURA DA CAMADA DE SOLO MENOS RESISTENTE NA FACE DO TALDE	113
4.3.5.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM.....	120
5.	CONCLUSÕES	133
	REFERÊNCIAS	135
	ANEXO	138

INTRODUÇÃO

Com o avanço dos conhecimentos teóricos da Geotecnia, técnicas que permitem a melhoria e o reforço do solo têm sido crescentemente utilizadas, a fim de introduzir determinados elementos resistentes que tornam possível que o maciço suporte solicitações às quais por si só não está habilitado a resistir.

Dentre os tipos de reforços existentes, o presente trabalho visa à análise em solo grampeado, que é uma técnica que consiste na inclusão de elementos de reforço, denominados grampos (barras de aço envolvidas com calda de cimento), na massa de solo. É uma técnica bastante eficaz no que diz respeito ao reforço, temporário ou permanente, de taludes naturais ou resultantes de processo de escavação. A Figura 1 ilustra o esquema de montagem de um grampo.

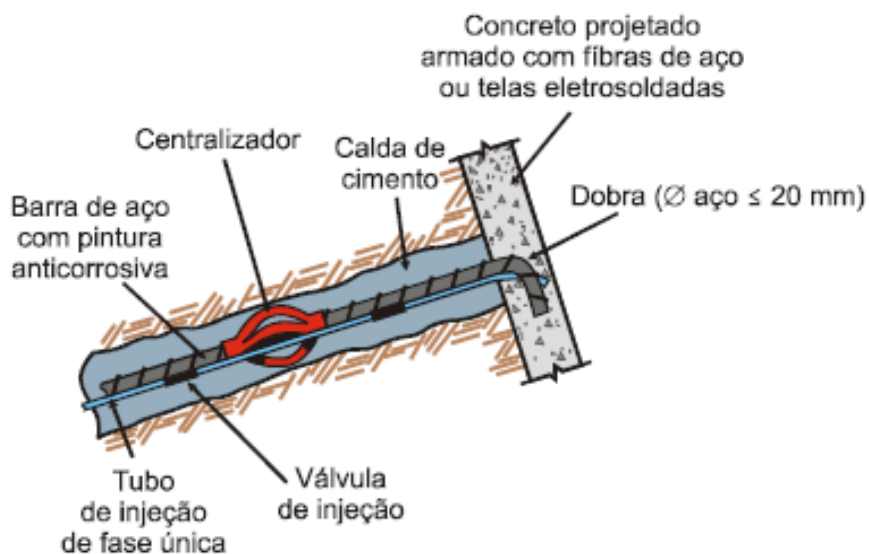


Figura 1 - Esquema de montagem de um grampo

Os grampos são posicionados horizontalmente ou inclinados no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento, e são conjugados a um revestimento superficial que pode variar desde concreto projetado e tela de aço até simplesmente uma proteção vegetal. Sua função é minorar os deslocamentos do

maciço terroso pelo acréscimo de forças internas contrárias ao sistema natural de acomodação de massa.

A utilização desta técnica de reforço do solo grampeado para a estabilização de taludes naturais e escavações, foi impulsionada na França, Alemanha e EUA e em 1979 passou a ser tema de congressos internacionais e, com isso, estimulou seu crescimento a nível mundial. Esta solução apresenta cada vez mais aceitação no âmbito da engenharia geotécnica, principalmente pela sua versatilidade em se adaptar a geometrias variadas, baixo custo e alta velocidade de execução. A Figura 2 apresenta as aplicações mais comuns de solo grampeado.

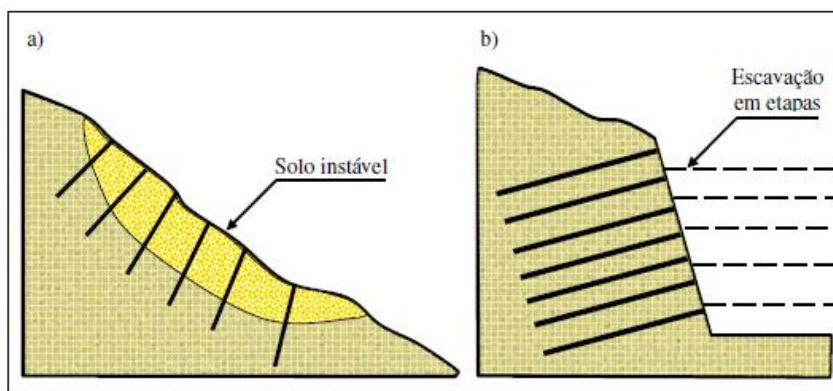


Figura 2 - Aplicações mais comuns de solo grampeado: a) estabilização de taludes naturais; b) estabilização de taludes em corte devido ao processo de escavação

MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A técnica do solo reforçado tem como principal objetivo a redução e a estabilização das deformações do solo ao longo de um plano de escorregamento bem definido, a partir da introdução de elementos de reforços (grampos) que aumentam a resistência ao cisalhamento do maciço.

O método de execução dessa técnica é chamado de *Top-Down* (de cima para baixo), pois a execução é dada através de escavações em etapas. À medida que cada camada de solo vai sendo escavada, faz-se a inserção dos elementos resistentes e assim, o talude reforçado vai tomando forma. A face recebe um revestimento superficial

que pode variar desde concreto projetado e tela de aço até simplesmente uma proteção vegetal para que problemas, como processos erosivos causados pela chuva e rupturas localizadas, possam ser evitados. Tal revestimento não possui função estrutural, por absorver apenas pequenos carregamentos, mas é responsável pela estabilização da face.

No atual cenário de crescimento da engenharia geotécnica, procuram-se realizar projetos que atendam às necessidades de cada local e proporcionem menores custos. Acompanhando tal desenvolvimento, novos tipos de reforços foram sendo criados e, conseqüentemente, o aprimoramento das técnicas. Pesquisadores vêm buscando métodos mais eficientes que consigam atender e solucionar o problema de estabilidade, com rapidez, custos menores e garantia da qualidade da técnica. Por isso, a técnica em solo grampeado vem sendo cada vez mais utilizada em obras de estabilização de taludes.

Mediante ao que já foi apresentado, a motivação deste trabalho é avaliar a influência da face de um talude grampeado na estabilidade do mesmo, de forma a verificar se a face apresenta função estrutural, ou apenas de proteção do talude. Neste último caso, não se faz necessário o uso de materiais de elevados custos para o revestimento, uma vez que não existem problemas de estabilidade.

OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é compreender como a face age na estabilidade de taludes de uma estrutura grampeada e avaliar a sua influência neste tipo de obra geotécnica.

O uso de sistemas computacionais em projetos de engenharia vem se tornando cada vez mais presente. Para analisar a atuação da face, serão executadas análises numéricas com o programa PLAXIS, buscando-se a comparação de resultados para diferentes condições de contorno, tipos de solos, espaçamentos verticais e inclinações dos grampos.

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é feita uma introdução geral do assunto, apresentando a história do solo grampeado, processo executivo e alguns aspectos técnicos.

No Capítulo 2 é explicada a estabilidade de taludes, os movimentos de massa e as causas dos escorregamentos.

O Capítulo 3 explica o dimensionamento do solo grampeado, apresenta alguns parâmetros necessários de projeto e cita alguns métodos presentes na literatura.

O Capítulo 4 apresenta a validação do programa, a partir da comparação do modelo, e discute a influência de fatores como: espessura da camada de solo da face, inclinação dos grampos e espaçamento vertical entre os grampos.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente trabalho.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre a técnica de solo grampeado, abordando informações clássicas e históricas disponíveis na literatura, além de resumos de trabalhos realizados ao longo dos anos sobre esta forma de contenção de taludes. Além disso, ilustra o desenvolvimento e a realização de temas para projetos baseados na execução de solo grampeado e retrata as premissas básicas mais utilizadas neste tipo de obra geotécnica.

1.1 HISTÓRIA DO SOLO GRAMPEADO

A técnica de solo grampeado, originalmente chamada de “*Soil Nailing*”, vem sendo empregada em vários países. Sua origem provém, como descrito em Mitchell e Villet (1987), em parte, das técnicas desenvolvidas na década de 50 por engenheiros de minas na Europa, para estabilização das paredes remanescentes de escavações em rocha.

A origem da técnica aplicada na engenharia de minas vem a partir da execução de suportes de galerias e túneis denominada NATM (“*New Austrian Tunneling Method*”). O engenheiro austríaco Landislau Von Rabcewicz foi quem desenvolveu e introduziu este método, no início dos anos 60, para avanço de escavações em túneis rochosos. A técnica preconizava a introdução de barras de aço envolvidas com calda de cimento, no perímetro da circunferência de túneis (seções transversais ao eixo longitudinal do túnel), em furos pré-executados, imediatamente após o avanço do processo de escavação. As paredes do túnel eram então revestidas por uma esbelta camada de concreto projetado.

A ideia consistia em se introduzir barras de aço no maciço rochoso de modo a reduzir as possibilidades de deslocamento de pequenas lascas e a abertura de descontinuidades pré-existentes. Dessa forma, fixadas as lascas e evitada a propagação das descontinuidades, o maciço se comportava como um bloco de rocha único, minimizando a possibilidade de acidentes.

Após a execução da técnica em rochas, novos experimentos foram realizados em locais com menores resistência, como rochas alteradas e posteriormente em solos. Desde então, esta técnica antes chamada de NATM (“*New Austrian Tunnelling Method*”) passou a ser chamada de solo pregado ou solo grampeado (“*Soil Nailing*”).

O princípio de funcionamento do NATM pode ser resumido como sendo o método que conduz a uma estabilização pelo alívio controlado de tensões. Este alívio é alcançado a partir da possibilidade de deslocamentos controlados da massa de solo/rocha e a conseqüente mobilização da resistência interna do material, formando uma zona plastificada e reforçada pela interação solo (rocha) x grampo.

Esta técnica permitiu uma considerável redução da espessura do revestimento final de sustentação das galerias, haja vista a técnica até então utilizada ter uma natureza rígida e, por isso, solicitar a estrutura com esforços muito maiores e requerer revestimentos muito mais espessos. A comparação entre os métodos tradicional e o NATM está ilustrada na Figura 3 (Ortigão e Sayão, 2000).

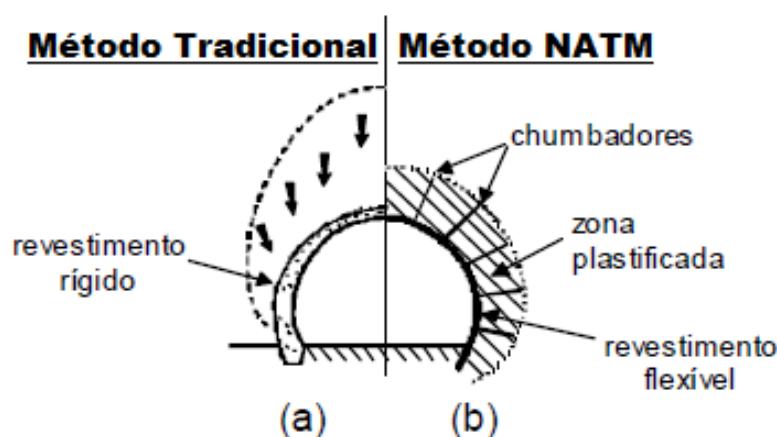


Figura 3 - Comparação esquemática entre os métodos convencional (a) e NATM (b)

O método NATM (Figura 3b) consiste na aplicação de um suporte flexível para permitir que o terreno se deforme, ocorrendo a formação de uma região plastificada no entorno da escavação, que pode ser reforçada através de chumbadores. Logo após a escavação, a cavidade que está submetida ao efeito do peso de terras e tensões confinantes, é estabilizada com um revestimento flexível de concreto projetado

(espessura entre 10 e 30 cm), tela metálica, cambotas e chumbadores curtos radiais introduzidos na zona plástica. Em geral, os chumbadores são dispostos a cada 3 a 6 m ao longo da galeria (Clouterre, 1991) e são inseridos no maciço por percussão ou perfuração com posterior injeção de nata de cimento. Ao contrário, no método convencional de execução de túneis (Figura 3a), os deslocamentos do terreno são impedidos por um revestimento rígido que, por sua vez, mobiliza no maciço, esforços muito maiores, sendo, portanto, uma solução mais onerosa. Pode-se afirmar, então, que uma escavação de solo grampeado está para a execução de túneis com revestimento flexível da mesma forma que a solução convencional de túneis se compara a uma cortina ancorada (Ortigão e Sayão, 2000).

A técnica de solo grampeado passou a se desenvolver então a partir do início dos anos 70. Países como França, Alemanha e Estados Unidos lideraram pesquisas no sentido de se obter conhecimentos deste método de estabilização.

A execução da primeira obra em Solo Grampeado foi na França em 1972 pelas empresas *Bouygues* e *Soletanche*, visando a estabilização de um talude ferroviário, em Versailles. A França foi o primeiro país a investir em Solo Grampeado em caráter nacional.

A primeira experiência com uma estrutura em solo grampeado em verdadeira grandeza foi realizada na Alemanha em 1975. Conduzido por Stocker, Gudehus e Gassler, foi realizado um programa de quatro anos para estudar oito modelos em escala real de Solo Grampeado. A estrutura foi construída e levada à ruptura através da aplicação de uma sobrecarga no topo. No ano de 1981, foram publicadas análises de desempenho desse talude (Lima, 2002).

Nos Estados Unidos, Shen (1981), sugere a existência do solo grampeado desde a década de 60, porém a primeira aplicação registrada é de 1976, em uma escavação para as fundações do *Good Samaritan Hospital*, em Oregon. O desenvolvimento da técnica foi acelerado por um extenso programa de pesquisa executado pela Universidade da Califórnia. Shen et al. (1981) citam uma série de obras

de contenção em solo grampeado executadas no Canadá com escavações da ordem de 18 m antes de 1976.

Em 1979 aconteceu o primeiro simpósio sobre solo grampeado. Este simpósio permitiu uma valiosa troca de experiências entre os engenheiros dos diversos países, pois, até então, a técnica havia se consolidado de forma isolada, principalmente na França, na Alemanha Ocidental e nos Estados Unidos.

Em 1986 teve início um grande projeto de pesquisa francês sobre solos grampeados, o Projeto Clouterre, com a participação da iniciativa privada e do governo francês. O objetivo deste programa era promover o uso do solo grampeado através de recomendações, incrementando o conhecimento do comportamento e para o desenvolvimento de projetos com este tipo de estrutura. O projeto abrangeu estudos experimentais com modelos além da análise de dados dos ensaios realizados pelas empresas participantes e resultou na produção de um volume com diversas recomendações em 1991.

Após estas experiências pioneiras, o solo grampeado vem sendo utilizado com bastante sucesso em diversos países. No Brasil, as obras em solo grampeado tomaram impulso apenas a partir da década de 80, existindo evidências de sua utilização desde a década de 70. Pitta *et al.* (2003) citam que foram executadas obras de solo grampeado de 1983 a 2003, dos quais cerca de 60% entre 1996 e 2003, demonstrando a rápida expansão na utilização desta técnica no Brasil.

Os primeiros resultados de estudos em solo grampeado no Brasil tiveram início com a realização de um projeto executado pela FUNDAÇÃO GEO-RIO em 1992. Pretendia-se conhecer o comportamento mecânico e a natureza dos esforços induzidos nos grampos em um talude natural em solo residual não saturado, tipicamente tropical.

1.1. DESCRIÇÃO DO SOLO GRAMPEADO

O solo grampeado é um método de reforço *in situ* utilizado para a estabilização de taludes naturais ou escavados. É constituído a partir da introdução de elementos passivos nos solos e revestidos por uma camada que garanta a proteção da face do

talude, seja concreto projetado, telas metálicas de alta resistência ou, até mesmo, somente a proteção vegetal. Esses elementos passivos, comumente chamados de grampos, podem ser barras ou tubos de aço e/ou barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular. São posicionados horizontalmente, ou inclinados no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (Ortigão, 1996).

Com a utilização desta solução de estabilização, a ideia é restringir os deslocamentos e transferir os esforços de uma zona potencialmente instável para uma zona resistente. Os grampos não são protendidos e a mobilização dos esforços se dá a partir das movimentações da massa de solo.

As barras deverão resistir basicamente aos esforços de tração, cisalhamento e momentos fletores, que revestidas por calda de cimento ao longo de todo o seu comprimento, são introduzidas no terreno através da execução de um pré-furo realizado por uma perfuratriz.

A distribuição dos grampos (densidade de grampos) na face da massa a ser estabilizada depende, principalmente, da geometria do talude, das propriedades mecânicas do solo e das propriedades mecânicas dos próprios grampos.

Este tipo de obra é comumente aplicado para a estabilização de taludes instáveis ou rompidos, emboques de túneis, escavação de subsolos, inclusive em centros urbanos, dentre outros. Mas também é importante frisar que o processo pode impor deformações importantes e, por isso, sua utilização não é aconselhável em alguns casos específicos.

A técnica de solo grampeado possui algumas aplicações mais comuns:

- Estabilização de taludes naturais: inclusão de reforços em taludes naturais possivelmente instáveis;
- Contenção de escavações temporárias ou permanentes associadas a construções de fundação de edifícios, escavações para vias subterrâneas (metrô ou estacionamentos, mergulhões), cortes para implantação de sistemas viários e escavações para portais de túneis;

- Recuperação de estruturas de contenção, tais como: cortinas de terra armada (substituição das tiras ou conexões danificadas por sobrecargas), muros de concreto armado e cortinas atirantadas.

1.2. METODOLOGIA EXECUTIVA

O método de execução dessa técnica, como mencionado anteriormente, é chamado de “*Top-Down*”, sendo realizado em etapas sucessivas de cima para baixo. À medida que cada camada de solo vai sendo escavada, procede-se à perfuração e introdução dos grampos na massa de solo e, por fim, a execução da face, comumente em concreto projetado (Figura 4).

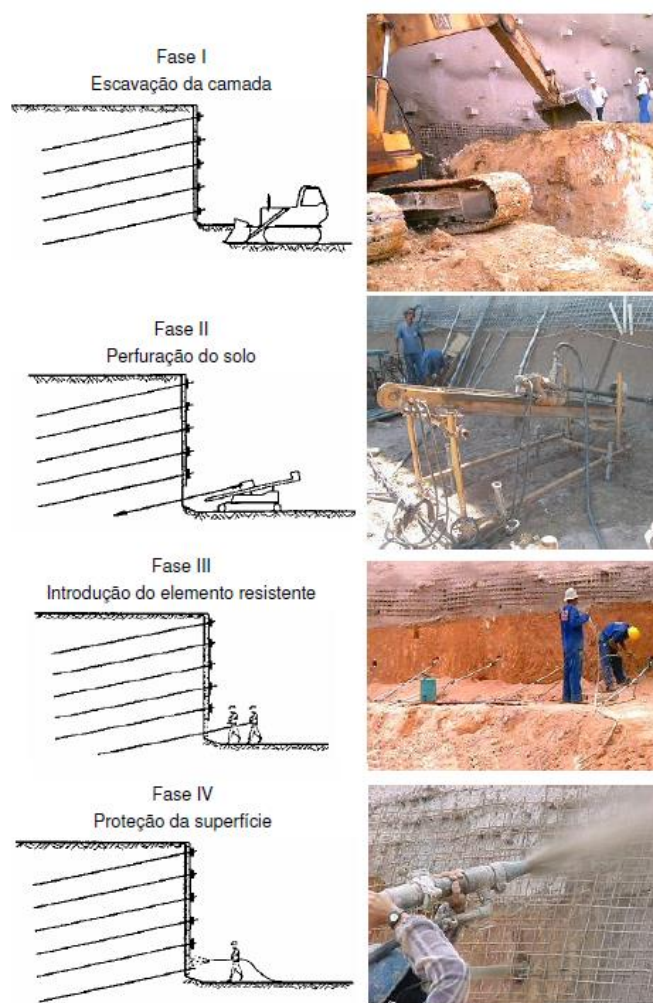


Figura 4 - Etapas construtivas de muros de solo grampeado (adaptado de Clouterre, 1991)

Os tipos de ligação grampo-face podem ser detalhados de formas diferentes nas cabeças dos grampos, de acordo com o tipo de fixação ao revestimento (Figura 5). Em geral, quando as cabeças dos grampos apresentam fixação por placa e porca é possível aplicar uma pequena carga de incorporação da ordem de 5 kN.

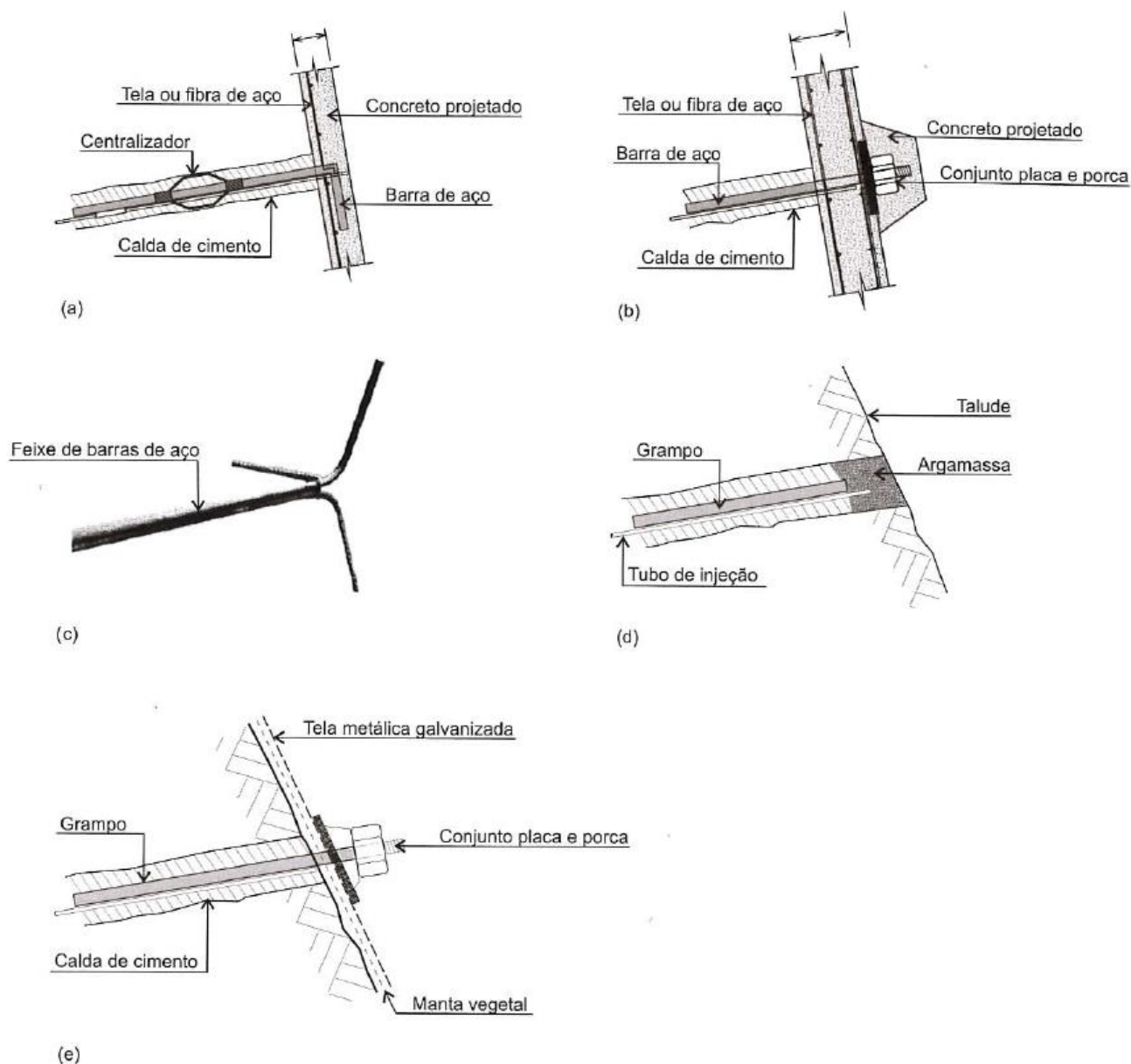


Figura 5 - Tipos de cabeças para grampos: (a) embutida na face por meio de dobra no aço; (b) fixada por placa metálica, rosca e porca; (c) feixe de barras embutido na face por dobra (Dias *et al.*, 2006); (d) sem cabeça (Ehrlich, 2003) e (e) com manta vegetal, tela, placa e porca (GEO-RIO, 2014)

1.2.1. ESCAVAÇÃO

A primeira etapa na sequência executiva dos solos grampeados é a escavação, que é realizada em estágios, comumente com profundidades variando de 1 a 2 m. As escavações geralmente são realizadas em bermas de equilíbrio (Figura 6), a fim de se dar mais segurança ao procedimento.

O material a ser escavado deve apresentar uma resistência ao cisalhamento não drenada mínima de 10 kPa, do contrário não se poderá executar esta escavação. Uma resistência como esta, entretanto, é possível obter na maioria dos solos argilosos e arenosos, mesmo em areias puras úmidas, devido ao efeito de capilaridade. Somente em areias secas e sem nenhuma cimentação entre grãos, ou em solos argilosos muito moles, este processo dificilmente terá sucesso (Ortigão et al, 1993).

O solo deverá permanecer estável durante as sucessivas etapas de escavação, por isso, realiza-se o monitoramento. Caso o solo apresente deformações no período de execução, indicando uma possível desestabilização, a proteção da face escavada deverá ser executada o quanto antes. É recomendado realizar o pré jateamento com concreto para proteção provisória contra erosão ou deslocamento do solo.

Onde possível, é recomendado executar a inclinação da face do talude. Lima (2000) *apud* Lima (2007) recomenda uma inclinação de 5° a 10° do paramento, em relação à vertical, para obter-se um ganho na estabilidade geral do conjunto na fase construtiva.

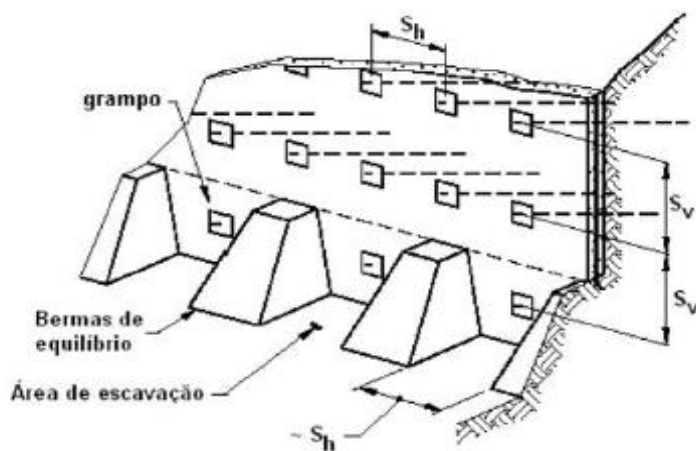


Figura 6 - Processo de escavação em bermas de equilíbrio (Lazarte et al, 2003)

1.2.2. PERFURAÇÃO

Após a realização da escavação da primeira camada, são executadas as perfurações dos furos com diâmetros, profundidade e ângulos determinados em projeto. As perfurações são normalmente executadas por equipamentos relativamente leves, de fácil manuseio, instalação e trabalho sobre qualquer talude.

O equipamento consiste em uma perfuratriz com rotação e torque adequados ao tipo de solo. Caso se utilize lama estabilizante, deve-se assegurar o não prejuízo do atrito lateral. Os grampos cravados são introduzidos manualmente (martelotes manuais) ou com auxílio de martelotes pneumáticos.

1.2.3. INJEÇÃO DOS GRAMPOS

A primeira fase de injeção denominada bainha, compreende o preenchimento do furo e a introdução da barra. A bainha é injetada por meio de tubos auxiliares removíveis, de forma ascendente, proveniente de um misturador coloidal de alta turbulência, até que se extravase na boca do furo. Este tipo de injeção deve ser executado em furo com uma inclinação mínima variando de 5° a 10° em relação à horizontal, visando a otimização dos esforços de cisalhamento e tração nos grampos. Pitta (2003) recomenda que o fator água/cimento da bainha varie entre 0,50 a 0,70.

Se as barras dos grampos forem de aço, estas devem receber tratamento anticorrosivo (resinas epóxis ou pintura eletrolítica). No caso da utilização de barras de plástico reforçadas por fibras, não há necessidade de tal procedimento, pois este material é imune à corrosão. Ao longo das barras, devem ser dispostos elementos centralizadores, tipicamente a cada 2,0 ou 3,0 m, para evitar o contato do elemento de reforço com o solo. A Figura 7 ilustra as fases construtivas de injeção do grampo e a Tabela 1 apresenta algumas especificações de projeto.

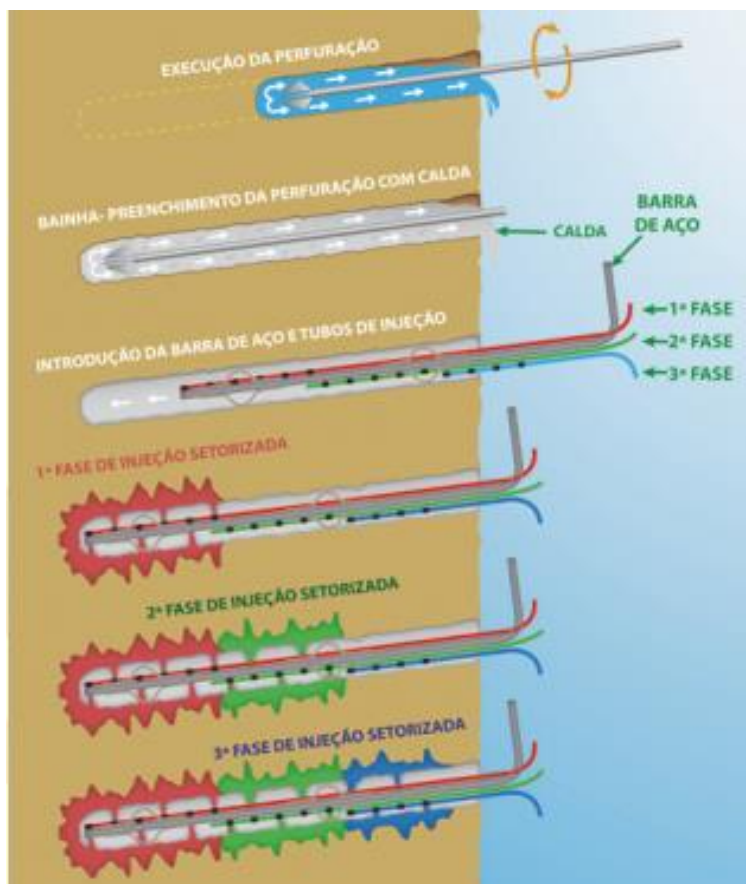


Figura 7 - Fases construtivas da injeção do grampo: Perfuração, execução da bainha, introdução da barra de aço e tubos de injeção e injeção setorizada (Solotrat, 2018)

2.3.3.1. REVESTIMENTO DA FACE

A conexão da extremidade do reforço com o revestimento da face é outro detalhe construtivo importante da obra de solo grampeado. Esta pode ser realizada de diferentes maneiras, mas geralmente utiliza-se o concreto projetado sobre uma malha de aço eletrossoldada.

Outro tipo de face empregado por Saramago et al. (2005) consiste no uso de blocos pré-moldados de cimento. Os autores alegam que o uso de blocos pré-moldados incorpora uma vantagem estética à obra, pois permite a execução de faces arquitetonicamente mais elaboradas. Podem também ser utilizados painéis pré-fabricados, em função dos mesmos aspectos arquitetônicos.

Tabela 1 - Algumas especificações de Projeto para grampos injetados (Ortigão, 1997)

Especificações de Projeto com grampos injetados (Ortigão, 1997).	
Descrição do Item	
Limpeza do Furo	A limpeza do furo, durante a perfuração, deve ser preferencialmente realizada a seco e com ar comprimido. Alguns executores são relutantes em adotar esta prática, pois são mais comuns os equipamentos rotativos que utilizam água ou outro fluido na lavagem.
Aditivos	O expensor da calda de cimento é um importante aditivo, que evita a retração e conseqüentemente diminuição do atrito solo-grampo. Outro aditivo importante é o acelerador de pega, que reduz os prazos de execução do reforço.
Tubo lateral de injeção	A utilização de uma tubulação plástica lateral de injeção deve ser obrigatória especialmente em grampos longos ($L > 3m$), para garantir o preenchimento adequado do furo.
Espaçadores ou Centralizadores	Os espaçadores podem ser fabricados na própria obra com tubos de PVC e instalados a cada 3 m ao longo da barra de aço, garantindo que a mesma seja centrada no furo.

Em taludes com uma inclinação mais suave, da ordem de 45° , é possível adotar revestimento vegetal (Pinto e Silveira, 2001) ou grama armada (Alonso, 2005), que proporcionam um melhor efeito estético ao talude.

Embora não possua função estrutural, pois absorve apenas pequenos carregamentos, a face deve evitar rupturas localizadas e processos erosivos. Basicamente, no reforço de solo grampeado, os grampos estabilizam o maciço e o concreto projetado combate a instabilidade local da face.

1.2.4. DRENAGEM

Uma regra geral para a execução de solos grampeados é que o terreno deve estar acima do nível d'água ou ainda que este deve ser rebaixado antecipadamente.

Contudo, mesmo tomando estas medidas, é necessário evitar que a percolação de água de outras fontes, como a chuva ou vazamentos em tubulações, ocorra na direção do paramento (França, 2007).

Com a finalidade de proteger a solução do solo grampeado deve-se construir um sistema de drenagem que visa oferecer um fluxo organizado para as águas que de alguma maneira chegam à contenção. A água infiltrada na região traz efeitos nocivos que devem ser previstos, pois compromete o bom funcionamento da estrutura ao gerar um aumento da poropressão que ocasiona a redução da resistência do solo e, por consequência, a redução da resistência da estrutura, além de prejudicar as barras que podem ser afetadas pela corrosão.

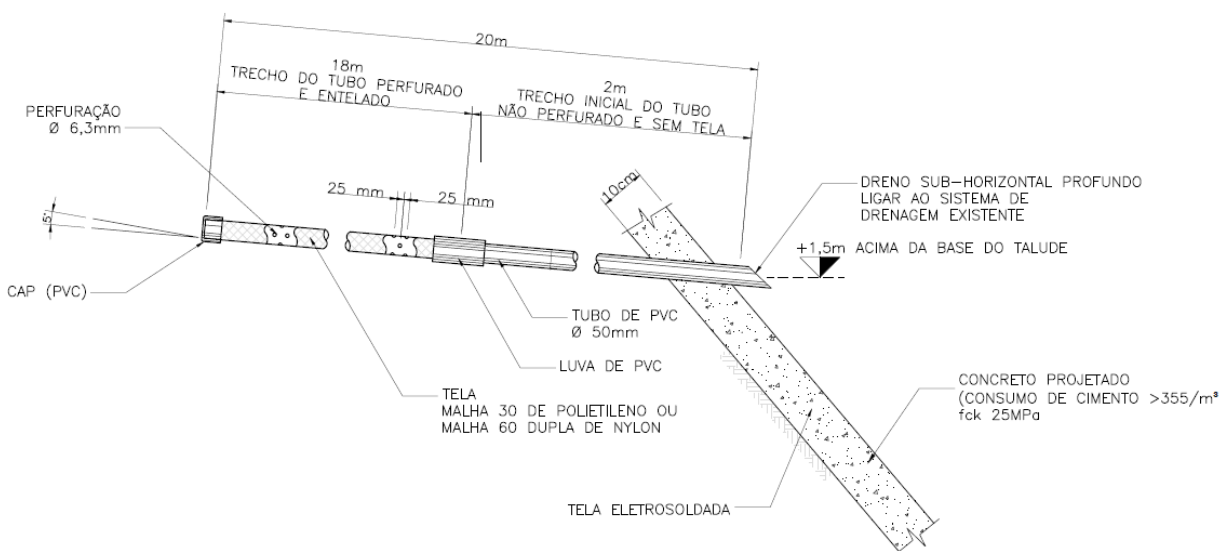
Sistemas eficientes de drenagem superficial podem ser projetados de forma a utilizar uma série de dispositivos com objetivos específicos: canaletas longitudinais, canaletas transversais de descida d'água (escada hidráulica), dissipadores de energia, caixas coletoras, etc.

A prática usual recomenda sempre a execução de serviços de drenagem profunda, onde é utilizado o dreno sub-horizontal profundo (DHP, Figura 8), e de superfície, em que são aplicados os drenos barbacãs (Figura 9) e as canaletas.

A drenagem profunda é feita com os DHPs que são elementos que tem como objetivo captar as águas distantes da face do talude antes que nele aflorem, conduzindo-as ao paramento e, em seguida, despejá-las em canaletas. Estes drenos consistem de tubos plásticos ranhurados (diâmetro em torno de 50 mm), inseridos em furos no solo de aproximadamente 75 mm de diâmetro. Os tubos são recobertos por geotêxtil ou tela de nylon com a função de filtração. O comprimento dos drenos deve ser maior do que o dos grampos, já o espaçamento entre os drenos depende de fatores com condições locais como nível d'água, permeabilidade do solo e índices pluviométricos.

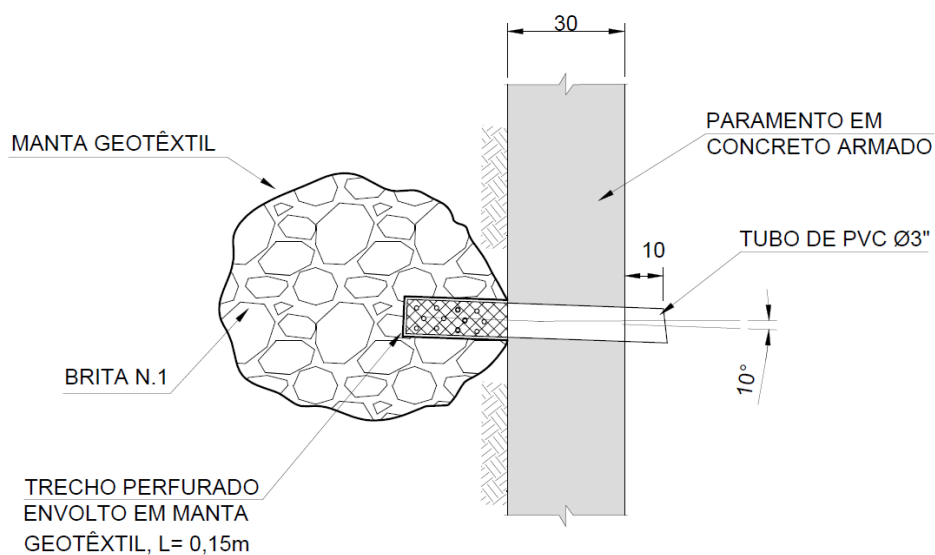
O dreno tipo barbacã é responsável por uma drenagem pontual que é o resultado da escavação de uma cavidade preenchida com material poroso e tendo como saída um tubo de PVC drenante, partindo de seu interior para fora do revestimento com inclinação descendente que direciona a água para fora do talude. É

um procedimento que deve ser projetado para abranger toda a superfície do paramento, respeitando espaçamentos especificados em projeto.



DETALHE – DRENO SUB-HORIZONTAL PROFUNDO

Figura 8 - Detalhe típico de projeto do DHP



DETALHE TÍPICO DO BARBACÃ

Figura 9 - Detalhe típico de projeto do dreno barbacã

1.3. COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO GRAMPEADO

O mecanismo de interação solo-reforço no sistema solo grampeado varia amplamente com a metodologia executiva, o tipo de aplicação (estrutura de contenção ou estabilização de taludes), as propriedades do solo e as características dos reforços (comprimento da barra, tipo de barra de aço, diâmetro da coluna da calda de cimento e inclinação do reforço). Com exceção das características mecânicas do solo, todos os outros fatores podem ser controlados e padronizados na execução dos grampos.

Como a estabilidade de uma contenção em solo grampeado é, na maioria das vezes, avaliada em seu estado limite último, um parâmetro muito importante em projeto é a resistência ao cisalhamento desenvolvida na interface entre o reforço e o solo circundante (q_s). Este parâmetro é responsável pelo mecanismo de transferência de carga e restrição do movimento do maciço de solo, durante e após a sua escavação. Como os reforços trabalham basicamente sob tração, quanto maior for este parâmetro, melhor será o desempenho do reforço na estabilização do maciço de solo. Entretanto, como o q_s é influenciado por diferentes fatores, a sua previsão torna-se, na maioria das situações, imprecisa e conservadora.

Muitos autores desenvolveram métodos de previsão a partir de modelos teóricos e empíricos, entre os quais citam-se Cartier e Gigan (1983), Bustamante e Doix (1985), Jewell (1990), Clouterre (1991), Heymann et al. (1992), Ortigão e Palmeira (1997) e Proto Silva (2005). Estes métodos de previsão são úteis em uma fase preliminar de projeto.

A realização de ensaios de arrancamento *in situ* permite um maior conhecimento deste parâmetro e possibilita a realização de projetos executivos mais econômicos.

1.3.1. INTERAÇÃO SOLO-GRAMPO

Para uma escavação as deformações laterais estão associadas ao desconfinamento promovido pela retirada de material terroso de suporte como consequência do processo executivo. No caso de reforço de uma estrutura já existente

ou de um talude natural, as deformações laterais estão associadas a movimentações já em curso na estrutura ou no talude.

Durante a construção, devido à descompressão lateral do solo, os grampos são solicitados essencialmente a esforços de tração. A transferência de tensões entre o solo e o reforço envolve um mecanismo de resistência ao cisalhamento entre os dois materiais. Dessa forma, para se obter a estabilidade, o grampo deve resistir a solicitações normais e aos efeitos combinados de cisalhamento e flexão na região da superfície de ruptura e junto à face do talude, em situações que exerçam influência significativa nas análises de estabilidade (como exemplo, onde a direção da superfície potencial de ruptura é quase perpendicular à direção dos grampos).

O mecanismo de interação mais importante nos solos grampeados é a mobilização da resistência ao cisalhamento da interface entre o solo e o grampo ao longo das inclusões. Bruce e Jewell (1986) declaram que o solo grampeado aumenta a resistência ao cisalhamento do solo com os grampos atuando sob tensão de tração.

1.3.2. TIPOS DE RUPTURA

As tensões máximas de tração nos solos grampeados se encontram no interior da massa de solo reforçada, como em muitas outras técnicas de reforço de solos onde a transmissão dos esforços se dá ao longo de toda extensão das inclusões (Clouterre, 1991). A máxima tração ocorre na interseção dos grampos com a superfície potencial de ruptura (linha imaginária que une os pontos de máxima tração nos reforços) e serve de referência para definir, em projeto, a quantidade de reforços para evitar a ruptura da obra. A superfície potencial de ruptura separa o solo em duas zonas, uma ativa e outra passiva.

A zona ativa está compreendida entre a face do talude e a superfície potencial de ruptura (essa região é potencialmente instável e tem sua estabilidade garantida pela presença dos grampos), e a outra, chamada de zona passiva, localiza-se onde os grampos são fixados. Os esforços nos grampos só serão mobilizados caso ocorram deslocamentos da zona ativa em relação à zona passiva (Figura 10).

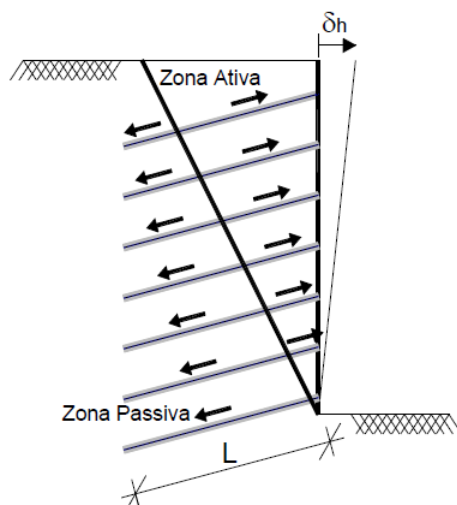


Figura 10 - Zonas ativa e passiva características de contenções em solo grampeado (Gerscovich *et al*, 2005)

Os modos de ruptura de uma estabilização em solo grampeado e as principais verificações que devem ser levadas em consideração no desenvolvimento dos projetos são listadas a seguir (Mitchell e Villet, 1987):

- Resistência ao arrancamento do grampo na zona passiva;
- Resistência do grampo a esforços de cisalhamento e flexão;
- Resistência estrutural da face (de menor importância).

Uma estrutura de solo grampeado comporta-se como um bloco monolítico. É feita, portanto, uma distinção entre rupturas internas e externas e ainda uma ação combinada destes dois tipos, a ruptura mista (Figura 11).

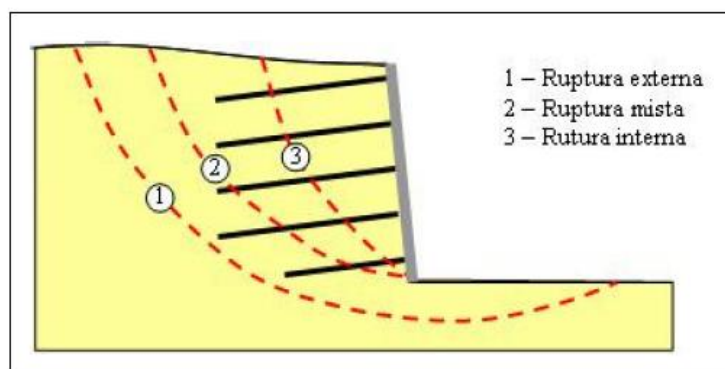


Figura 11 - Mecanismos de ruptura em solos grampeados (Adaptado de Clouterre, 1991)

1.4. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Os ensaios nos grampos consistem basicamente em ensaios de arrancamento, cujo objetivo principal é determinar a resistência ao cisalhamento de interface (q_s), parâmetro fundamental para o projeto de solos grampeados.

A carga axial de tração nos grampos (T_n) tem papel preponderante e é introduzida como força estabilizante que corresponde à resistência ao arrancamento mobilizada (Figura 12):

$$T_n = \pi D q_s L_b \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

q_s : Resistência ao arrancamento mobilizada;

D : Diâmetro da perfuração;

L_b : Comprimento do bulbo (zona passiva do grampo);

T_n : Carga axial de tração cortante no grampo.

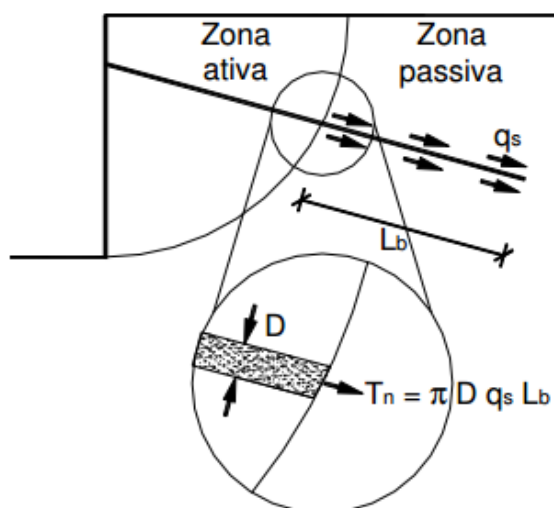


Figura 12 - Tração no grampo (Ortigão et al, 1993)

O parâmetro q_s é frequentemente estimado durante a fase de projeto (baseado na experiência do projetista) para posterior verificação, por meio de ensaios de arrancamento dos grampos.

Os ensaios devem ser realizados na fase de projeto para a determinação dos parâmetros necessários (ensaios preliminares), durante a execução da obra, a título de comprovação dos resultados estimados (ensaios de conformidade e de inspeção) e após término da obra, para o monitoramento. Os grampos a serem ensaiados durante a construção devem ser previamente preparados e instalados próximos aos grampos de serviço (permanentes).

Clouterre (1991) sugere um número mínimo de grampos que devem ser ensaiados de acordo com a área em que vai ser executado grampeamento do solo (Tabela 2).

Tabela 2 - Número de ensaios de arrancamento em função da área (Clouterre, 1991)

Ensaio de Arrancamento			
Área da face (m²)	Preliminares e de conformidade	Área da face (m²)	De inspeção
Até 800	6	Até 1000	5 (para cada camada de solo) e 1 (para cada fase de escavação)
800 a 2000	9		
2000 a 4000	12	Maior que 1000	Aumenta-se em 1 para cada 200 m ²
4000 a 8000	15		
8000 a 16000	18		
16000 a 40000	25		

A recomendação de um número mínimo de grampos a serem ensaiados, feita por Clouterre (1991), é função da área de cada tipo de solo do perfil que deve ser escavado. Os grampos são instalados no terreno na camada de solo a ser ensaiada, conforme mostra a Figura 13.

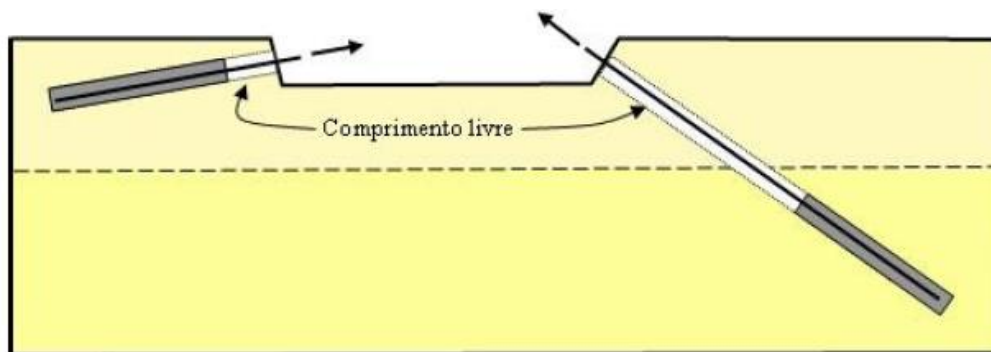


Figura 13 - Esquema para ensaios de arrancamento em diferentes camadas de solo (Clouterre, 1991)

1.4.1. RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO (q_s)

Um dos parâmetros para o dimensionamento de uma estrutura em solo grampeado é o atrito desenvolvido entre o grampo e o solo, denominado atrito solo x grampo e designado por (q_s). O valor de q_s é função das propriedades do solo, do grampo e da interface solo-grampo e é obtido a partir de ensaios de arrancamento (*pullout test*).

Alternativamente ao ensaio de arrancamento, para uma estimativa inicial, o parâmetro de resistência pode ser obtido a partir de correlações empíricas com parâmetros do solo, obtidos em ensaios de laboratório e/ou campo. Não se dispõe ainda de uma norma para a realização de ensaios de arrancamento, porém existem algumas recomendações de controle.

O procedimento de instalação de grampos destinados aos ensaios de arrancamento (inclinação, perfuração, introdução no furo e injeção) deve ser exatamente o mesmo dos grampos permanentes da construção, conforme recomendado por Clouterre (1991). Os padrões utilizados para os ensaios de arrancamento podem ser executados com deslocamento controlado (velocidade constante) ou com força controlada. O sistema de aplicação de carga do ensaio de arrancamento está ilustrado na Figura 14.

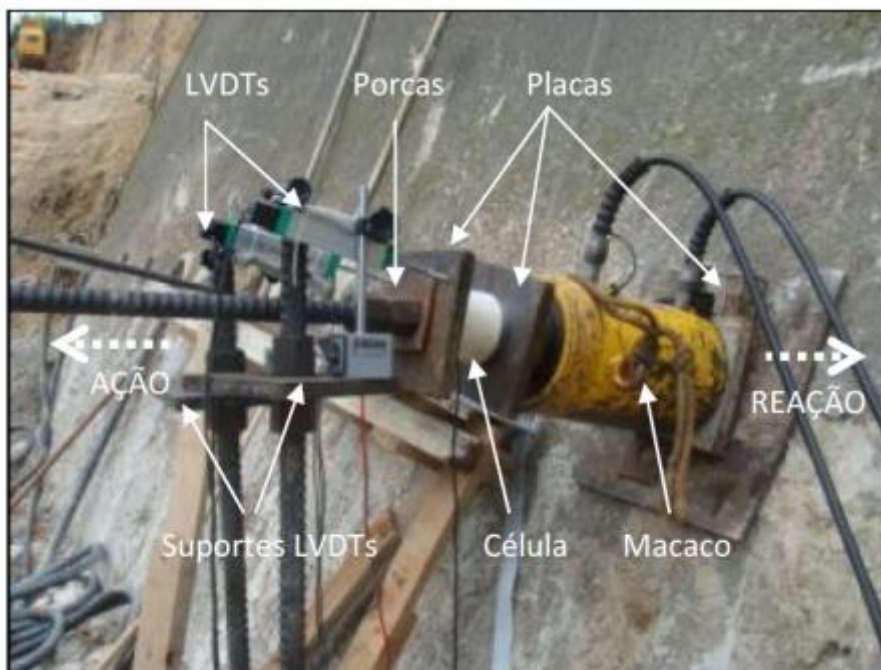


Figura 14 - Sistema de aplicação de carga do ensaio de arrancamento. (Passini *et al*, 2012).

Segundo Clouterre (1991), por meio dos ensaios de arrancamento é possível determinar a força máxima de arrancamento, a força residual e o coeficiente (k_{β}), correspondente à inclinação inicial da curva de deslocamento x força (Figura 15).

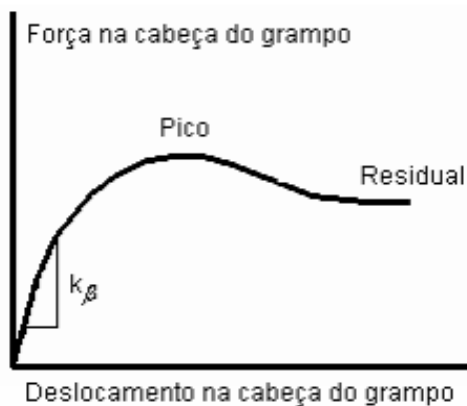


Figura 15 - Curva deslocamento x força de um ensaio de arrancamento (Clouterre, 1991)

Para as mesmas condições de solo, tanto o ensaio com controle de deslocamento quanto o ensaio com controle de força, devem levar ao mesmo resultado, ou seja, à mesma força máxima de arrancamento.

A realização de ensaios de arrancamento *in situ* permite um melhor conhecimento deste parâmetro e possibilita a realização de projetos executivos mais econômicos e viáveis. O cálculo da força máxima admitida em um grampo é feito através da seguinte expressão:

$$T_{m\acute{a}x} = \pi \cdot \emptyset_{furo} \cdot L_s \cdot q_s \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$T_{m\acute{a}x}$: Força máxima obtida no ensaio;

\emptyset_{furo} : Diâmetro do furo;

L_s : Comprimento da interface solo-calda de cimento;

q_s : Atrito solo x grampo na ruptura.

O projeto Clouterre (1991) foi responsável pela execução de inúmeros ensaios de arrancamento, cujos resultados foram reunidos e organizados em função do tipo de solo e das características de instalação dos grampos.

Springer (2006) apresenta a quantificação da resistência ao arrancamento dos grampos por meio de 25 ensaios de arrancamento executados no campo. Além disso, também apresenta a influência de diversos fatores na resistência, tais como o tempo de cura da nata de cimento, o número de injeções, a lavagem do furo e o tipo de solo.

Byrne (1998) apresenta faixas de valores de resistência ao cisalhamento de interface para vários tipos de solo, em grampos executados por meio de perfuração associada à calda de cimento. Esses valores podem ser úteis na elaboração de anteprojetos e estimativa de custos. Contudo, o autor recomenda que os valores estimados sejam comprovados por ensaios em campo, executados antes e durante o andamento da obra (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores da resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo (adaptado de Byrne, 1998)

Tipo de solo	Descrição do solo	Resistência ao cisalhamento de interface (kPa)
solos não coesivos	Silte não plástico	20 - 30
	Silte arenoso	50 - 75
	Areia siltosa	50 - 75
	Areia medianamente compacta	50 - 75
	Areia siltosa densa	80 - 100
	Areia Siltosa muito densa	120 - 240
	Loess	25 - 75
solos coesivos	Silte argiloso	40 - 100
	Argila arenosa	100 - 200
	Argila rija	40 - 60

1.4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os esforços de tração são os que mais solicitam os grampos. As tensões nas extremidades livres das barras são nulas e crescem até um ponto de tração máxima, no interior da massa de solo reforçada. A posição de máxima tração, geralmente incide sobre a superfície de ruptura e possui um formato diferente do plano de ruptura proposto por Rankine (Seabra, 2015).

Por meio de resultados experimentais, Clouterre (1991) concluiu que a linha máxima de tração se localiza a $0,30.H$, sendo H a altura da camada a ser estabilizada. Byrne *et al* (1998) defendem que a mesma se concentra em $0,30.H$ a $0,35.H$. Lima (2002) afirma que esta posição pode variar de acordo com a inclinação do talude. O autor ainda ressalta que a distância do topo da escavação até a superfície de ruptura pode variar de acordo com o tipo de solo e os grampos existentes.

1.4.3. RESISTÊNCIA AOS ESFORÇOS CISALHANTES E FLETORES

Como mencionado anteriormente, as solicitações nos grampos mais relevantes são as de tração. No entanto, é possível observar solicitações transversais ao grampo

que podem ocasionar o surgimento de esforços cisalhantes e fletores. A magnitude desses esforços está diretamente ligada à rigidez do grampo e à relação entre a direção do reforço e da deformação principal maior.

Convém lembrar que a ruptura da estrutura de solo grampeado poderá ocorrer também no contato solo-grampo se as tensões cisalhantes alcançarem o valor limite de q_s , causando uma ruptura por falta de aderência.

A Figura 16 faz analogia do grampo a uma estaca carregada horizontalmente no topo, onde T_c representa as tensões cisalhantes e M , os momentos fletores. No ponto O, interseção da superfície de ruptura e grampo, a tensão cisalhante atinge seu valor máximo (T_{c0}), correspondente ao momento fletor nulo. Ao contrário, nos pontos A e A' o momento fletor atinge seu valor máximo e $T_c = 0$. O comprimento l_0 é definido como sendo a distância entre os pontos O e A.

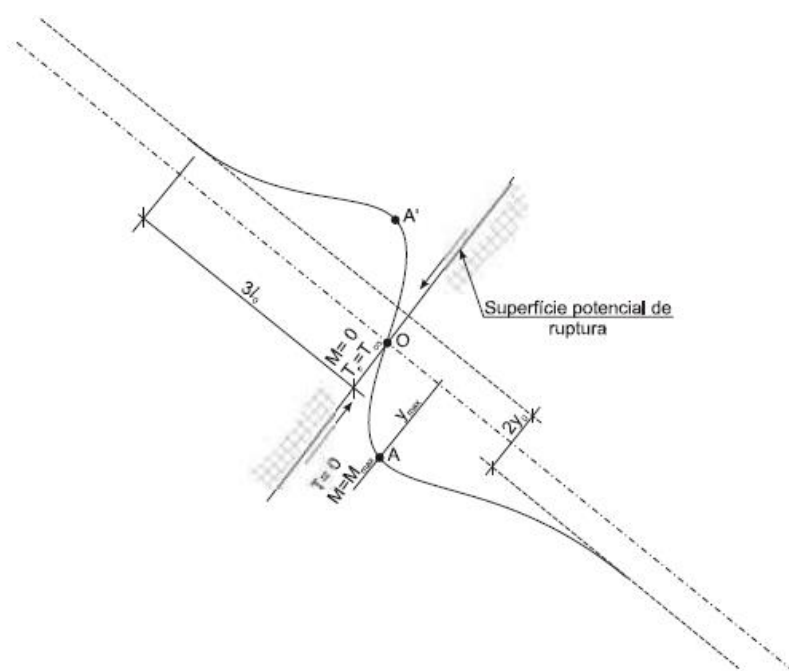


Figura 16 - Analogia do grampo a uma estaca carregada horizontalmente no topo (Mitchell e Villet, 1987)

De acordo com Mitchell e Villet (1987) quando o comprimento L do reforço supera $3l_0$, em ambos os lados da superfície de ruptura, considera-se o grampo tendo comprimento infinito, sendo simétrico em relação à zona de ruptura. A distância $3l_0$, desde O, define o ponto a partir do qual os momentos fletores se tornam nulos.

Segundo Ortigão *et al.* (1995 e 1997), apenas esforços de tração apresentam significativa importância na estabilidade interna de estruturas em solo grampeado. Esforços cisalhantes e momentos fletores nos grampos respondem por uma parcela menor que 3% na estabilidade global. Resultados de análises de estabilidade por equilíbrio limite demonstram que, na prática, a influência dos esforços cisalhantes e momentos fletores é muito pequena no FS calculado, mesmo em grampos mais rígidos.

1.5. TIPOS DE REVESTIMENTOS DA FACE DO TALUDE

O revestimento da face do talude não possui função estrutural, pois é responsável por absorver apenas pequenos carregamentos. O objetivo principal da face é evitar rupturas localizadas e processos erosivos. Basicamente, no reforço de solo grampeado, os grampos estabilizam o maciço e o concreto projetado combate a instabilidade local da face.

Após a introdução dos grampos, a proteção da face deve ser executada, a fim de que a mesma não sofra processos de rupturas localizadas e de erosão superficial, causados principalmente pela ação da chuva. Em solos, a proteção é geralmente executada por meio de jateamento de concreto sobre uma malha metálica, com espessura entre 5 cm e 15 cm e com armadura suficiente para resistir à tração gerada pela dilatação térmica do próprio concreto. Para um melhor efeito estético, podem-se utilizar elementos pré-fabricados de concreto para proteção da face.

Diferentes tipos de soluções para a proteção da superfície do talude já existem no mercado, dentre elas pode-se mencionar: o concreto projetado com armação comum, com tela eletrossoldada, concreto com fibras metálicas ou de polipropileno adicionadas diretamente na betoneira, revestimento vegetal, revestimento com tela metálica, revestimento com tela metálica em combinação com geomanta.

Como o objetivo do presente trabalho é analisar a influência da face do talude em obras geotécnicas de solo grampeado, a seguir será apresentado um breve resumo de algumas técnicas de revestimento da face.

1.5.1. CONCRETO PROJETADO

Concreto projetado é a denominação que se dá ao concreto que é lançado “projetado” ou “jateado” através de mangueiras especiais com uso de ar comprimido e sem a utilização de formas (Figura 17).

O concreto projetado pode ser executado de duas maneiras, por via seca ou úmida, dependendo se o concreto for lançado com ou sem água pré-misturada. No caso do processo por via seca, o controle do volume de água adicionado é regulado pelo operador ao final do mangote, diretamente no bico de projeção, de acordo com a sua experiência. No caso do concreto projeto por via úmida, o concreto já entra na bomba devidamente dosado e no bico de projeção é injetado ar comprimido para o seu lançamento. Neste caso, o concreto projetado é de maior qualidade e homogeneidade (Springer, 2006).

Em obras de menor porte, como é o caso da maioria das obras de contenção, emprega-se o concreto por via seca, em face da extrema praticidade de aplicação. Ou seja, o trabalho pode ser interrompido e reiniciado sem perda de material e tempo para limpeza do equipamento. A via úmida só é utilizada, em geral, em casos de grandes volumes, superiores a 5 m³ aplicados ininterruptamente, pois a cada paralisação é necessário efetuar uma limpeza geral no mangote, o que não seria prático em pequenas obras (GEO-RIO, 1999).

As vantagens desse revestimento são a rapidez de lançamento, pouca mão-de-obra necessária no processo executivo. O fato de dispensar formas e a elevada energia de projeção que produz uma ótima compactação do concreto que colabora sobremaneira com sua alta resistência, bem como o adensamento da capa superficial do solo com uma eficiente colagem, fazem com que o concreto projetado seja uma opção vantajosa para o revestimento da face do talude.



Figura 17 - Concreto projetado para a proteção de taludes (https://www.prolazer.com.br/concretoprojetado/obras_realizadas.html 21/04/17, 16:51)

Durante a projeção do concreto na face do talude é preciso atentar para o efeito sombra (Figura 18). Esse efeito é provocado pela má distribuição do concreto projetado atrás da malha de aço caso o lançamento não previna a sua ocorrência e pode gerar regiões com concreto projetado menos compactado e com vazios atrás da malha.

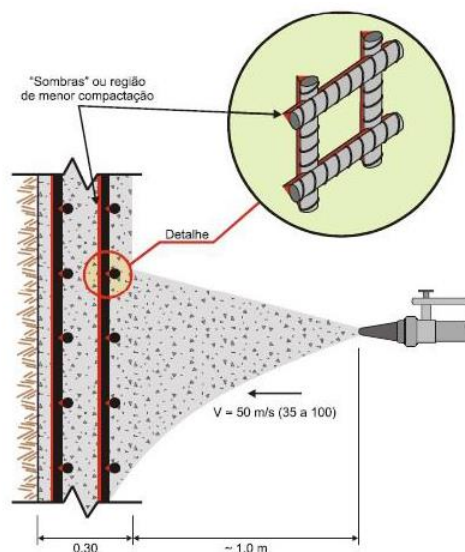


Figura 18 - Efeito de sombra causado pela má distribuição do concreto projetado

Mais detalhes sobre o revestimento por concreto projetado são apresentados por GeoRio (1999), Springer (2006), França (2007) e Seabra (2015).

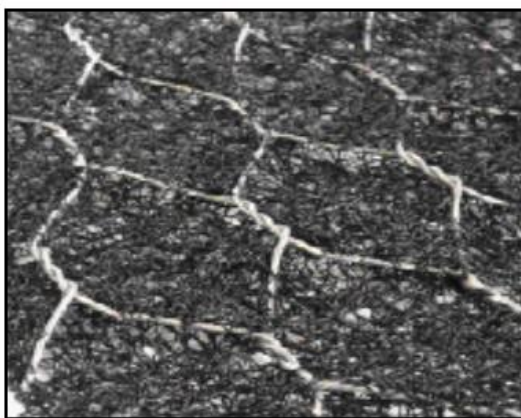
1.5.2. REVESTIMENTO VEGETAL

O revestimento vegetal da face de um talude é realizado com revestimento flexível (tela metálica) associado à geomanta ou biomanta com a adição de sementeira ou grama em placa (Figura 19).

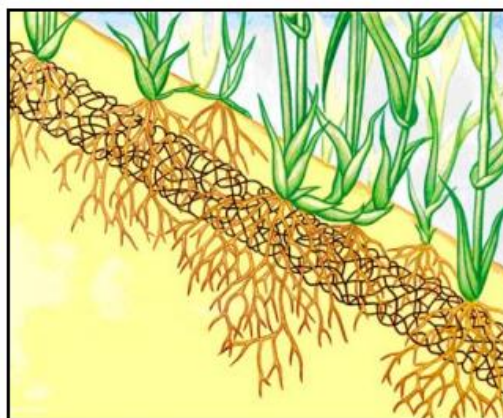
O revestimento cobre a face exposta do solo reforçado e pode desempenhar uma função estabilizadora para reter o material entre os grampos. Oferece também proteção contra erosão e promove a restauração da cobertura vegetal da encosta.

As vantagens da utilização do revestimento vegetal como solução da proteção são:

- Oferece estabilidade enquanto a vegetação é estabelecida;
- Aumenta a resistência ao cisalhamento do solo e a proteção contra erosão;
- Conecta as camadas superficiais instáveis à parte profunda e estabilizada da encosta.



(a)



(b)

Figura 19 - (a) Geomanta reforçada com malha de aço de dupla torção e (b) Efeito de enraizamento da vegetação na geomanta (Maccaferri, 2011)

Esta técnica diminui consideravelmente o custo global da obra e melhora a estética, pois proporciona o crescimento perceptível da vegetação logo após o seu plantio criando um revestimento verde em todo talude grampeado.

Maccaferri (2011) relata que após o desenvolvimento por completo da vegetação não há sequer a percepção de uma obra de estabilização de encosta anteriormente no local, o que comprova a perfeita utilização da solução por revestimento vegetal no conceito sustentável de uma obra funcional, econômica e social (Figura 20).



Figura 20 - (a) Talude com a geomanta reforçada e (b) Talude com a geomanta reforçada após o crescimento da vegetação. (Maccaferri, 2011)

1.5.3. BLOCOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO

A preocupação com a estética da obra passou a ser uma realidade para os projetistas e executores das intervenções. A utilização de blocos pré-moldados de concreto como elemento de face consegue agregar um valor estético à obra, possibilitando desenhos arquitetônicos e formação de jardineiras suspensas na face da estabilização.

A face do talude é constituída de blocos pré-moldados de concreto e a metodologia de construção da face é sempre de baixo para cima. Esses blocos, de formatos e dimensões especialmente projetadas para paramentos de obras de contenção, vêm se mostrando como uma alternativa de paramento semi-rígido com declividades máximas de 1:10 (H:V) ou de 1:4 (H:V).

Os blocos pré-moldados são instalados por simples justaposição sem utilização de argamassa para rejunte, ou seja, encaixe a seco (Figura 21). Esse processo

construtivo do paramento permite uma racionalização do método executivo, dispensando a utilização de concreto, armadura, água e energia elétrica (Mendonça, 2006).

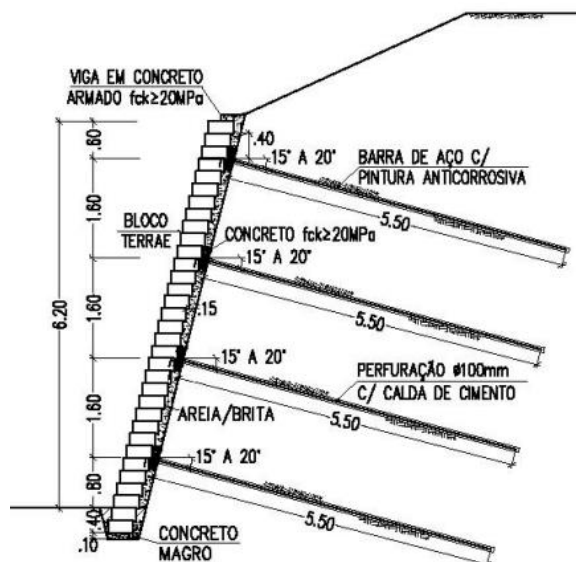


Figura 21 - Exemplo de seção típica de muro de solo grampeado com face em blocos pré-moldados

É de extrema importância enfatizar que a correta elevação do paramento depende de um perfeito alinhamento e nivelamento da primeira linha de blocos executada. Para tanto, estes devem ser posicionados com o auxílio de linhas perfeitamente niveladas. Para muros construídos em curva os alinhamentos devem ser feitos em pequenos segmentos de trechos retilíneos, sempre nivelados. A Figura 22 apresenta este método de revestimento da face do talude grampeado.



Figura 22 - (a) Vista lateral e (b) Vista frontal do revestimento da face do talude por blocos Terrae

Mais detalhes sobre o uso de blocos de concreto pré-moldados para a face da contenção em solo grampeado são apresentados por Mendonça (2006).

2. ESTABILIDADE DE TALUDES

Por definição, talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Os tipos de taludes podem ser natural, também denominado encosta, ou construído pelo homem, como os aterros, barragens e cortes ou escavações.

A análise da estabilidade é feita de acordo com um estudo prévio das condições de contorno e parâmetros geotécnicos de cada talude. A Figura 23 mostra os tipos de taludes existentes, natural e construído, e também cita exemplos de aplicações de estudos de estabilidade.

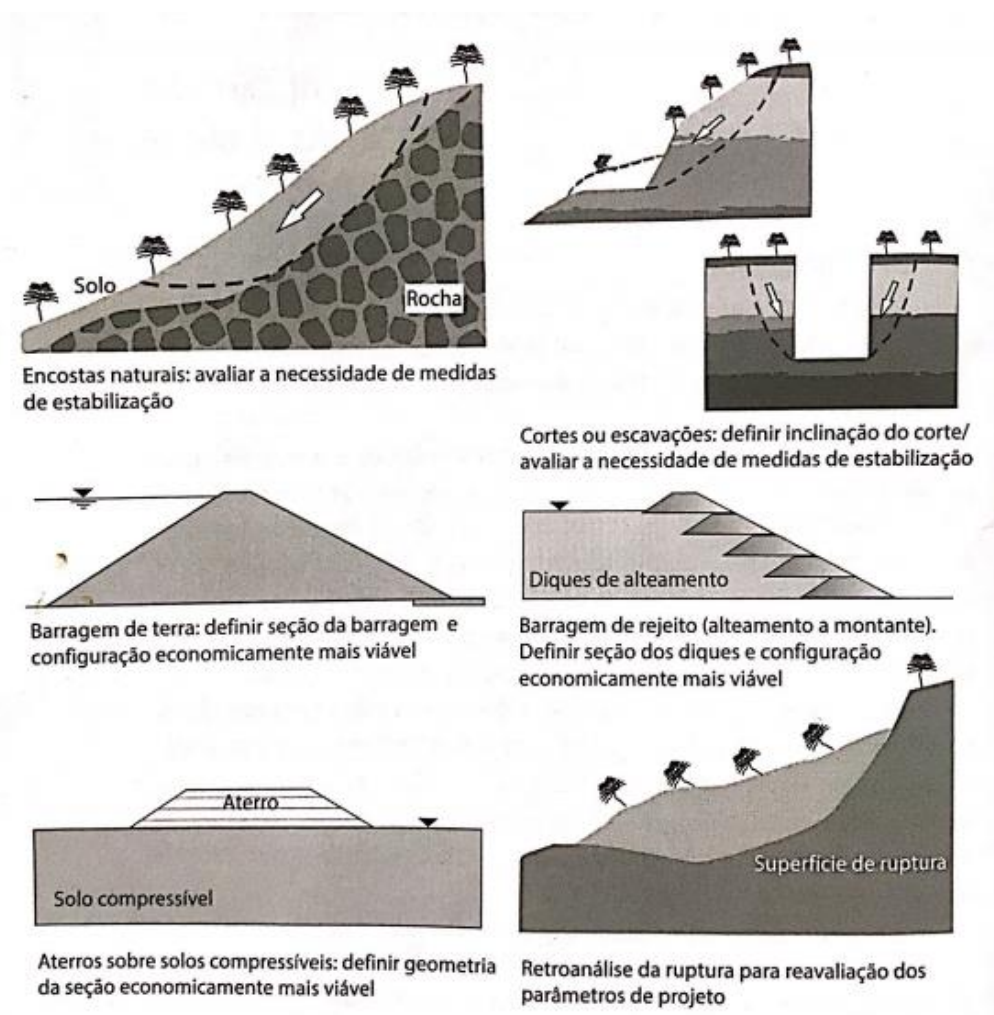


Figura 23 - Exemplos de aplicações de estudos de estabilidade (Gerscovih, 2016)

No presente trabalho, as análises serão feitas em talude natural com variação dos parâmetros geotécnicos e detalhes típicos do dimensionamento da estrutura do solo grampeado, a fim de conhecer a influência de cada item na estabilidade de uma obra de contenção com essa solução.

2.1 MOVIMENTO DE MASSA

O movimento de massa, também denominado como deslizamento, escorregamento, ruptura de talude, queda de barreiras, entre outros, se refere aos movimentos de descida de um determinado volume de solo e/ou rocha sob o efeito da gravidade, geralmente potencializado pela influência da água.

Segundo Gerscovich (2016), a literatura aborda os movimentos de massa como sendo consequência de problemas associados a instabilidade de taludes e, além disso, dentre as diversas propostas de classificação, a mais utilizada internacionalmente é a de Varnes (1978).

A GEO-RIO, em 2014, adaptou a classificação dos movimentos de massa de encostas no Manual Técnico de Encostas – Volume I, a partir de Varnes (1978) e Augusto Filho (1992), considerando os mecanismos específicos e os diferentes materiais envolvidos. Além disso, apresentou os movimentos de massa do tipo complexo que são característicos de eventos observados na cidade do Rio de Janeiro, principalmente na Região Serrana (tabela 4).

Segundo ainda a GEO-RIO (2014), a classificação do movimento de massa em encostas baseia-se nos seguintes critérios:

- Cinética do movimento: definida pela velocidade, direção e sequência dos deslizamentos;
- Tipo do material: solo, rocha, detrito, depósito, entre outros, destacando-se sua estrutura, granulometria e umidade;
- Geometria: extensão e formato da superfície de ruptura;
- Tipos de movimento.

Tabela 4 - Classificação dos movimentos de encosta mais comuns do Rio de Janeiro (GEO-RIO, 2014)

Tipo de movimento		Material predominante	Cinética e geometria
Quedas		Lascas de rocha, blocos de rocha fraturada ou solo em margens de corpos d'água.	Queda livre com ou sem repique em planos inclinados.
Tombamentos		Lascas de rocha com fraturamento subvertical	Basculamento e posterior queda de lascas de rocha
Rolamentos		Blocos de rocha e/ou matacões	Rolamento de blocos/matacões aflorantes em taludes de solo
Escorregamentos	Rotacionais	Rochas muito fraturadas ou solos espessos sem anisotropia relevante ou resíduos sólidos urbanos (lixo)	Movimentos rápidos ou lentos ao longo de superfícies aproximadamente conchoidais ou cilíndricas
	Translacionais ou planares	Blocos de rocha ao longo das foliações ou descontinuidades, solos rasos sobre rocha ou camada resistente, resíduos sólidos urbanos sobre material mais resistente.	Movimentos rápidos ou lentos ao longo de superfícies aproximadamente planas
	Em cunha	Blocos de rocha	Ocorre quando há dois planos de descontinuidade cuja intercessão é uma linha de orientação desfavorável, na direção do movimento.
Fluxos (ou escoamentos)	Corridas	Detritos (mistura de solo com blocos de rocha, vegetação etc.) ou lama.	Movimento semelhante ao de um líquido viscoso, desenvolvimento ao longo dos fundos de vale. Velocidades altas (>20 km/h). Extenso alcance.
	Rastejos ou fluências (<i>creeps</i>)	Solos coluvionares ou massa de talus	Velocidades muito baixas (mm a cm/ano). Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes, com nível d'água do lençol freático próximo à superfície. O movimento obedece à elevação do lençol d'água. Superfície de escorregamento aproximadamente paralela à superfície do terreno.
Complexos		Materiais diversos	Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos

2.2. CAUSAS DO ESCORREGAMENTO

O entendimento dos fenômenos envolvendo movimentos de massa necessita de conhecimentos relativos aos materiais envolvidos, à morfologia das encostas, aos mecanismos de percolação de água e ao comportamento mecânico dos materiais.

O estudo dos mecanismos de deslizamento e movimentos de massa em geral parte do conhecimento das propriedades mecânicas e físicas dos solos e das rochas, tais como a resistência ao cisalhamento, porosidade, permeabilidade e percolação da água ao longo das juntas e fraturas da rocha e dos solos. Os conceitos básicos de resistência ao cisalhamento, que colaboram no entendimento desse tipo de fenômeno, foram estabelecidos por Terzaghi (1925), por sua vez se apoiando nos ensinamentos de Coulomb (1736-1806), Rankine (1820-1872) e outros predecessores (Das e Sobhan, 2014).

A partir dos conceitos básicos referentes à resistência ao cisalhamento dos solos, pode-se avaliar que a instabilidade do talude será deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualarem à resistência ao cisalhamento (Figura 24):

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} > 1 \quad (\text{Talude estável})$$

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = 1 \quad (\text{Ocorre ruptura})$$

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} < 1 \quad (\text{Não há significado físico})$$

Onde:

τ_f : Resistência ao cisalhamento;

τ_{mob} : Tensões cisalhantes mobilizadas.

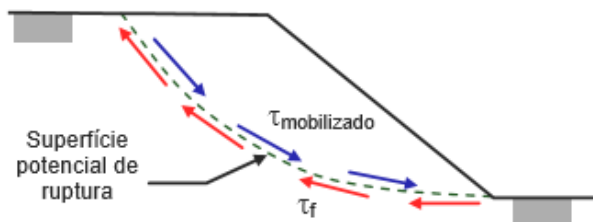


Figura 24 - Geometria do escorregamento (Gerscovich, 2009)

Esta condição que caracteriza a ruptura do talude pode ser alcançada pelo aumento das tensões cisalhantes mobilizadas (aumento da sollicitação no talude) ou pela redução da resistência do solo. A Tabela 5 reúne fatores deflagradores de movimentos de massa.

Tabela 5 - Fatores deflagradores dos movimentos de massa (adaptada de Varnes, 1978)

Ação	Fatores	Fenômenos geológicos / antrópicos
Aumento da sollicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão
		Escorregamentos
		Cortes
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, neve, granizo etc.
		Acúmulo natural de material (depósitos)
		Peso da vegetação
		Construção de estruturas, aterros etc.
	Sollicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões etc.
		Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas
Congelamento		
Material expansivo		
Redução da resistência	Características inerentes ao material (geometria, estruturas etc.)	Características geomecânicas do material
		Tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito Variação das poropressões.

De acordo com os fatores deflagradores dos movimentos de massa propostos por Varnes (1978), a GEO-RIO (2014) propõe causas e agentes relacionados a esse

fenômeno que são típicos no Estado do Rio de Janeiro, a fim de proporcionar um maior entendimento desses desastres que são recorrentes nessa localidade, principalmente na Região Serrana, que é a mais afetada (Tabela 6).

O Rio de Janeiro é considerado muito suscetível aos movimentos de massa e as causas relacionadas a esses eventos na região são devido às condições climáticas marcadas por verões de chuvas intensas em regiões de grandes maciços montanhosos. Um agravante ao problema de instabilidade de encostas é devido ao fato de nos centros urbanos, as atividades humanas como cortes em talude, aterros, depósitos de lixo, modificações na drenagem, desmatamentos, entre outras, têm aumentado a vulnerabilidade das encostas para a formação desses processos. Em especial, na Região Serrana do Rio de Janeiro, essa condição é agravada pelas ocupações irregulares, sem a infraestrutura adequada, em áreas de relevo íngreme e que, conseqüentemente, resulta em movimentos de massa com proporções catastróficas.

Tabela 6 - Causas e agentes relacionados aos movimentos de massa típicos do Rio de Janeiro (GEO-RIO, 2014)

Causas	Agentes
Elevação do nível d'água no interior do solo e em descontinuidades ou trincas de tração	Infiltração de águas de chuva, disposição inadequada de águas de drenagem pluvial e águas servidas, rompimento de tubulações de água ou esgoto
Diminuição da coesão aparente por perda de sucção causada por aumento do grau de saturação	
Redução dos parâmetros de resistência	Intemperismo
Mudanças na geometria da encosta	Execução de cortes e aterros ou atuação de processos erosivos
Aplicação de sobrecargas	Construção de edificações, lançamento irregular de aterro, entulho e resíduos sólidos urbanos etc.
Efeito das oscilações térmicas em encostas rochosas	Variações térmicas do ambiente
Remoção ou degradação de vegetação florestal com aumento de erosão superficial e perda de efeito estabilizador de raízes profundas	Incêndios e desmatamento

2.2.1. INFLUÊNCIA DA ÁGUA

A água é considerada um dos fatores mais importantes em estudos de estabilidade. A água presente nos solos pode representar pressão positiva (instabilizante) ou negativa (ganho temporário de resistência) e estar em movimento sob condição de fluxo ou não (hidrostática). A influência na estabilidade devido a água incidente em uma encosta pode ser atribuída a:

- Infiltração, saturando o solo e fazendo baixar sua coesão aparente e sua tensão efetiva (o que se traduz na perda de resistência do solo);
- Elevação do lençol freático;
- Desenvolvimento de fluxo, gerando erosões internas e/ou externas;
- Variação do peso da massa em função de mudanças no peso específico;
- Escoamento superficial, gerando a água livre que corre para os rios e atuando como agente no processo de intemperismo;
- Evaporação.

O fluxo de água no terreno origina-se de diversas fontes, mas principalmente da chuva e neve, como resultado do ciclo hidrológico. Parte do volume de água precipitado atinge diretamente o solo, parte cai em rios, lagos e mares e parte é interceptada pela vegetação. Se o solo é dotado de cobertura florestal, o escoamento superficial (chamado também de *run-off*) é baixo, e a parcela de infiltração é mais alta, o que promove o reabastecimento dos aquíferos (Figura 25). As raízes profundas exercem papel de estabilização. Áreas urbanas densamente ocupadas reduzem a infiltração no solo, contribuindo para aumentar a intensidade das enchentes.

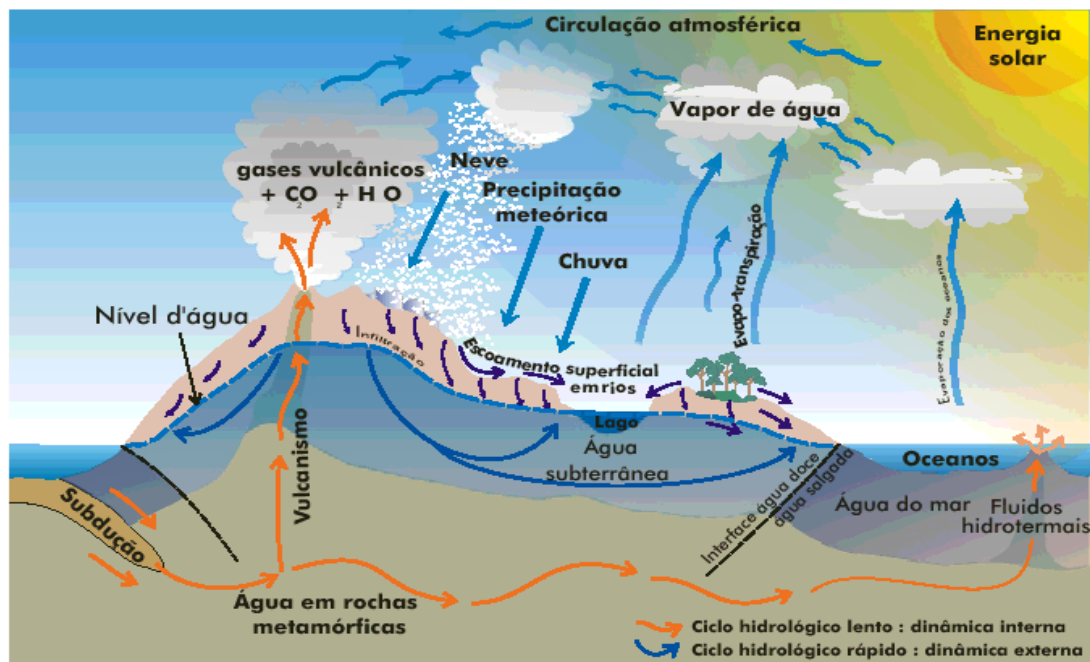


Figura 25 - Ciclo hidrológico (Teixeira, 2000)

2.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ESCORREGAMENTOS

Movimentos de massa, além de serem classificados quanto ao seu tipo de deslocamento, também podem ser classificados quanto à velocidade de deslocamento, estado de atividade de deslocamento e profundidade.

Dependendo do tipo de movimento de massa de um talude, a sua velocidade pode variar significativamente desde cm/ano até m/s. Esta classificação pode ser feita de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação da velocidade de deslocamento (GEO-RIO, 2014)

Classificação	Velocidade
Muito lento	de 0,06 m/ano a 1,5 m/ano
Lento	de 1,5 m/ano a 1,5 m/mês
Moderado	de 1,5 m/mês a 1,5 m/dia
Rápido	de 1,5 m/dia a 0,3 m/min
Muito rápido	de 0,3 m/min a 3 m/s

Além da classificação da velocidade, a GEO-RIO (2014) também propõe uma classificação quanto ao estado do movimento, considerando o estado de atividade em

que o talude se encontra no momento da observação no campo. Devido a mudanças sazonais e condições ambientais da região o deslocamento pode estar ativo ou inativo, ser recorrente ou não, e a classificação é feita de acordo com essas considerações (Tabela 8).

Tabela 8 - Estado de atividade do escorregamento (GEO-RIO, 2014)

Estado de atividade	Descrição
Ativo	Está atualmente em movimento.
Paralisado	Moveu-se nos últimos 12 meses, mas não está ativo no presente.
Reativado	É um ativo que estava inativo.
Inativo	Não se moveu nos últimos 12 meses.
Adormecido	Inativo que pode ser reativado por suas causas originais, ou por outras causas.
Abandonado	Inativo que não está mais afetado pelas causas originais.
Estabilizado	Inativo que está protegido de suas causas originais por medidas corretivas artificiais.
Reliquiar	Escorregamento inativo que se desenvolveu sob condições climáticas e geomorfológicas consideravelmente diferentes das do presente. São também denominados movimentos de massas fósseis.

Adicionalmente, pode-se classificar a profundidade da ruptura no terreno devido ao deslocamento da massa de solo, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação quanto à profundidade dos movimentos de massa (Gerscovich, 2009)

Nomenclatura	Profundidade
Superficial	< 1,5m
Raso	1,5m a 5m
Profundo	5m a 20m
Muito profundo	> 20m

2.3. MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Nem sempre é possível prever a geometria da superfície de ruptura da massa de solo de um talude, especialmente em casos de corridas de detritos e rastejos.

Porém, na maioria dos casos é possível prever como será a geometria da superfície de ruptura, pois é previsível e bem definida.

Os métodos de análise podem ser utilizados para verificar as condições de taludes existentes ou projetados ou para retroanalisar casos de ruptura. Os métodos de análise de estabilidade de taludes são divididos em duas categorias: métodos determinísticos, nos quais a medida da segurança do talude é feita em termos de um fator de segurança e métodos probabilísticos, nos quais a medida de segurança é feita em termos da probabilidade ou do risco de ocorrência da ruptura (GEO-RIO, 2000 *apud* Dutra, 2013).

Em geral, as análises são realizadas comparando-se as tensões cisalhantes mobilizadas com resistência ao cisalhamento. Com isso, define-se um fator de segurança (F.S.) que por definição é a razão entre a resistência disponível e a resistência necessária para manter o equilíbrio.

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad \text{Equação 3}$$

A NBR 11682/2009 recomenda fatores de segurança admissíveis para serem adotados em projetos de estabilidade de taludes com a finalidade de incobrir as incertezas geotécnicas e as presentes nas diversas etapas de projeto e construção (Tabela 10). Essa escolha de fator de segurança a ser adotado contempla a análise a partir da possibilidade de perda de vidas humanas e de danos materiais e ambientais.

No presente trabalho serão abordados e utilizados apenas os métodos determinísticos. Os tipos de análise do ponto de vista determinístico são a teoria de equilíbrio limite e a análise de tensões (Método dos Elementos Finitos – MEF).

Tabela 10 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos (NBR 11682/2009)

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

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10%. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico constante no Anexo D da NBR11682:2009.

NOTA 2 No caso de instabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incluindo os parâmetros de peso específico, ângulo de atrito e coesão em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser julgado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejos, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

2.3.2. EQUILÍBRIO LIMITE

O Equilíbrio Limite é considerado um método determinístico, em que despreza-se a variabilidade natural dos parâmetros e adotam-se valores que sejam perfeitamente representativos dos solos envolvidos. Os resultados da análise são geralmente feitos em termos de um fator de segurança que é a razão entre as forças estabilizantes e forças instabilizantes.

O método de análise por equilíbrio limite consiste em considerar o solo como um material rígido perfeitamente plástico, admitindo o seu comportamento como um corpo rígido que pode escorregar sobre uma superfície de geometria conhecida e que todos os elementos ao longo dessa superfície atingem ao mesmo tempo a condição de $FS=1,0$.

Neste tipo de análise, adotam-se as seguintes premissas:

- A superfície potencial de ruptura é bem definida e previamente conhecida;

- A massa de solo acima da superfície de ruptura é considerada como um corpo livre rígido;
- O fator de segurança é constante ($FS=1,0$) ao longo da superfície potencial de ruptura,
- A estabilidade do maciço é calculada através do equilíbrio de forças e momentos.

2.3.3. ANÁLISE DE TENSÕES – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Estudos de estabilidade pelo Método dos Elementos Finitos são realizados por programas computacionais que são baseados na análise da tensão x deformação do solo, fornecendo resultados de tensão, deformação e deslocamento de uma estrutura. Este tipo de análise auxilia a identificar pontos de concentração de tensão e entender o comportamento da estrutura diante de um carregamento, condições de fluxo e outros tipos de variáveis.

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento matemático que subdivide em partes menores o domínio de um problema, sendo assim, as etapas de análise são: definir as propriedades do material, fazer a malha do modelo de elementos finitos, definir as cargas e condições de contorno e, por fim, rodar a análise de estabilidade.

As principais vantagens da utilização do MEF para verificar a estabilidade de taludes são pelo fato de conseguir incorporar na análise as seguintes questões:

- Não linearidade da curva tensão x deformação;
- Anisotropia;
- Heterogeneidade;
- Nível d'água;
- Geometrias irregulares;
- Carregamentos;
- Condições de contorno complexas;
- Etapas construtivas.

O programa computacional mais utilizado para resolver problemas pelo MEF é o PLAXIS que foi desenvolvido para análises de problemas bidimensionais (Brinkgreve *et al*, 2017).

Com o *software* PLAXIS é possível confrontar os estados de tensão do solo com a sua resistência ao cisalhamento e os resultados mostram as regiões plastificadas, permitindo assim, delimitar a região potencial de ruptura. Além disso, também se verificam as zonas onde há tendência ao desenvolvimento de tensões de tração no maciço.

O programa PLAXIS não possui elemento específico para representar o grampo, no entanto, alguns elementos geométricos podem ser utilizados para representá-lo, como elementos de barra ou geotêxteis. No caso de interfaces solo-elemento, o programa disponibiliza um elemento específico (Elemento de Interface), regido pelo modelo elastoplástico em que os níveis de tensão correspondentes aos comportamentos elástico e plástico são definidos a partir do critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Segundo Gerscovich *et al* (2005), para representar os trechos dos grampos no PLAXIS é recomendada a utilização de elementos tipo geotêxtil, acrescidos de interface. Seabra (2015) utiliza o elemento barra acrescidos de interface em seu trabalho de retroanálise de uma obra instrumentada para validação do programa PLAXIS e obtém resultados satisfatórios.

3. DIMENSIONAMENTO INTERNO DO SOLO GRAMPEADO

É fundamental o conhecimento ou estimativa de certos parâmetros geotécnicos para se realizar o dimensionamento preliminar ou definitivo de uma estrutura de solo grampeado. Além dos parâmetros do solo, é essencial conhecer o valor do atrito solo x grampo, denominado q_s , que pode ser obtido a partir de ensaios de arrancamento ou correlações empíricas existentes na literatura.

A determinação do comprimento dos grampos, espaçamento vertical e horizontal entre grampos, ângulo de inclinação dos grampos e da superfície e inclinação do talude também são elementos importantes para o dimensionamento de estruturas de solo grampeado. O presente trabalho tem como objetivo executar análises paramétricas, de forma a avaliar a influência da variação desses parâmetros na face do talude e na sua estabilidade.

3.1 ATRITO UNITÁRIO SOLO X GRAMPO (q_s)

Visando a maior confiabilidade no parâmetro de atrito solo x grampo a ser adotado em projeto, é necessária a realização de ensaios de arrancamento, cuja finalidade é, para cada carga de tração aplicada na cabeça do grampo, registrar o deslocamento de arrancamento e obter a curva carga x deslocamento. A partir da carga máxima de tração aplicada no grampo durante o ensaio, é possível definir a resistência ao arrancamento (q_s) pela expressão:

$$q_s = \frac{T_{m\acute{a}x}}{\pi D L_{ancorado}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

q_s : Resistência ao atrito mobilizada (atrito unitário solo x grampo na ruptura);

$T_{m\acute{a}x}$: Máxima carga axial de tração no grampo;

D : Diâmetro do furo de perfuração;

$L_{ancorado}$: Comprimento ancorado do grampo.

Clouterre (1991) menciona que a mobilização do atrito lateral solo x grampo pode ser representada pela lei bilinear de Frank e Zhao (1982). Essa lei representa na

curva tensão cisalhante x deslocamento (τ x y) um valor limite de q_s dividido por duas linhas retas que se interceptam no ponto $q_s/2$. A inclinação das duas retas é determinada de acordo com a Figura 26. A curva característica da lei de Frank e Zhao apresenta dois parâmetros fundamentais, sendo eles: k_β , que corresponde à inclinação inicial da curva carga de tração x deslocamento e q_s , o atrito unitário solo x grampo na ruptura.

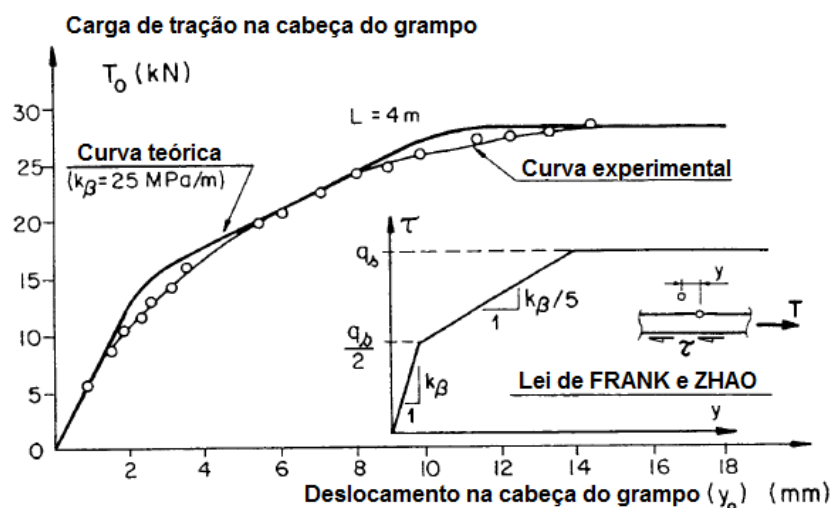


Figura 26 - Modelagem da curva experimental do ensaio de arrancamento pela lei de Frank e Zhao (1982). (Clouterre, 1991)

Segundo Lima (2007), como estimativa preliminar de valores referentes ao atrito solo x grampo (q_s) para a aplicação em projetos, Ortigão (1997) sugere a seguinte correlação em função do valor de N_{SPT} :

$$q_s = 50 + 7,5 N_{SPT} \quad (\text{kPa}) \quad \text{Equação 5}$$

Ortigão *et al.* (1997) analisaram os ensaios de arrancamento realizados por Ortigão (1997) e sugeriram a correção da correlação do valor de q_s conforme Figura 27:

$$q_s = 67 + 60 \ln(N_{SPT}) \quad (\text{KPa}) \quad \text{Equação 6}$$

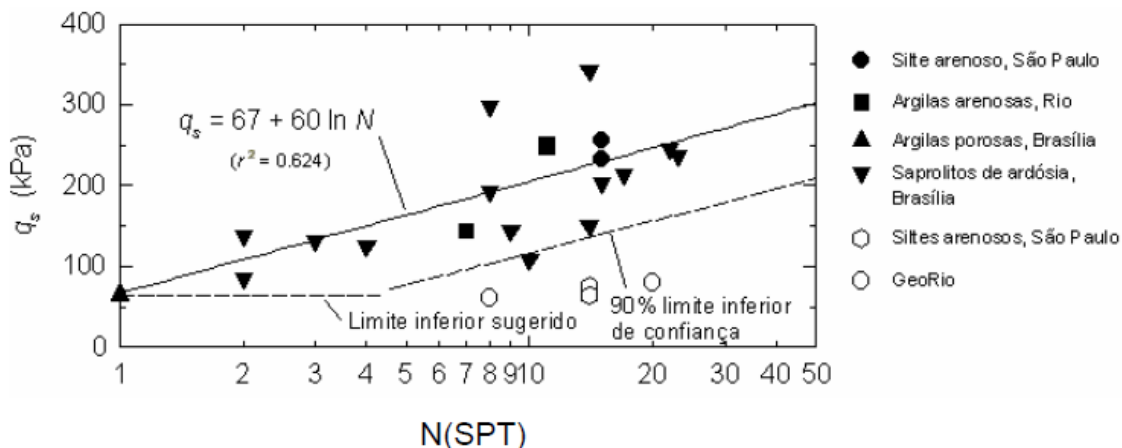


Figura 27 - Correlações empíricas para a resistência ao arrancamento do grampo q_s devido a interação solo x grampo (Ortigão *et al*, 1997 apud Springer, 2001)

Outra correlação empírica do valor de q_s apresentada na literatura em função do N_{SPT} é apresentada por Springer (2006) a partir da análise de diversos ensaios de arrancamento em solo residual de gnaiss (Figura 28):

$$q_s = 45,12 \cdot \ln(N_{SPT}) - 14,99 \quad (KPa) \quad \text{Equação 7}$$

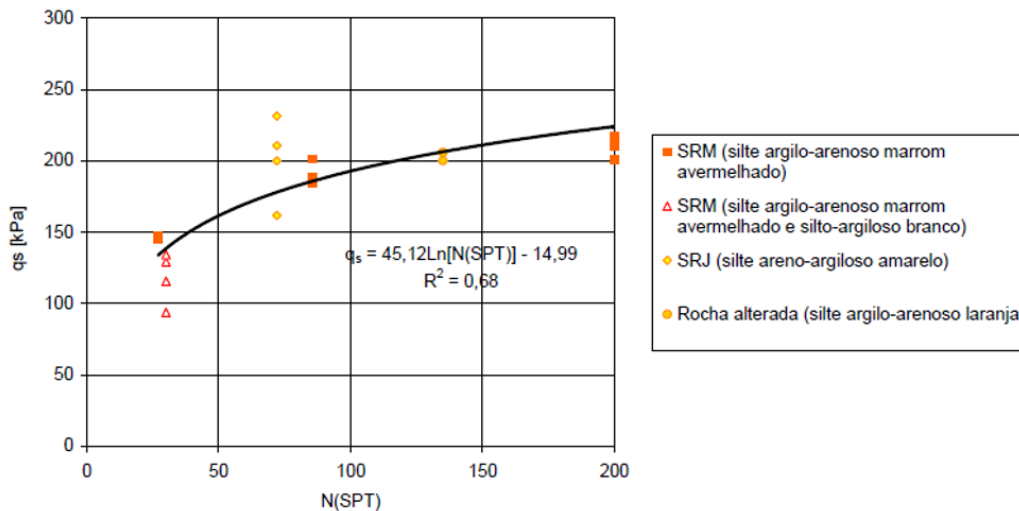


Figura 28 - Correlação entre q_s e o número de golpes N_{SPT} para solo residual de gnaiss (Springer, 2006)

Clouterre (1991) também apresenta gráficos onde é possível obter valores preliminares de q_s para elaboração de projeto de solo grampeado através de correlação

com a pressão limite do pressiômetro de Ménard (p_1). Os gráficos expostos no projeto francês para a estimativa de q_s são específicos para cada tipo de solo, e estão apresentados na Figura 29.

Lima (2007) faz uma adaptação dos gráficos de solos arenosos e argilosos introduzindo valores de N_{SPT} e explica que essas correlações têm pouca utilidade no Brasil, devido o fato dos ensaios pressiométricos serem raramente realizados.

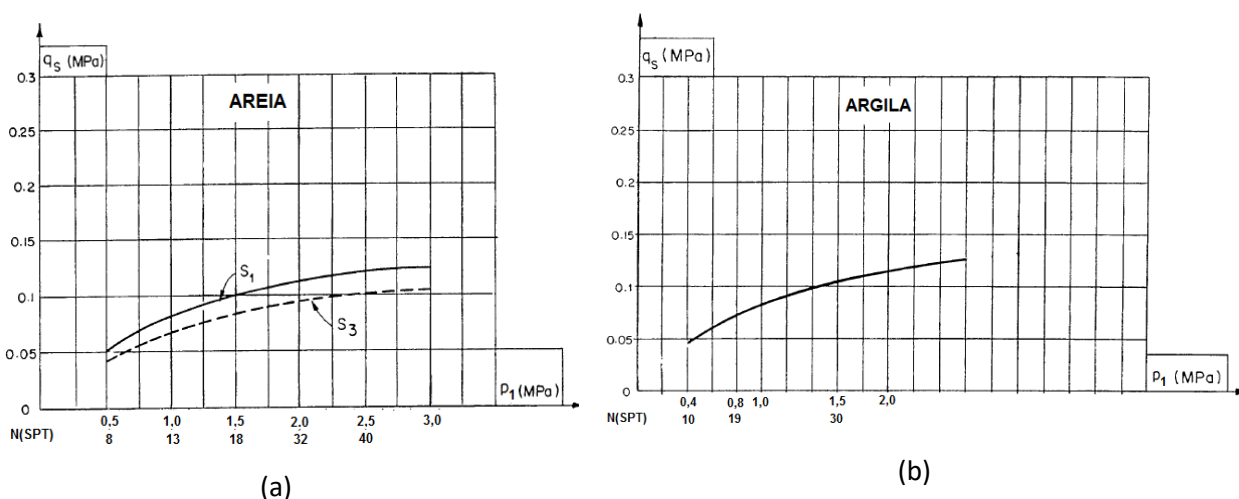


Figura 29 - Correlação entre q_s e p_1 para: (a) solos arenosos e (b) solos argilosos (Adaptado de Clouterre, 1991 por Lima, 2007)

Byrne *et al* (1996) sugerem algumas faixas de valores de q_s de acordo com um banco de dados disponível na literatura para solos coesivos e não coesivos (granulares) conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Valores preliminares de q_s para (a) solos não coesivos (granulares) e (b) solos coesivos (Byrne, 1996)

Tipo de Solo	Valor de q_s (kPa)
Silte não plástico	20 a 30
Areia pouco compacta e/ou Areia siltosa e Silte arenoso	50 a 75
Areia siltosa compacta c/ pedregulhos	80 a 100
Areia siltosa muito compacta c/ pedregulhos	120 a 240

(a)

Tipo de Solo	Valor de q_s (kPa)
Argila rijá	40 a 60
Argila siltosa rijá	40 a 100
Argila arenosa rijá	100 a 200

(b)

GEO-RIO (2014) apresenta um gráfico que correlaciona valores de q_s e N_{SPT} , reunindo resultados obtidos por diversos autores de ensaios de arrancamento no Brasil. Além disso, destaca que estabelecer uma correlação entre esses dois parâmetros não é simples, como pode ser observado na Figura 30. A Tabela 12 resume as correlações empíricas de q_s , e as respectivas referências.

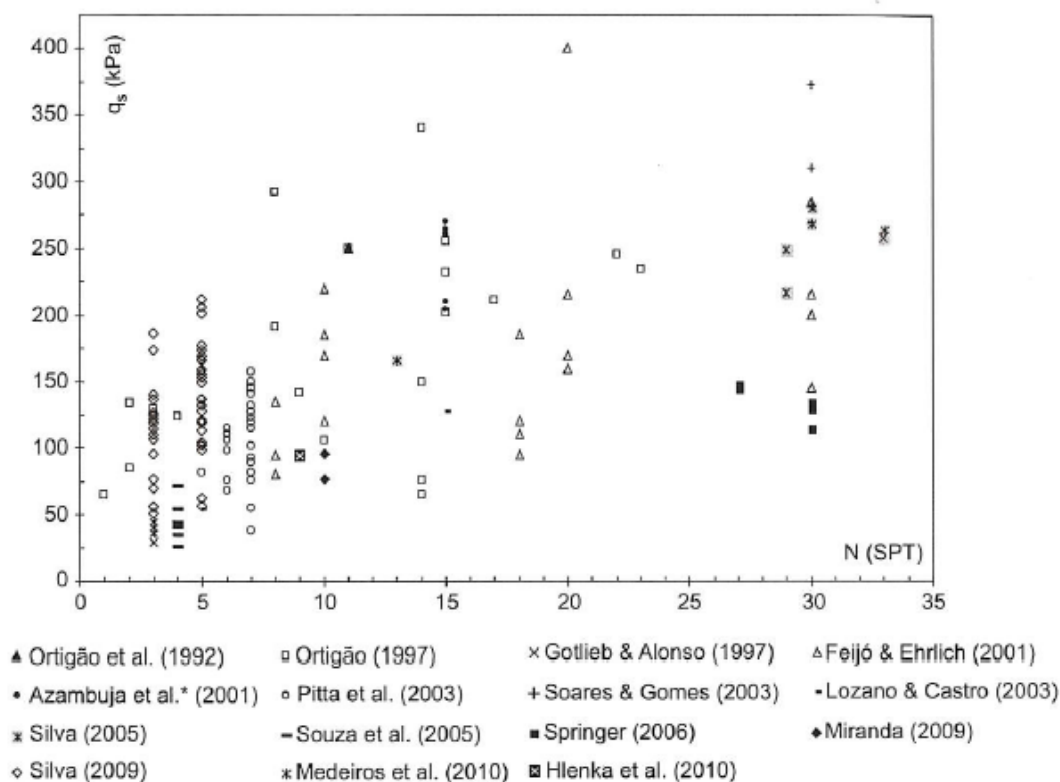


Figura 30 - Resultados de ensaios de arrancamento no Brasil (GEO-RIO, 2014)

Tabela 12 - Resumo de correlações empíricas disponíveis na literatura para a determinação do parâmetro q_s

Referência	Correlação
Frank e Zhao (1982)	Figura 27
Clouterre (1991)	Figuras 30
Byrne (1996)	Tabela 11
Ortigão (1997)	$q_s = 50 + 7,5 N_{SPT}$
Ortigão et al (1997)	$q_s = 67 + 60 \ln(N_{SPT})$
Springer (2006)	$q_s = 45,12 \cdot \ln(N_{SPT}) - 14,99$
GEO-RIO (2014)	Figura 31

3.2. REGIME ELÁSTICO NOS GRAMPOS

Clouterre (1991) mostra que na vizinhança da região onde se encontra a superfície de ruptura, uma zona de cisalhamento se desenvolve e as deformações nessa parte do solo são concentradas, devido à ruptura dos grampos (Figura 31). Além disso, a magnitude desses esforços está diretamente ligada à rigidez do grampo e a relação entre a direção do reforço e da deformação principal maior, funcionando de maneira similar a estacas carregadas.

Feijó (2007) explica que as solicitações nos grampos são, na maioria dos casos, os esforços normais. No entanto, possíveis solicitações transversais ao grampo podem promover o surgimento de esforços cisalhantes e fletores.

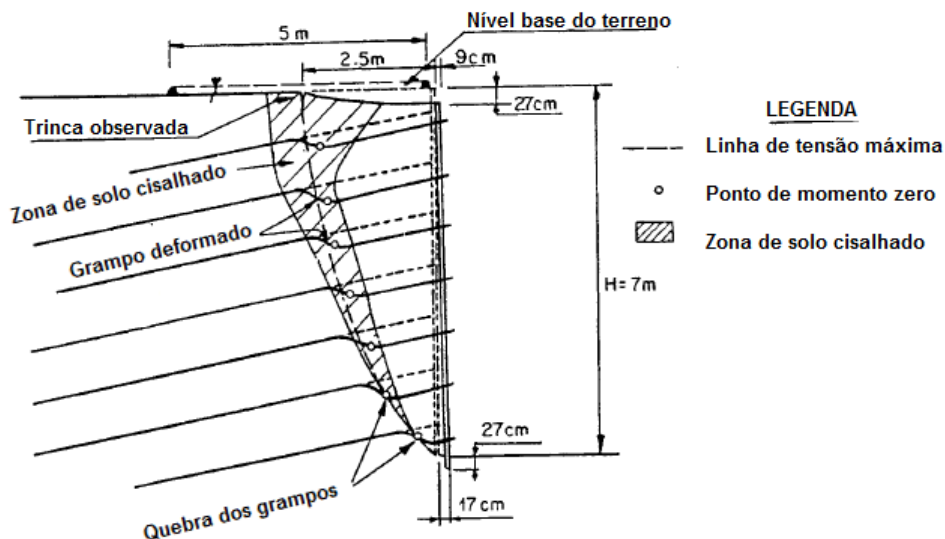


Figura 31 - Ruptura do solo grampeado experimental número 1 em 1986 (Clouterre, 1991)

Nesse caso, as deformações nos grampos podem ser calculadas como sendo estacas solicitadas a carregamento horizontal lateral na cabeça do grampo.

Segundo Mitchell e Villet (1987), a equação diferencial de momento elástico do grampo fornece uma solução para a distribuição das tensões cisalhantes e momentos fletores como função do deslocamento relativo dos grampos. A solução dessa equação introduz o conceito de comprimento de transferência de esforços l_o que caracteriza a rigidez relativa da barra de aço e do solo:

$$l_o = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k_s D}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

l_o : Comprimento de transferência de esforços do grampo;

EI : Rigidez do grampo;

k_s : Coeficiente de reação horizontal;

D : Diâmetro do grampo.

Clouterre (1991) explica que quando o comprimento L do reforço supera $3l_o$, em ambos os lados da superfície de ruptura, o grampo pode ser considerado como infinitamente longo e sendo simétrico em relação à zona de ruptura.

Mitchell e Villet (1987) afirmam que a inclinação e a rigidez do grampo geram um efeito significativo no mecanismo de ruptura. A superfície de ruptura do solo, com grampos flexíveis e rígidos, é bem similar, porém, no caso de grampos flexíveis a superfície de ruptura do solo se desenvolve ao longo da superfície potencial da ruptura dos grampos, já no caso de grampos rígidos esses pontos não coincidem.

Clouterre (1991) relata que a inclinação dos grampos pode otimizar a mobilização das tensões, porém, a inclinação acentuada dos grampos em direção a parte inferior do talude reduz as tensões mobilizadas e favorecem as tensões de cisalhamento e momentos fletores, comprometendo a estrutura.

Conforme resultados apresentados por Feijó e Ehrlich (2006), é possível observar que a contribuição dos momentos nas tensões internas variou entre 22% e 32%, apresentando resultados crescentes com a inclinação dos grampos. Além disso, os autores concluem que as tensões induzidas pelos momentos fletores nos grampos não se mostraram desprezíveis comparativamente aos valores mobilizados pelas forças axiais.

Feijó (2007) através da monitoração experimental de grampos em solo residual gnáissico não saturado conclui que as deformações (cargas de tração) mobilizadas apresentam-se máximas na seção com grampos inclinados de 15° , indicando assim, uma maior eficiência dos grampos nessa inclinação.

3.3. ESFORÇOS NOS GRAMPOS

A determinação da capacidade estrutural dos grampos é fundamental para a análise de estabilidade da estrutura de contenção em solo grampeado.

Com a finalidade de evitar gastos desnecessários com grampos demasiadamente longos ou superdimensionados, a GEO-RIO (2014) recomenda verificar a adequação dos valores de projeto e correções através da realização de

ensaios de arrancamento durante a obra, visando verificar o valor do parâmetro q_s . A confirmação dos valores adotados em projeto é feita pela conferência dos valores adotados e dos obtidos no ensaio de arrancamento em pelo menos dois grampos ou em 1% dos grampos executados.

A barra de aço empregada no ensaio de arrancamento deve ser superdimensionada para que o ensaio atinja preferencialmente a ruptura do trecho injetado. O procedimento de instalação dos grampos que sofrerão arrancamento deve ser o mesmo daqueles que serão executados na obra.

A carga máxima de ensaio ($T_{m\acute{a}x}$) é estabelecida pelo limite de resistência da barra de aço, ou seja, é determinado pela seguinte equação:

$$T_{m\acute{a}x} = 0,9 f_{yk} A_s \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$T_{m\acute{a}x}$: Carga máxima de tração resistida pelo aço;

f_{yk} : Tensão de escoamento característica do aço;

A_s : Área da seção transversal da barra de aço.

Ainda de acordo com a GEO-RIO (2014), as cargas deverão ser aplicadas em pequenos estágios que não excedam 20% da carga máxima esperada, aguardando-se pelo menos 30 minutos para estabilização das deformações.

O atrito unitário máximo na interface solo-grampo é definido pela equação:

$$T_{m\acute{a}x} = \pi D q_s L_a \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$T_{m\acute{a}x}$: Força máxima de tração aplicada no ensaio;

D : Diâmetro do furo;

q_s : Atrito unitário máximo na interface solo-grampo;

L_a : Comprimento ancorado do grampo.

Detalhes da experiência em ensaios de arrancamento em grampos podem ser obtidos em Feijó (2007) e Springer (2006).

A fim de garantir a confiabilidade na capacidade estrutural dos grampos, diante das incertezas na determinação da carga nos grampos, recomenda-se adotar um fator de segurança sobre a tensão máxima de tração suportada pelo grampo. Baêta e Sartor (1999) sugerem FS a serem adotados de acordo com o tipo de material (Tabela 13). Com isso, a tensão admissível no grampo permanente é:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{F.S.} = \frac{f_{yk}}{\gamma_c F.S.} \cong \frac{0,9 f_{yk}}{F.S.} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

σ_{adm} : Tensão admissível do grampo;

σ_{rup} : Tensão de ruptura do grampo;

f_{yk} : Tensão de escoamento característica do aço;

γ_c : Coeficiente de ponderação das resistências no estado limite último (NBR 6118/2003);

F.S.: Fator de Segurança.

Tabela 13 – Sugestão de Fatores de Segurança de acordo com o tipo de material (Baêta e Sartor, 1999)

Material	F.S.
Aço	1,5 a 2,0
Ferro fundido	4,0 a 8,0
Madeira	2,5 a 7,5
Alvenaria	5,0 a 20,0

O fato dos grampos não serem protendidos geram mais incertezas na determinação do valor das cargas dos grampos (T_i) que devem ser consideradas nas análises de estabilidade (Figura 32).

GEO-RIO (2014) sugere considerar os seguintes valores:

$$T_i = T_p \text{ se } T_p < T_r ; \quad \text{Equação 12}$$

$$T_i = T_r \text{ se } T_r < T_p . \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

T_p : Forças de arrancamento do grampo;

T_r : Força de ruptura do aço.

T_i : Força de tração no grampo “i”.

As forças T_p e T_r são determinadas pelas fórmulas já mencionadas anteriormente. Considerando o fator de segurança, as fórmulas são determinadas da seguinte maneira:

$$T_p = \frac{q_s \pi D L_e}{F.S.} \quad \text{Equação 14}$$

$$T_r = \frac{0,9 f_{yk} A_s}{F.S.} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

q_s : Atrito unitário máximo na interface solo-grampo;

D : Diâmetro do furo;

L_e : Comprimento da parcela do grampo embutida na zona resistente;

f_{yk} : Tensão de escoamento característica do aço;

A_s : Área da seção transversal da barra de aço.

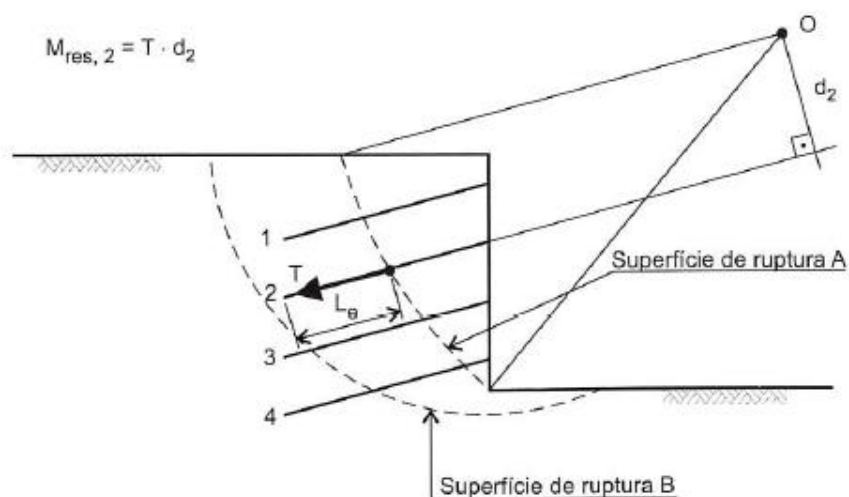


Figura 32 - Efeito da tensão no grampo (GEO-RIO, 2014)

Ortigão *et al* (1993) mencionam critérios de análise de estabilidade da estrutura de solo grampeado e mostram a hipótese de multicritérios proposta por Schlosser (1983) que considera a flexão composta nos grampos (Tabela 14).

Tabela 14 - Multicritério: hipóteses (Schlosser, 1983 apud Ortigão *et al* 1993)

	Critério		Modelo matemático
1	Resistência dos elementos de reforço	Tração	$T_n \leq A_s f_y$
		Cisalhamento	$T_c \leq R_c = A_s f_y / 2$
2	Atrito solo-grampo		$T_{\max} \leq q_s A_{lat}$
3	Tensão normal solo-grampo		$p \leq p_{\max}$
4	Resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura		$\tau = \sigma' t g \phi'$

3.4. MÉTODOS DE ESTABILIDADE DE SOLO GRAMPEADO

Na análise de estruturas de solo grampeado podem ser utilizados os métodos tradicionais de estabilidade de taludes, adaptados de forma a incluir o efeito do reforço. Esses procedimentos têm a vantagem de permitir a consideração das condições de equilíbrio interno e externo, heterogeneidades do solo e nível d'água.

Segundo Mitchell e Villet (1987), geralmente são usados dois tipos de abordagem para o dimensionamento de estruturas em solo grampeado:

- I. A primeira abordagem é baseada na análise de equilíbrio local da zona ativa do maciço, que é limitada pela superfície de ruptura do solo;
- II. A segunda abordagem é baseada na estabilidade global da estrutura do solo grampeado.

De acordo com os métodos de análise que utilizam a primeira abordagem, a superfície de ruptura se desenvolve no solo ao longo da linha de tensões máximas que se assume como circular. Admite-se que a ruptura é causada pela quebra progressiva

das inclusões e que a resistência ao cisalhamento do solo é inteiramente mobilizada ao longo da superfície potencial de ruptura.

Na segunda abordagem, métodos clássicos de análise de estabilidade podem ser adaptados para avaliar o fator de segurança de acordo com uma superfície de ruptura circular ou em forma de cunha, levando em consideração as tensões e as resistências ao cisalhamento e arrancamento. Esse segundo tipo de análise não fornece tensões máximas em cada grampo, mas faz a avaliação global do fator de segurança de acordo com a ruptura do solo e do reforço e é comumente mais utilizado.

No presente trabalho, serão apresentados os métodos de Davis (1981), Francês (1983), Alemão (1979) e o método de Juran (1990).

3.4.1. MÉTODO DE DAVIS

O Método de Davis, desenvolvido por Shen *et al* (1981b), muito difundido nos EUA, tem sua origem na Universidade da Califórnia, em Davis. Esse método assume uma superfície de ruptura aproximada a uma parábola passando pelo pé da face do talude e com curvatura em relação ao eixo vertical.

Neste método o solo é considerado como dois blocos separados por uma linha vertical passando pela extremidade dos grampos e a superfície de ruptura passa atrás do volume de solo reforçado (Figura 33).

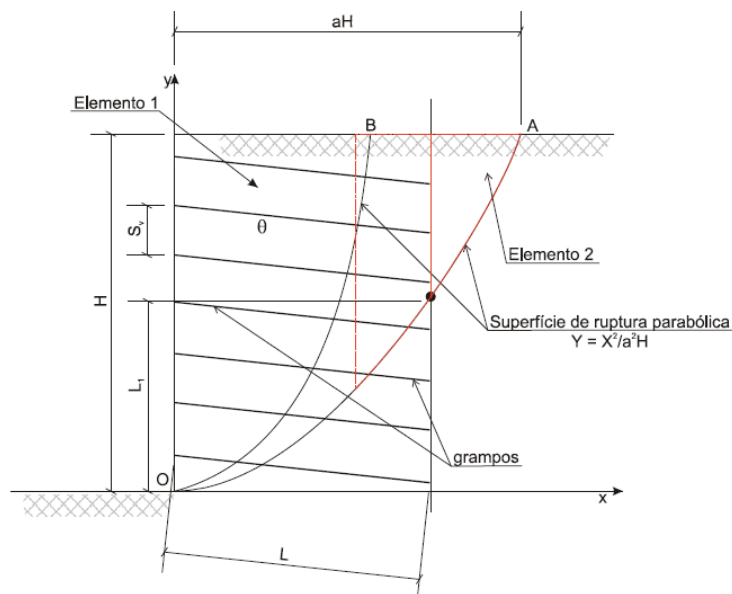
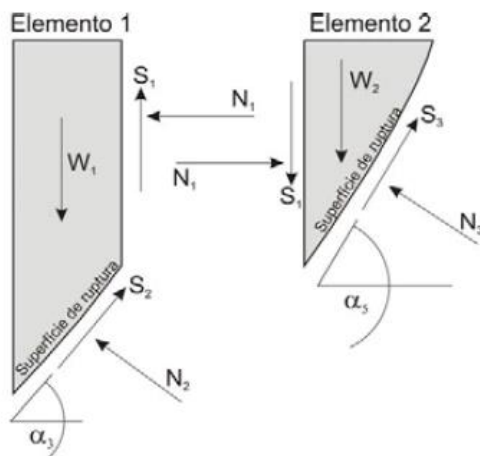


Figura 33 - Método de Davis proposto por Shen *et al* (1981) adaptado por Feijó (2007)

As componentes das forças normal e tangencial que atravessam a superfície de ruptura são adotadas como sendo forças de resistência mobilizada no solo (Figura 34).



W: Peso da massa de solo; S: Força Tangencial; N: Força Normal

Figura 34 - Diagrama de corpo livre quando a superfície de ruptura se estende além da massa de solo reforçado (Shen *et al*, 1981 adaptado por Feijó, 2007)

Mais detalhes sobre este método são descritos por Clouterre (1991), Mitchell e Villet (1987) e Feijó (2007).

3.4.2. MÉTODO FRANCÊS

O método de análise de estabilidade Francês foi proposto por Schlosser (1983), e considera a massa de solo reforçado como sendo um monólito. Este método segue os procedimentos básicos propostos por Shen *et al* (1981b) no método de Davis, porém, por levar em consideração quatro critérios de ruptura no dimensionamento é conhecido por método multicritério.

Os quatro critérios são os seguintes:

- Resistência ao cisalhamento do solo;
- Atrito solo x grampo;
- Interação normal entre solo e grampo;
- Força do grampo.

3.4.3. MÉTODO ALEMÃO

O método alemão, desenvolvido por Stocker *et al.* em 1979, propõe o dimensionamento do solo grampeado pelo equilíbrio limite considerando a superfície de ruptura bilinear. Este método foi desenvolvido a partir da experiência em testes de laboratórios e modelos reduzidos e foi comparado com testes em estruturas em tamanho real (Gässler e Gudehus, 1981).

O fator de segurança global da estrutura é definido pela razão entre as forças resistentes (reação do solo ao longo da superfície de ruptura, tensão nos grampos) e as forças instabilizantes (peso da massa de solo e carregamentos). A resistência na ruptura T_R em cada grampo é considerada igual a menor resistência, por quebra dos grampos por tração T_G ou por arrancamento T_L . Os momentos fletores nos grampos são desprezados.

O cálculo é feito considerando o equilíbrio de dois blocos deslizando em relação um ao outro seguindo uma linha reta vertical, assumindo que o solo é homogêneo e sem nível d'água. Se o solo for heterogêneo, ou seja, com características mecânicas variáveis, recomenda-se que apenas um valor seja utilizado, ponderado pelo valor de resistência ao cisalhamento.

3.4.4. MÉTODO DE JURAN

Juran (1990) desenvolveu um método de equilíbrio limite para calcular o ponto de ruptura para estruturas em solo grampeado, que é semelhante ao que ele desenvolveu para a terra reforçada (Juran *et al*, 1977). As possíveis superfícies de ruptura são consideradas circulares logarítmicas e a massa de solo é dividida em fatias paralelas aos grampos.

A hipótese é formulada considerando solo homogêneo e sem nível d'água, e que a componente horizontal E_H da força entre duas fatias permanece constante (Figura 35). Além disso, assume-se que os pontos de tração máxima e a força máxima de cisalhamento nas linhas de grampo coincidem com a superfície potencial de ruptura, ou seja, correspondem ao fator de segurança global mínimo.

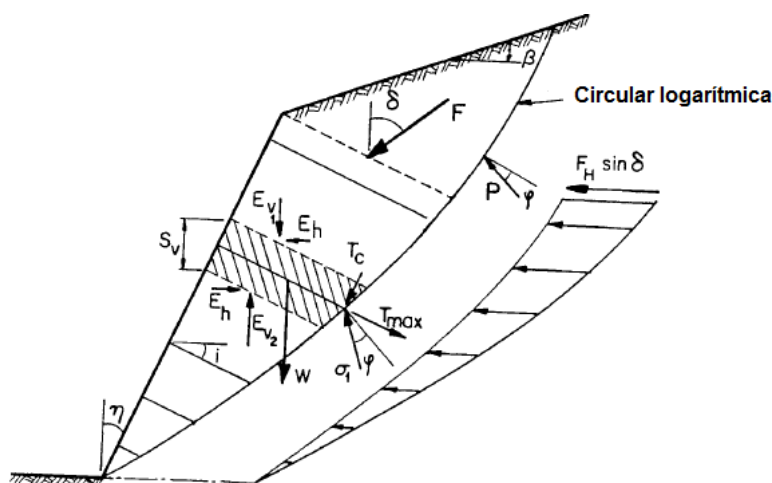


Figura 35 - Método de Juran, 1990 (Clouterre, 1991)

A hipótese proposta por Juran (1990) é que a resistência máxima ao cisalhamento do solo é mobilizada em condições de serviço ao longo da linha de tensão máxima, independentemente do valor do fator de segurança global. Segundo o projeto Clouterre (1991), esta suposição baseada em uma análise de resultados de algumas estruturas em tamanho real (Juran *et al*, 1988) precisa ser justificada, tanto teoricamente como experimentalmente.

3.5. RESISTÊNCIA DA FACE

A face do solo grampeado, como já mencionado anteriormente, tem a função de garantir a estabilidade da massa de solo localizada entre os grampos e a proteção contra processos erosivos. No entanto, por absorver apenas pequenos carregamentos o faceamento não possui função estrutural e deve ser capaz de evitar rupturas localizadas e processos erosivos. Basicamente, no solo grampeado, os grampos estabilizam o maciço e o concreto projetado combate a instabilidade local da face.

Feijó (2007) explica que embora o modelo mecânico de solicitações do solo grampeado permita o seu uso sem qualquer função estrutural, habitualmente se faz a aplicação de uma face estrutural leve, normalmente em concreto projetado, sendo o grampo ligado ou não estruturalmente a esta face.

Comumente a face do talude é revestida com concreto projetado e deve ser dimensionada como laje de dimensões S_v , (espaçamento vertical dos grampos) x S_h , (espaçamento horizontal dos grampos) apoiada nas bordas sujeita a um carregamento distribuído provocado pelo empuxo entre os grampos (Figura 36).

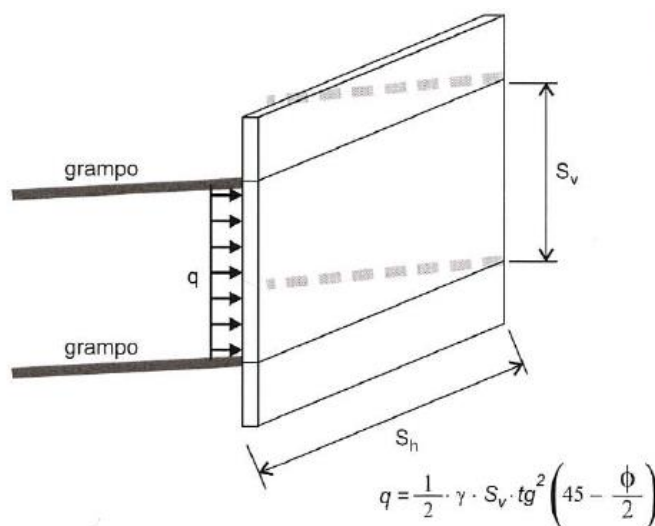


Figura 36 - Análise da estabilidade local do solo atrás da face (Mitchell e Villet, 1987 adaptado por GEO-RIO, 2014)

A função fundamental da face do solo grampeado é fornecer um confinamento lateral para o solo, garantindo equilíbrio entre o empuxo local q do solo (assumido uniforme) e a força T_o na cabeça do grampo (Clouterre, 1991):

$$q = \frac{1}{2} \gamma S_v \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

q : Empuxo local entre os grampos;

γ : Peso específico do solo;

S_v : Espaçamento vertical;

φ : Ângulo de atrito do solo.

Como o empuxo local e a tensão na cabeça do grampo devem estar em equilíbrio, o empuxo q também pode ser definido de acordo com a equação (Figura 37).

$$q = \frac{T_o}{S_h S_v} \quad \text{Equação 17}$$

Logo, o esforço normal na face é:

$$T_o = q S_h S_v = \frac{\gamma S_h S_v^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{Equação 18}$$

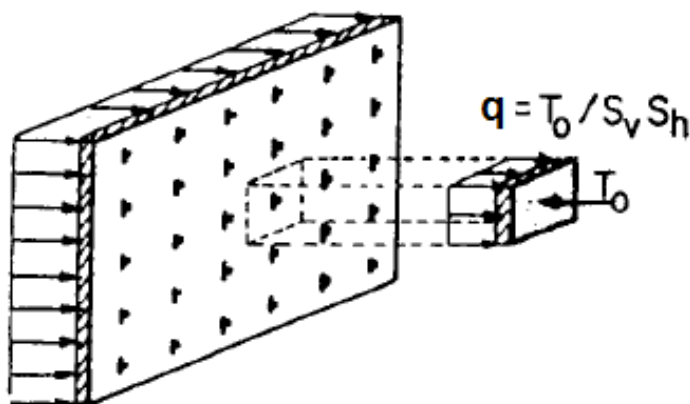


Figura 37 - Tensão na cabeça do grampo (Clouterre, 1991)

O dimensionamento da face do solo grampeado envolve a determinação das forças na cabeça do grampo e o empuxo na face. O valor de T_o é deduzido do valor da

força de tensão máxima $T_{máx}$ que pode ser mobilizada considerando um único valor para a relação $T_o/T_{máx}$ na face.

Na prática, as tensões na face do talude não se distribuem de maneira uniforme, como sugerido. Feijó (2007) explica que essas tensões dependem da deformabilidade e dos deslocamentos locais da face. Além disso, segundo Clouterre (1991), existe a tendência ao desenvolvimento do efeito de arqueamento entre os grampos, provocando concentrações de tensões nas suas vizinhanças (Figura 38).

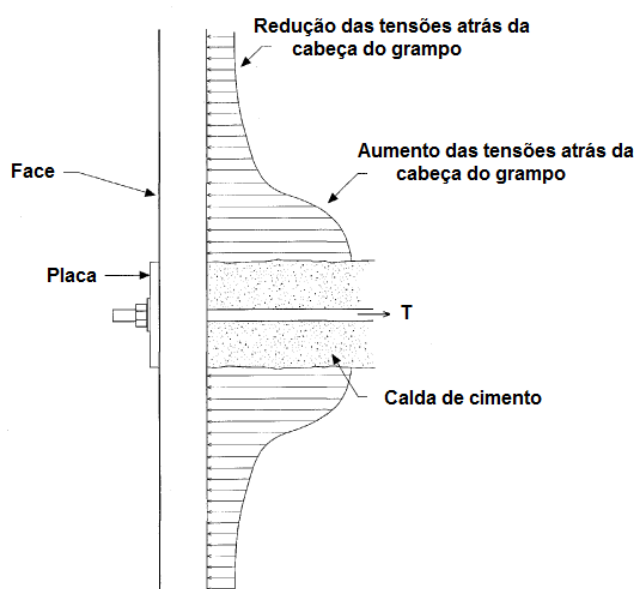


Figura 38 - Distribuição de tensões típicas na face de solo grampeado (Byrne, 1998)

Segundo Feijó (2007), o modelo mecânico do solo grampeado, associado a ancoragens passivas, resulta em tensões na face do talude muito inferiores às desenvolvidas em sistemas de contenções utilizando ancoragens ativas (cortinas atirantadas) ou estruturas convencionais de arrimo. Com isso, justifica-se a face do solo grampeado ajudar no combate à instabilidade local e não possuir função estrutural.

Mais detalhes sobre a resistência e dimensionamento da face do solo grampeado são apresentados por Mitchell e Villet (1987), Clouterre (1991), Byrne (1998), Feijó (2007), GEO-RIO (2014) e Seabra (2015).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISES NUMÉRICAS

4.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de análises paramétricas em perfil de talude com solo grampeado. A análise será executada a partir do programa computacional PLAXIS, baseado no método dos elementos finitos, a fim de avaliar a influência da face de uma estrutura em solo grampeado na estabilidade do talude.

A análise será realizada a partir da variação dos seguintes parâmetros:

- Inclinação dos grampos: 5°, 15° e 30°;
- Espaçamento vertical entre os grampos: 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m;
- Espessura da camada com solo pouco resistente: 1,0 m e 2,0 m;
- Coesão da camada de solo inferior ao solo pouco resistente: 15kPa e 30kPa.

Para o desenvolvimento da análise, os seguintes parâmetros serão considerados fixos:

- Inclinação do talude: 80°;
- Comprimento dos grampos: 10 m;
- Inclinação do terreno a montante: 0°;
- Espaçamento horizontal: 1,0 m;
- Altura do talude: 20 m.

A fim de se obter a melhor interpretação dos resultados, a escolha dos valores dos parâmetros variáveis de inclinação dos grampos e espaçamento vertical entre os grampos foram referentes a variações de extremos e que podem não ser usuais na prática.

4.2. PROGRAMA PLAXIS

O programa computacional PLAXIS (*Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*) é um pacote de elementos finitos desenvolvido para aplicações a problemas geotécnicos 2D pela *Technical University of Delft*, Holanda, desde 1987, e sucedida a partir de 1993 pela empresa comercial PLAXIS (Brinkgreve, 1999).

A utilização do *software* PLAXIS permite reproduzir de forma realista o comportamento mecânico de uma superestrutura, considerando a geometria da estrutura, as diferentes camadas de solo, além de possibilitar a ocorrência de deslocamentos relativos entre os diferentes componentes do sistema, de condições de contorno complexas, carregamentos estáticos ou dinâmicos, procedimentos de escavação ou aterros incrementais, entre outros.

O programa foi desenvolvido especificamente para análises do comportamento tensão vs deformação, estabilidade e fluxo em engenharia geotécnica. Os procedimentos de entrada permitem que os recursos de saída forneçam uma apresentação detalhada dos resultados computacionais (Brinkgreve, 1999). A estrutura computacional está dividida em 4 subprogramas: sub-rotina de entrada de dados (*Input*); cálculo (*Calculate*); saída de dados (*Output*) e edição de curvas (*Curves*).

Na sub-rotina de entrada de dados, são introduzidos os dados do problema, como geometria, parâmetros dos materiais, disposição dos elementos, modelos constitutivos, deslocamentos prescritos e condições de contorno. O processo de geração da malha é automático, sendo a geometria dividida em elementos triangulares isoparamétricos de seis ou quinze nós. A precisão dos resultados depende da forma e das dimensões da malha que representa o modelo. Malhas mais refinadas tendem a resultados mais acurados, mas demandam também maior esforço computacional. Por isso, o programa permite refinamento local (em regiões de maior interesse) ou global (Seabra, 2015).

O *software* atualmente traz implementadas as seguintes leis constitutivas para representação de relações tensão-deformação lineares ou não-lineares para a realização das análises numéricas:

- Modelo Linear Elástico;
- Modelo de Mohr-Coulomb;
- Modelo *Soft Soil*;
- Modelo de solo com endurecimento (*Hardening Soil Model* – HSM);
- Modelo de Hoek-Brown.

Na presente dissertação o modelo constitutivo usado para as análises paramétricas foi o modelo elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb. O modelo de Mohr-Coulomb tem como princípio básico o comportamento elastoplástico, isto é, define que as deformações são decompostas em duas parcelas: elástica e plástica. No comportamento elástico, as deformações são recuperadas, ou seja, são reversíveis, enquanto a plasticidade está associada ao desenvolvimento de deformações irreversíveis.

O princípio básico deste modelo elastoplástico tem como hipótese que o material se comporta como linear elástico até atingir a ruptura, definida pela envoltória de Mohr-Coulomb, e depois se mantém constante com o acréscimo de deformações plásticas (Figura 39).

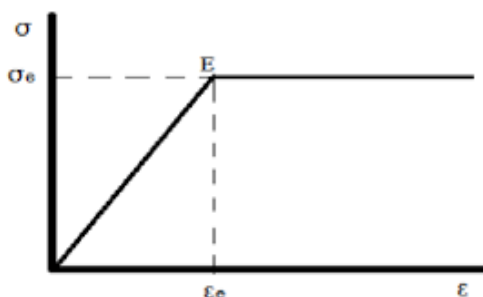


Figura 39 - Diagrama tensão-deformação de materiais elastoplástico

Neste trabalho, o grampo foi simulado a partir de elementos de barra, necessitando dos seguintes parâmetros: módulos de rigidez à flexão (EI) e rigidez axial

(EA), coeficiente de Poisson (ν) e o peso relativo (w). No meio contínuo, o elemento de barra se superpõe ao solo, como consequência, o cálculo de w é feito através da equação:

$$w = (\gamma_{concreto} - \gamma_{solo})x e \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

γ_i : Peso específico do material i ;

e : Espessura da barra de aço.

As camadas de solo foram representadas pelo modelo de Mohr-Coulomb, o qual requer o conhecimento dos seguintes parâmetros: γ_{sat} (peso específico saturado), γ_d (peso específico seco), ϕ (ângulo de atrito), c (coesão), k_x (permeabilidade horizontal), k_y (permeabilidade vertical), E (módulo de elasticidade), ν (coeficiente de Poisson) e ψ (ângulo de dilatância).

Elementos de interface também são aconselhados para emprego em problemas de interação solo-elemento. O modelo de Mohr-Coulomb é também utilizado para descrição do comportamento mecânico das interfaces, com as propriedades dos elementos de interface estimadas a partir das propriedades de resistência do solo através das seguintes equações:

$$c_{inter} = R_{inter} \cdot c_{solo} \quad \text{Equação 20}$$

$$tg \phi_{inter} = R_{inter} \cdot tg \phi_{solo} \leq tg \phi_{solo} \quad \text{Equação 21}$$

Onde R_{inter} representa o fator de redução de resistência nas interfaces. Valores típicos deste fator podem ser encontrados em diversas publicações da literatura e mesmo no próprio manual de utilização do PLAXIS.

Para as análises executadas no presente trabalho, foi adotado um fator de redução fixo de 1,0 para não permitir a perda de resistência na interface.

More (2003) sugere valores deste parâmetro variando de 0,8 a 1,0 para interface solo/geogrelha e 1,0 para interface solo/geotêxtil (Tabela 15).

Tabela 15 - Valores típicos do fator de redução de resistência R_{inter} (More, 2003)

Tipo de interface	R_{inter}
Areia / aço	2/3
Argila / aço	1/2
Areia / concreto	0,8 - 1,0
Solo / geogrelia	0,8 - 1,0
Solo / geotêxtil	1,0

4.2.1. GEOMETRIA DO MODELO DE CÁLCULO

A análise foi efetuada assumindo uma secção tipo perpendicular ao plano da estrutura, e as suas características mecânicas são definidas por metro linear. Foi definida também a malha de elementos finitos, cuja geometria consistiu em elementos triangulares de 15 nós.

A criação do modelo iniciou-se pela determinação das dimensões da malha. Considerou-se uma janela de largura variando de 0 a 80m e a altura variando de -20 a 20m, para que a distância da estrutura de contenção às fronteiras fosse grande o suficiente para reproduzir melhor e com rigor as condições reais. Esse procedimento evita a influência das condições de contorno nos resultados.

As condições do limite da geometria do modelo foram aplicadas recorrendo ao comando *Standart Fixities* da janela de *Input* do *software*. Assim, consideraram-se apoios móveis lateralmente, que só permitem deslocamentos verticais. Já nas condições dos limites da base do modelo, considerou-se um apoio fixo que impossibilita deslocamentos em qualquer direção.

Uma vez definida a janela, a malha e as condições de limite de geometria do modelo, passou-se então à definição do cenário geotécnico/geológico das análises a serem realizadas. Recorrendo ao comando *Geometry Line*, foram definidos os três tipos de solos do estudo (solo de fundação, solo mais resistente e solo menos resistente na face) e as suas respectivas espessuras de camadas (Figura 40). Como já mencionado anteriormente, a camada de solo menos resistente na face do talude varia sua espessura em 1,0 e 2,0 m.

A representação dos grampos (elemento barra) da estrutura de contenção no modelo foram realizadas com o recurso à ferramenta *Plate*.

Considerou-se que o nível freático se encontra coincidente com a base da geometria do modelo e, portanto, não influencia no cálculo do programa.

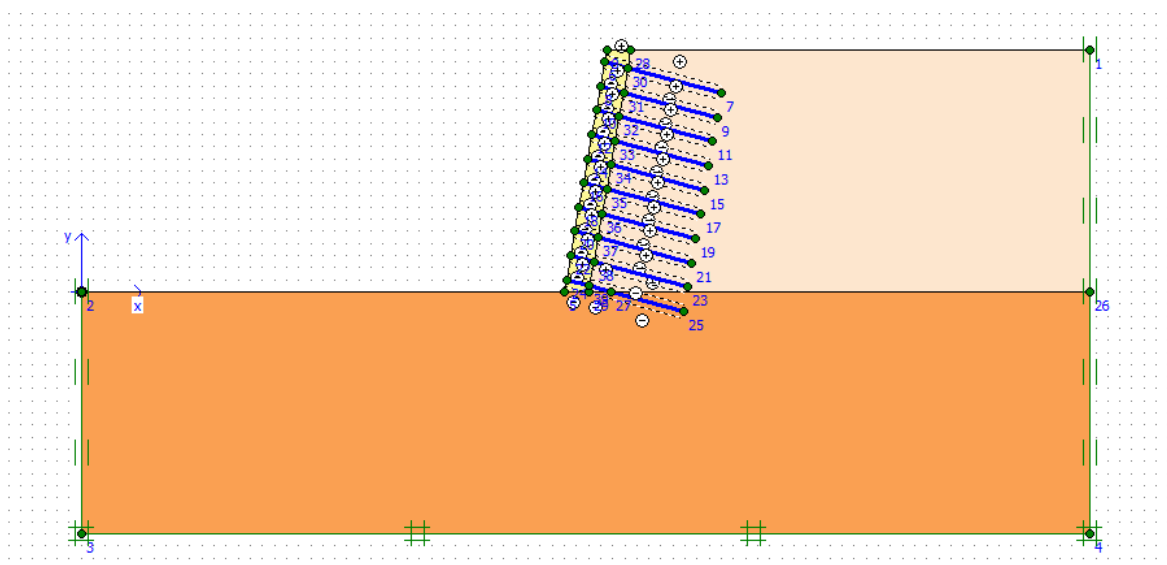


Figura 40 - Ilustração da modelagem numérica no programa PLAXIS

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS

Uma vez definida a geometria do modelo, procede-se à determinação dos diferentes parâmetros geotécnicos dos materiais do estudo. A resistência e rigidez dos materiais são caracterizadas por metro linear, uma vez que se considera uma análise bidimensional.

A caracterização do terreno começa pela definição do modelo constitutivo do solo, sendo que neste caso foi adotado o de Mohr-Coulomb. A Figura 41 ilustra os tipos de solo que serão adotados nas modelagens e os parâmetros, que são necessários para a modelagem neste modelo, já mencionados anteriormente, estão apresentados na Tabela 16.

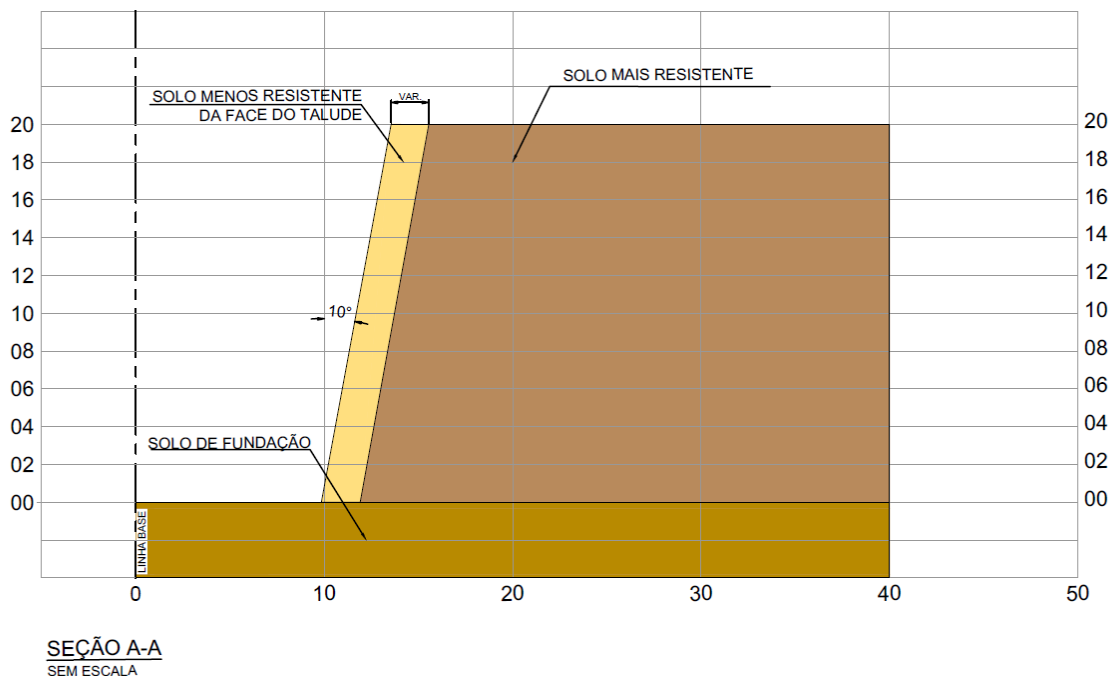


Figura 41 - Perfil de solo utilizado nas análises

Tabela 16 - Parâmetros geotécnicos do solo adotados neste trabalho

Parâmetros geotécnicos do solo							
Solo	Peso esp. (kN/m ³)	E (MPa)	v	Coesão (kPa)	Ang atrito (°)	Ang Dilat. (°)	kx =ky (m/dia)
Solo menos resistente	17	45	0,3	10	28	0	0
Solo mais resistente	18	45	0,3	15 e 30	33	0	0
Solo de fundação	22	1.000	0,2	30	38	0	0

Para a representação do grampo, os parâmetros foram definidos com base na rigidez à flexão (EI) e rigidez axial (EA), onde o momento de inércia do grampo e a área são expressos:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

Equação 22

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

Equação 23

Onde:

I: momento de inércia da barra de aço;

d: diâmetro da barra de aço;

A: seção da barra de aço.

A Tabela 17 reúne os parâmetros adotados para representação do grampo e o valor do parâmetro R_{inter} é igual a 1,0, já citado anteriormente.

Tabela 17 - Parâmetros do grampo

Parâmetros do grampo					
Diam da barra (mm)	E (MPa)	ν	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	w (kN/m)
32	210.000	0,33	168.892,02	14	0,224

Uma vez definidas as características dos materiais, procede-se à geração da malha de elementos finitos recorrendo ao comando *Generate Mesh*. Este procedimento consiste em dividir a geometria em elementos triangulares, compatíveis com os elementos estruturais. A geração de malha leva em conta a posição dos pontos e linhas da geometria do modelo, de modo a que a posição exata das camadas, cargas e estruturas seja contabilizada na malha de elementos finitos. Uma vez gerada a malha de elementos finitos, segue-se à geração das tensões iniciais que compreendem as condições iniciais devido ao nível freático, a configuração da geometria (todos os elementos ativados) e o estado inicial de tensões efetivas.

Um erro que surgiu na etapa de geração das tensões iniciais foi o anulamento do coeficiente de empuxo no repouso (k_0), como mostra a Figura 42. Para solucionar este problema, na etapa de definição das propriedades do solo, a opção do k_0 foi preenchida com *default* (Figura 43). Após esse passo, ao rodar novamente o cálculo das tensões iniciais, os valores de k_0 aparecem com valores padrões equivalentes aos parâmetros adotados (Figura 44).

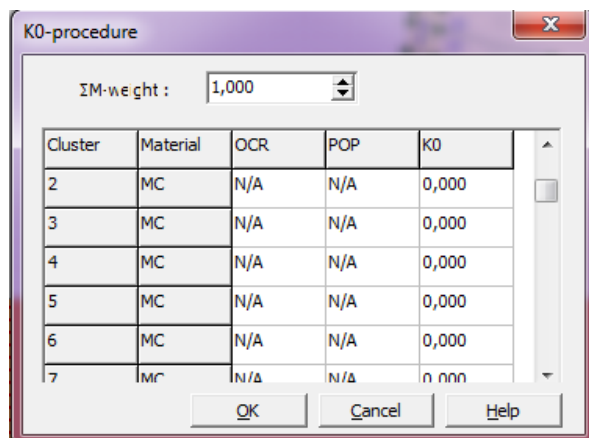


Figura 42 - Tensões iniciais a serem calculadas no PLAXIS

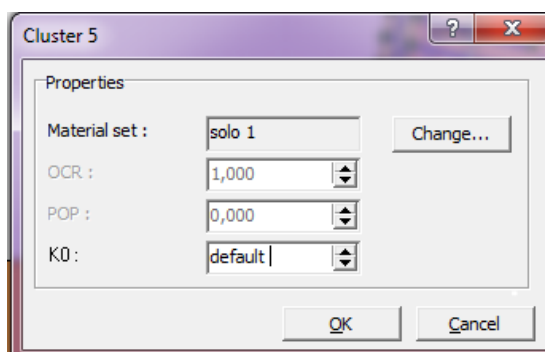


Figura 43 - Propriedades do solo com k_0 preenchido com *default*

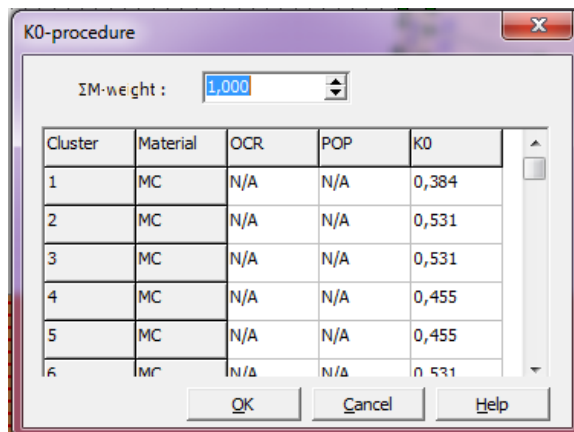


Figura 44 - Novos valores de k_0 encontrados no cálculo das tensões iniciais

Em seguida, passou-se então à fase de cálculos (sub-rotina *Calculate*) onde se consideraram as fases do processo construtivo.

Na fase dos cálculos, na Etapa 1 todos os elementos já estão ativados. Ainda nesta fase, ativa-se o comando *Reset displacements to zero*, para zerar os deslocamentos provocados pelas fases iniciais. Desta forma, a partir desta fase, todos os deslocamentos serão provocados pelas seguintes fases. Na Etapa 2 será verificado o fator de segurança na análise em questão e, para isso, o tipo de cálculo selecionado é o *Phi/c reduction* (Figura 45).

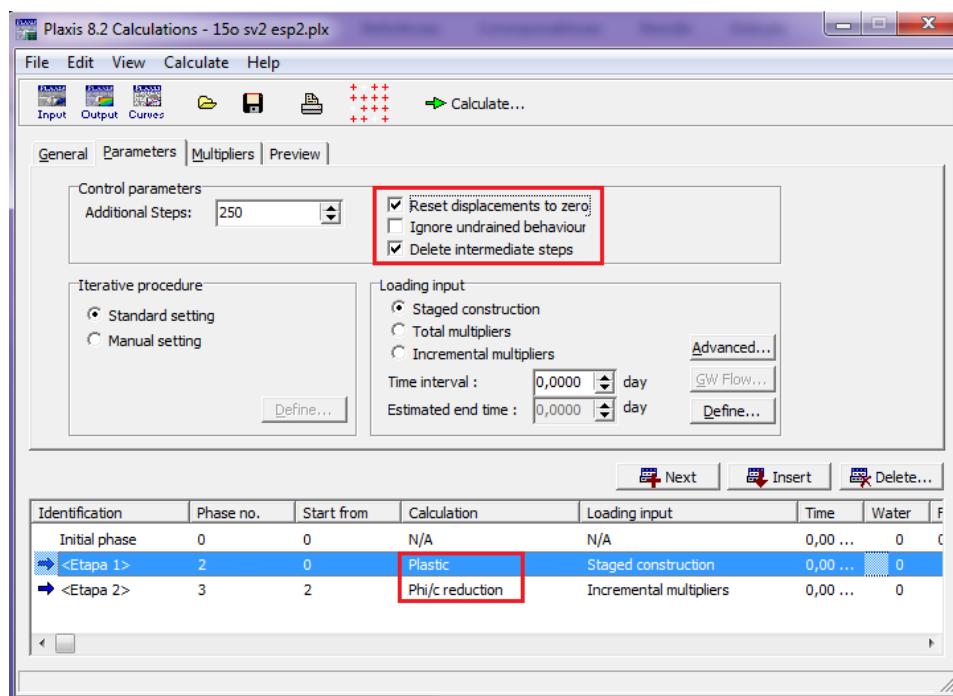


Figura 45 - Configuração das etapas de cálculo das tensões do modelo

4.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho estuda-se a influência, através de uma análise paramétrica pelo método dos elementos finitos, de vários parâmetros (ângulo de inclinação dos grampos, espaçamento vertical dos grampos, camada superficial de solo menos resistente e coesão da camada mais resistente de solo) no comportamento da face do talude grampeado.

4.3.1. COMPARAÇÃO DOS MODELOS

A comparação foi realizada com o objetivo de se obter maior confiabilidade nos resultados encontrados na modelagem com o PLAXIS. Para tanto, os resultados previstos pelo PLAXIS foram comparados com os resultados fornecidos pelo programa GeoSlope e o pelo método do Mitchell e Villet (1987) em que os resultados são determinados pelo método do equilíbrio limite (Anexo I).

Para a comparação, foram adotados espaçamentos vertical e horizontal de 2,0m, diâmetro do furo igual a 75 mm e diâmetro da barra de aço CA-50 de 32 mm. Cabe ressaltar que o programa PLAXIS não leva em consideração o valor do atrito unitário na interface solo x grampo (q_s). Observou-se que o valor de $q_s = 250$ kPa foi o que melhor representou os resultados obtidos no GeoSlope e pelo método de Mitchell e Villet (1987) através da retroanálise, fornecendo valores de fator de segurança semelhantes aos obtidos pelo PLAXIS. A Figura 46 ilustra o perfil adotado na comparação, juntamente com parâmetros geotécnicos, que foram mantidos nas análises subsequentes.

Ressalta-se, também, que no programa PLAXIS, a característica tridimensional do solo grampeado é transformada em condição bidimensional, através da divisão de alguns parâmetros do grampo (rigidez axial e rigidez à flexão) pelo espaçamento horizontal entre grampos.

O esforço resistente à tração em cada grampo é limitado à resistência da barra de aço CA-50 de 32 mm (*Bar Capacity*). A Figura 47 apresenta os parâmetros adotados para o grampo nas análises com o programa GeoSlope.

Nas análises com o PLAXIS, os parâmetros do grampo de rigidez axial e rigidez à flexão foram divididos pelo espaçamento horizontal entre grampos ($S_h = 2,0$ m) para transformar a característica tridimensional do solo grampeado em condição bidimensional. A Figura 48 ilustra a janela do programa PLAXIS, com os parâmetros adotados para o grampo.

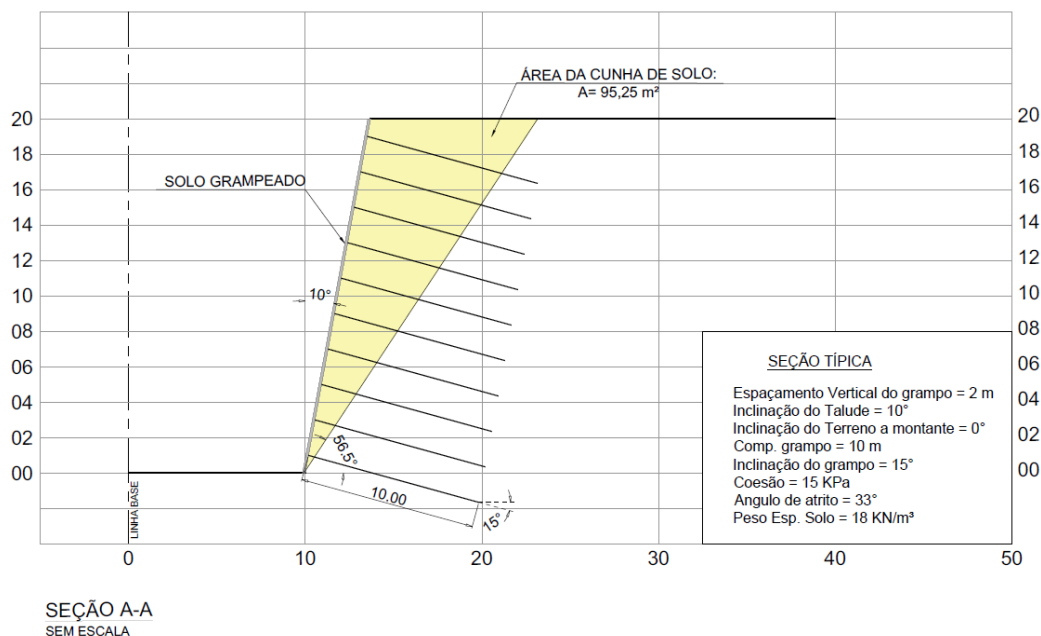


Figura 46 - Perfil do solo grampeado utilizado na etapa de comparação do modelo

F of S Dependent:	No	Load Distribution:	Conc. in 1 slice
Bond Diameter:	0.075 m	Bar Capacity:	362 kN
Bond Safety Factor:	1	Bar Safety Factor:	1
Bond Skin Friction (F/Area):	250 kPa	Shear Capacity:	0 kN
Nail Spacing:	2 m	Shear Safety:	1
		Apply Shear:	Parallel to Slip

Figura 47 - Parâmetros do grampo utilizados no GeoSlope

Plate properties	
Material set	Properties
Identification: grampo	EA : 8,445E+04 kN,m
Material type: Elastic	EI : 7,000 kNm²,m
Comments	d : 0,032 m
	w : 0,224 kN,m,m
	v : 0,330
	M_p : 1,000E+15 kN,m,m
	N_p : 1,000E+15 kN,m
	Rayleigh α : 0,000
	Rayleigh β : 0,000
<input type="button" value="Ok"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>	

Figura 48 - Parâmetros do grampo no programa PLAXIS

Na Figura 49 e na Figura 50, são apresentadas as geometrias adotadas e os resultados da análise da estabilidade fornecidos pelos programas GeoSlope e PLAXIS, respectivamente. Observa-se que as análises por equilíbrio limite (GeoSlope) forneceram um fator de segurança igual a 1,559, enquanto as análises pelo método dos elementos finitos (PLAXIS) indicaram FS igual a 1,561.

Pelo método do Mitchell e Villet (1987), foi estimado um fator de segurança igual a 1,472. A Tabela 18 compara os fatores de segurança determinados pelos diferentes métodos, que mostraram-se compatíveis. Diante disso, a comparação foi considerada satisfatória, havendo maior confiabilidade nos resultados obtidos nas análises paramétricas.

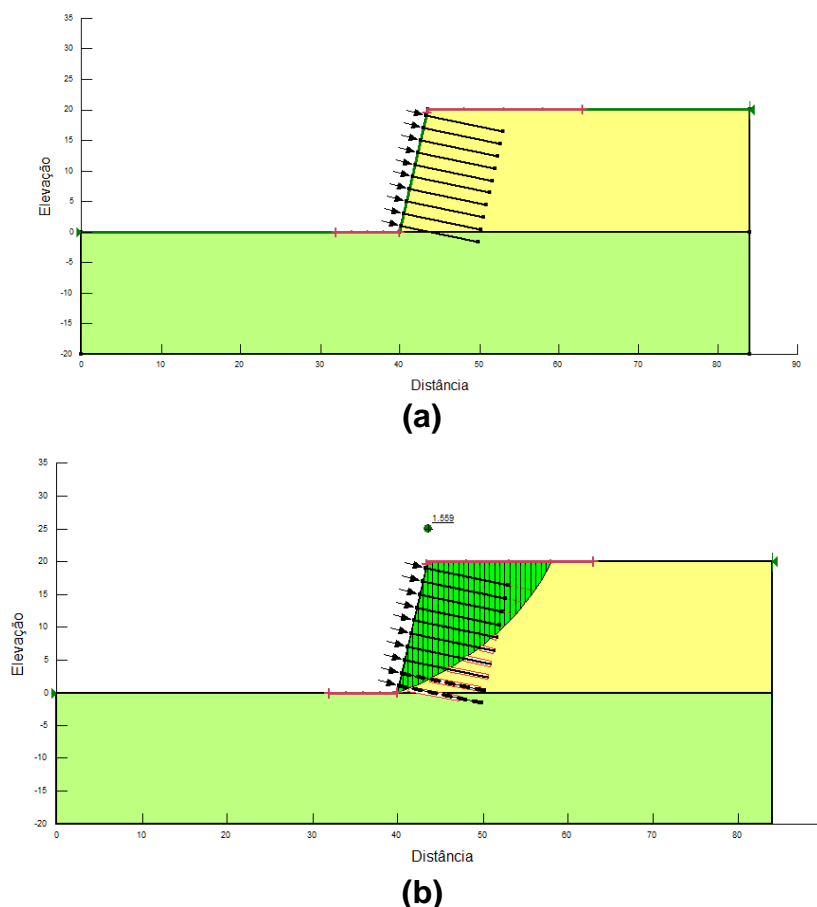
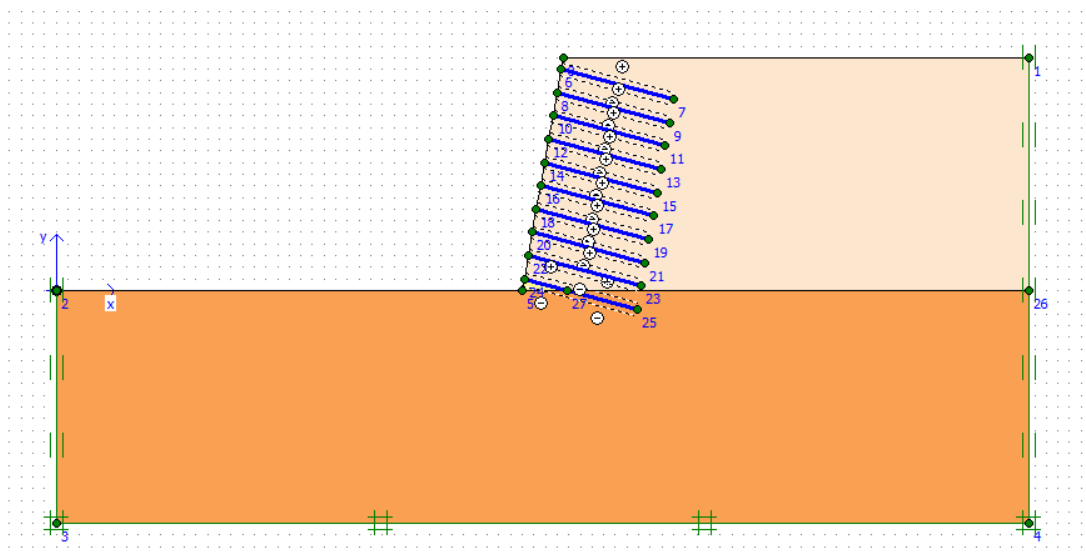
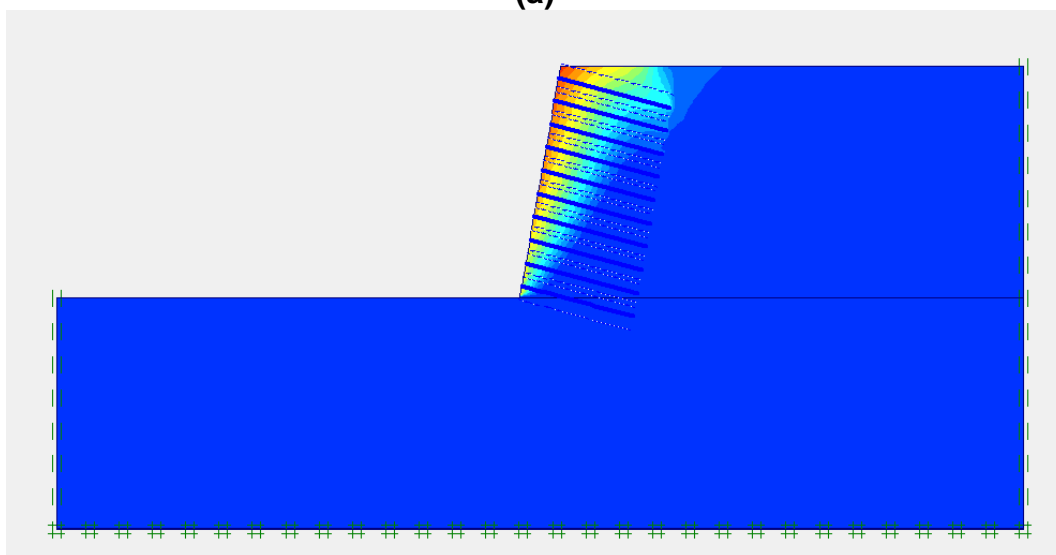


Figura 49 - (a) Geometria do talude com solo grampeado do exemplo da comparação e (b) Resultado da análise de estabilidade do exemplo da comparação pelo programa GeoSlope (F.S.=1,559)



(a)



(b)

Figura 50 - (a) Geometria do talude com solo grampeado do exemplo de comparação e (b) Resultado da análise de estabilidade do exemplo de comparação com o programa PLAXIS (F.S. = 1,561)

Tabela 18 - F.S. de cada método/programa utilizado na comparação

Método/Programa	F.S.
GeoSlope	1,559
PLAXIS	1,561
Mitchell e Villet (1987)	1,472

4.3.2. INFLUENCIA DA INCLINAÇÃO DOS GRAMPOS

Neste trabalho foram feitas análises dos deslocamentos e do F.S. da estrutura de solo grampeado para várias inclinações dos grampos. As inclinações adotadas dos grampos foram de 5°, 15° e 30°.

Para o espaçamento vertical igual a 1,0 m é possível perceber que o F.S. diminui conforme a inclinação do grampo com a horizontal aumenta (Tabela 19 e Figura 51) e os deslocamentos máximos decrescem até a inclinação de 15° e depois aumentam progressivamente (Tabela 19 e Figura 52). Estes resultados sugerem que a inclinação ideal para se obter menores valores de deslocamentos seria a inclinação de 15°.

Tabela 19 - Resultados obtidos na modelagem para o espaçamento vertical de 1,0m e diferentes inclinações dos grampos

Espaçamento Vertical = 1,0 m				
c' (kPa)	espessura (m)	inclinação (°)	FS Plaxis	desl. (cm)
15	1,0	5	1,706	3,42
		15	1,374	2,66
		30	0,904	5,60
15	2,0	5	1,577	3,37
		15	1,237	2,70
		30	0,839	5,12
30	1,0	5	1,825	2,59
		15	1,569	2,47
		30	1,114	4,10
30	2,0	5	1,501	2,60
		15	1,276	2,51
		30	0,933	6,29

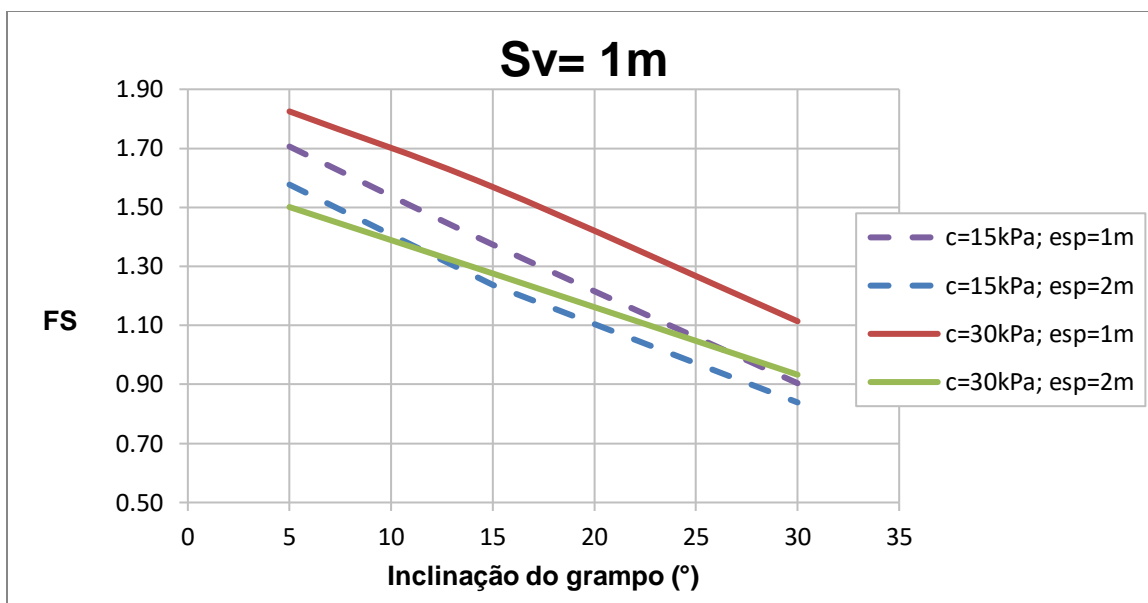


Figura 51 - Influência da inclinação dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado

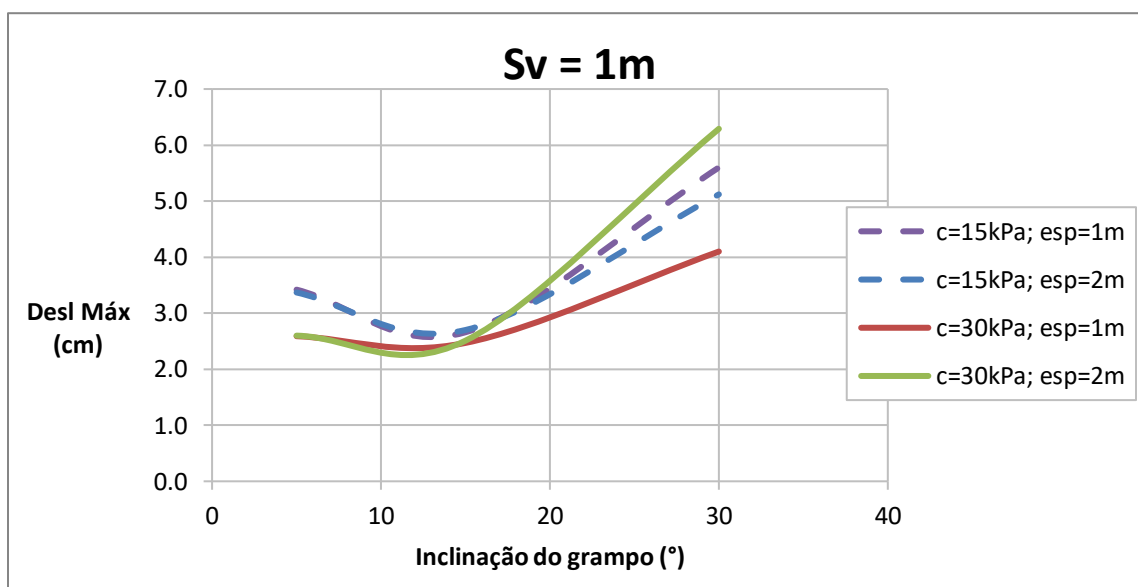


Figura 52 - Influência da inclinação dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado

Para os espaçamentos verticais dos grampos de 2,0 m e 3,0 m o comportamento da estrutura é semelhante havendo também a diminuição do F.S. conforme a inclinação dos grampos com a horizontal aumenta (Figura 53 e Figura 55). Observa-se, também, um aumento dos valores de deslocamentos máximos da estrutura conforme a inclinação do grampo aumenta (Figura 54 e Figura 56).

O comportamento em termos de deslocamentos máximos para o espaçamento vertical de 2,0 m e 3,0 m são distintos do observado para o espaçamento vertical de 1,0 m, que apresentava um valor mínimo de deslocamentos para a inclinação de 15°.

O espaçamento vertical menor entre os grampos faz com que os esforços sejam melhores distribuídos e sejam menores em cada grampo, solicitando uma força menor para eles resistirem. Para o espaçamento de 1,0 m a inclinação ideal é a de 15°, mas para os espaçamentos de 2,0 m e 3,0 m há esse aumento dos deslocamentos conforme a inclinação do grampo aumenta. Este fato é porque a função principal do grampo é ter resistência de atrito suficiente (q_s) para resistir à tração causada pela movimentação da massa de solo e o aumento da inclinação faz com que ele tenha que resistir a momentos fletores também.

A Tabela 20 e a Tabela 21 mostram os resultados encontrados nas modelagens para os espaçamentos verticais de 2,0 m e 3,0 m conforme ocorre a variação da inclinação dos grampos. O comportamento observado para espaçamentos de 2,0 m e de 3,0 m é o mesmo. O fator de segurança diminui e os deslocamentos aumentam, respectivamente, com o aumento da inclinação.

É possível observar que o F.S. encontrado nas modelagens do PLAXIS são próximos aos encontrados no GeoSlope. Os valores mais discrepantes de F.S. entre ambos os programas ocorrem quando a espessura de solo da face é igual a 2,0 m. Esta diferença será explicada no Item 5.3.5, pois, além disso, também houve diferença na forma da superfície de ruptura.

Os resultados mostram que quando a camada de solo mais resistente apresenta maior valor de coesão, mais resistente é o maciço de solo (maior F.S. e menores deslocamentos máximos).

Tabela 20 - Resultados obtidos na modelagem para o espaçamento vertical de 2,0m e diferentes inclinações dos grampos

Espaçamento Vertical = 2,0 m				
c' (kPa)	espessura (m)	inclinação (°)	FS Plaxis	desl. (cm)
15	1,0	5	1,263	3,73
		15	1,078	4,43
		30	0,785	4,49
15	2,0	5	1,218	4,04
		15	0,943	5,52
		30	0,721	5,61
30	1,0	5	1,497	2,84
		15	1,285	2,82
		30	1,005	3,44
30	2,0	5	1,170	3,20
		15	1,040	4,23
		30	0,843	4,95

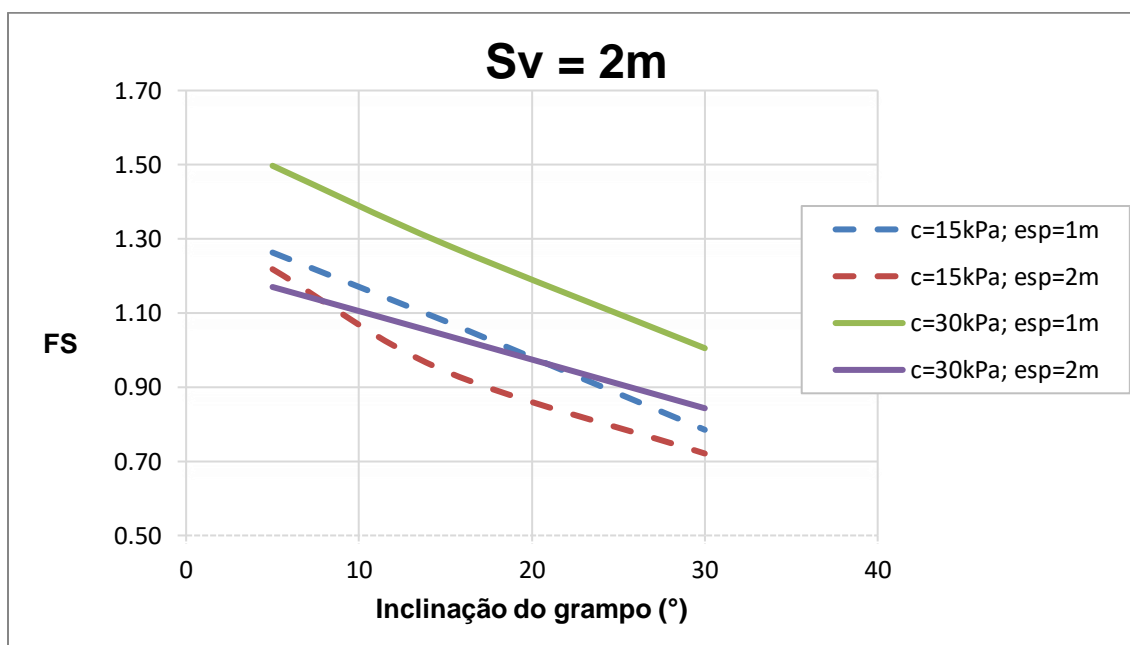


Figura 53 - Influência da inclinação dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado

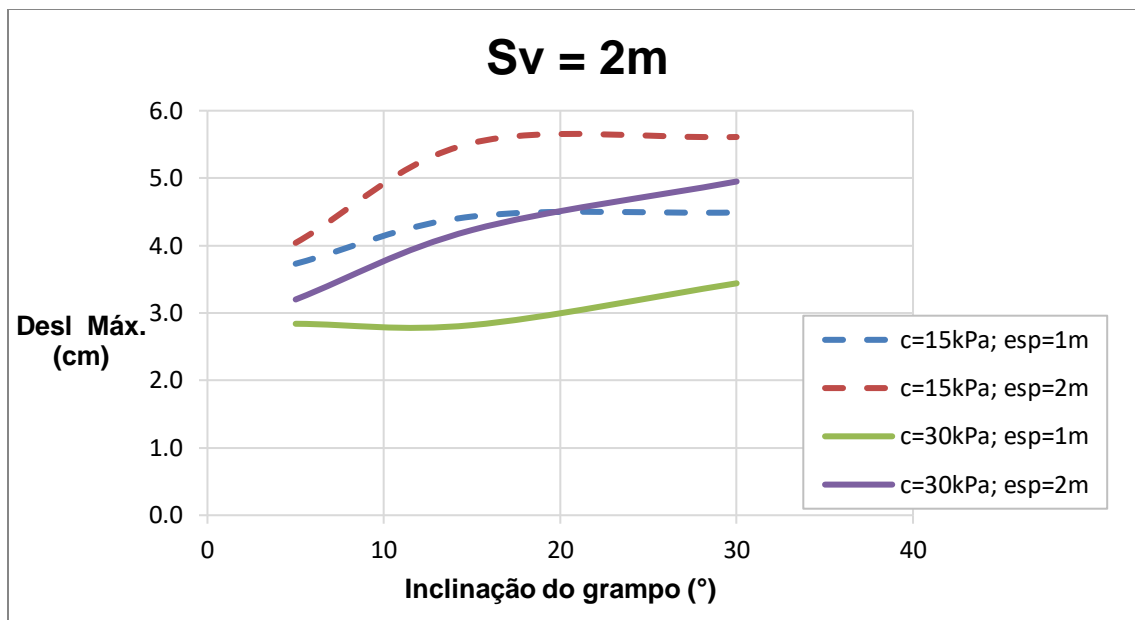


Figura 54 - Influência da inclinação dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado

Tabela 21 - Resultados obtidos na modelagem para o espaçamento vertical de 3,0m e diferentes inclinações dos grampos

Espaçamento Vertical = 3,0 m				
c' (kPa)	espessura (m)	inclinação (°)	FS Plaxis	desl. (cm)
15	1,0	5	1,080	4,93
		15	0,922	7,39
		30	0,724	9,45
15	2,0	5	0,942	4,91
		15	0,828	6,44
		30	0,656	9,13
30	1,0	5	1,289	3,13
		15	1,154	3,52
		30	0,960	6,16
30	2,0	5	0,984	3,68
		15	0,900	4,43
		30	0,764	5,20

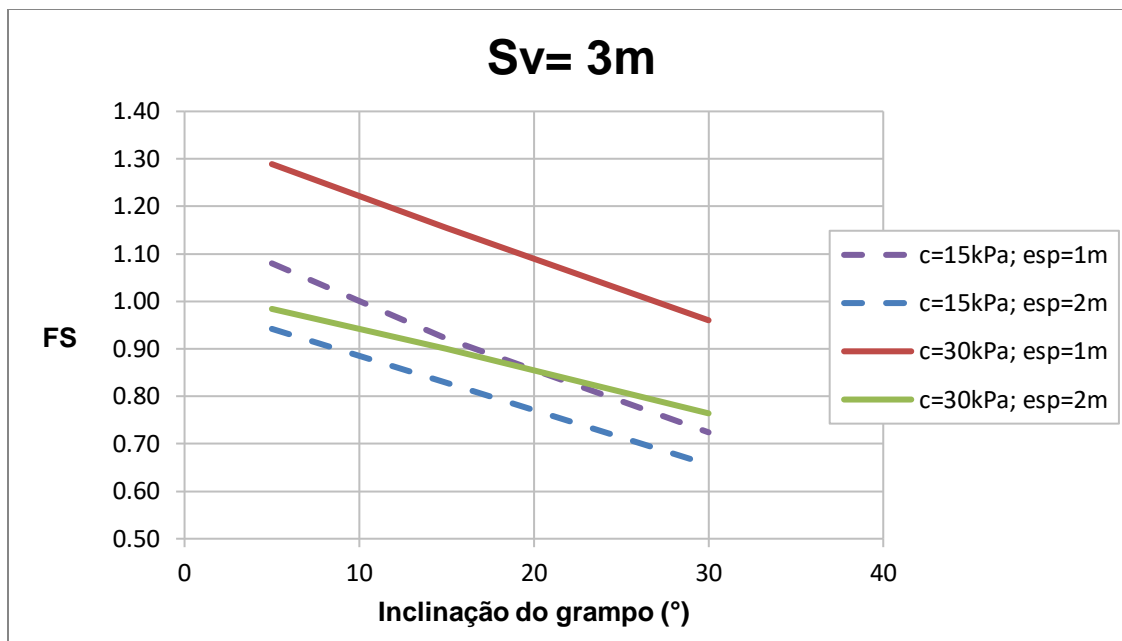


Figura 55- Influência da inclinação dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado

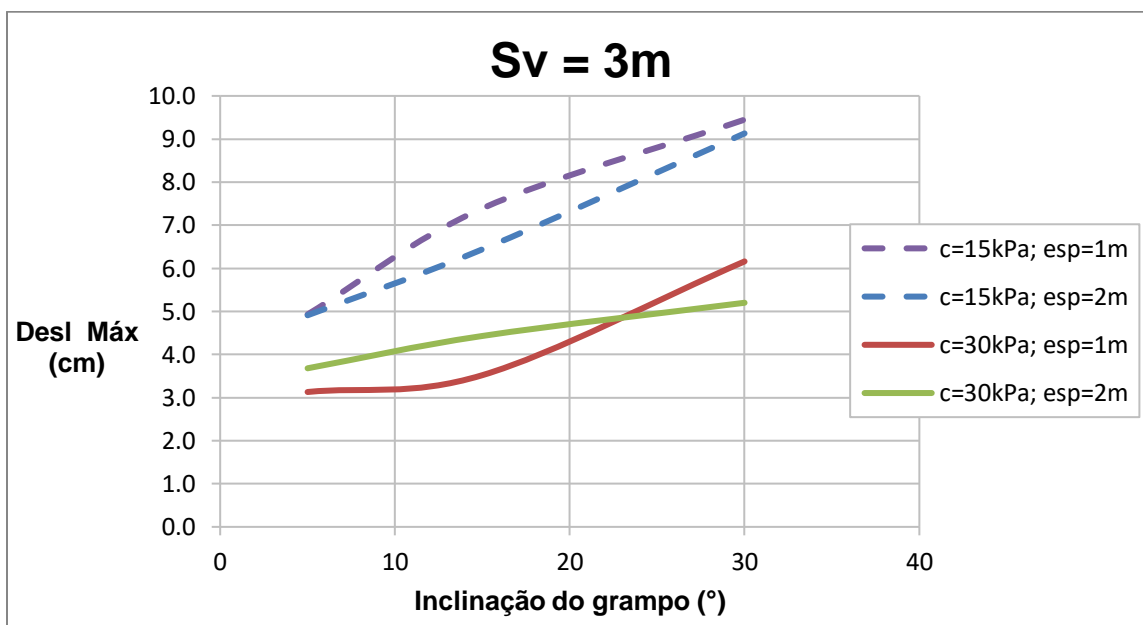


Figura 56 - Influência da inclinação dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado

4.3.3. INFLUENCIA DO ESPAÇAMENTO VERTICAL DOS GRAMPOS

Neste trabalho também foram feitas análises dos deslocamentos e do F.S. da estrutura de solo grampeado para algumas variações de espaçamentos verticais dos grampos. Os valores dos espaçamentos verticais entre os grampos foram assumidos como 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m.

A Tabela 22 e a Tabela 23 reúnem os resultados encontrados nas modelagens para os espaçamentos verticais de 1,0 m, 2,0 m e 3,0 m para as diferentes inclinações dos grampos (5° e 15°).

Para as inclinações dos grampos sendo iguais a 5° e 15° é possível perceber que conforme o espaçamento vertical dos grampos aumenta, o F.S. diminui e os deslocamentos máximos aumentam (Figura 57 a Figura 60). Este comportamento já era esperado, pois conforme o espaçamento vertical entre os grampos aumenta, maiores são os esforços que cada grampo deve resistir.

Tabela 22 - Resultados obtidos na modelagem para a inclinação de 5° e diferentes espaçamentos verticais entre os grampos

Inclinação = 5°				
c' (kPa)	espessura (m)	Sv (m)	FS Plaxis	desl. (cm)
15	1,0	1,0	1,706	3,42
		2,0	1,263	3,73
		3,0	1,080	4,93
15	2,0	1,0	1,577	3,37
		2,0	1,218	4,04
		3,0	0,942	4,91
30	1,0	1,0	1,825	2,59
		2,0	1,497	2,84
		3,0	1,289	3,13
30	2,0	1,0	1,501	2,60
		2,0	1,170	3,20
		3,0	0,984	3,68

Tabela 23 - Resultados obtidos na modelagem para a inclinação de 15° e diferentes espaçamentos verticais entre os grampos

Inclinação = 15°				
c' (kPa)	espessura (m)	Sv (m)	FS Plaxis	desl. (cm)
15	1,0	1,0	1,374	2,66
		2,0	1,078	4,43
		3,0	0,922	7,39
15	2,0	1,0	1,237	2,70
		2,0	0,943	5,52
		3,0	0,828	6,44
30	1,0	1,0	1,569	2,47
		2,0	1,285	2,82
		3,0	1,154	3,52
30	2,0	1,0	1,276	2,51
		2,0	1,040	4,23
		3,0	0,900	4,43

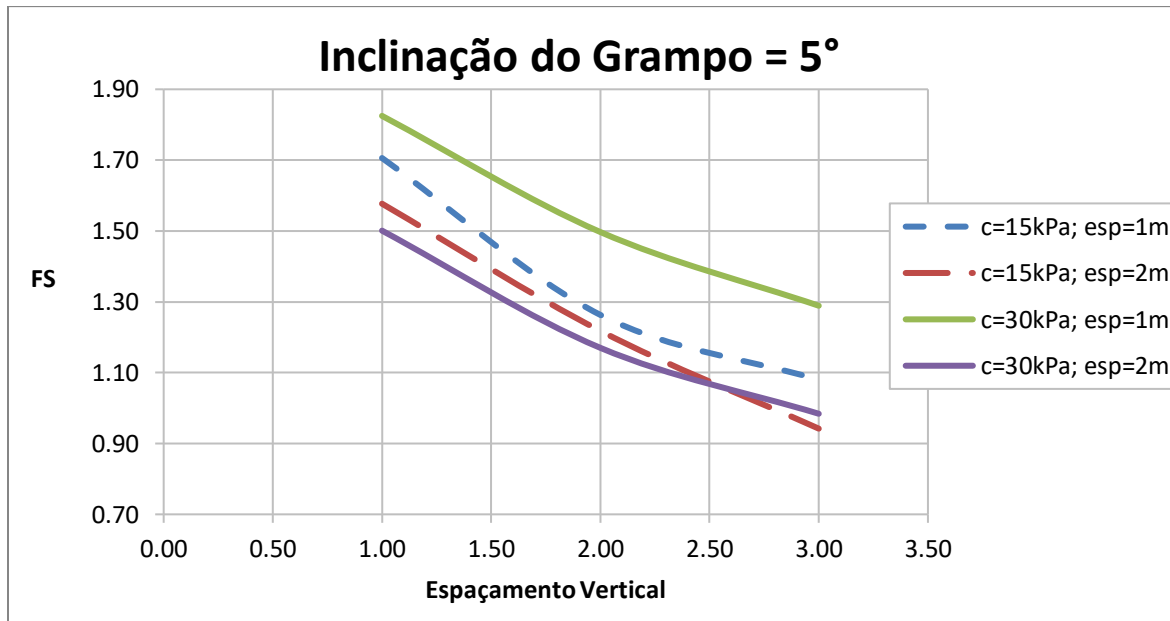


Figura 57 - Influência do espaçamento vertical dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 5°

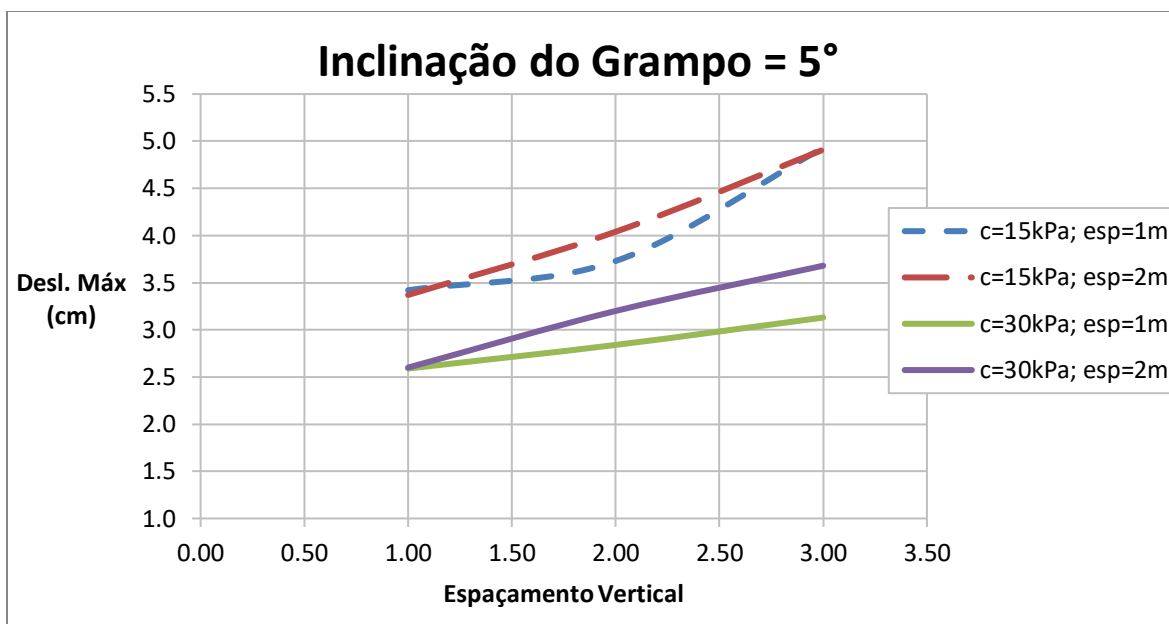


Figura 58 - Influência do espaçamento vertical dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 5°

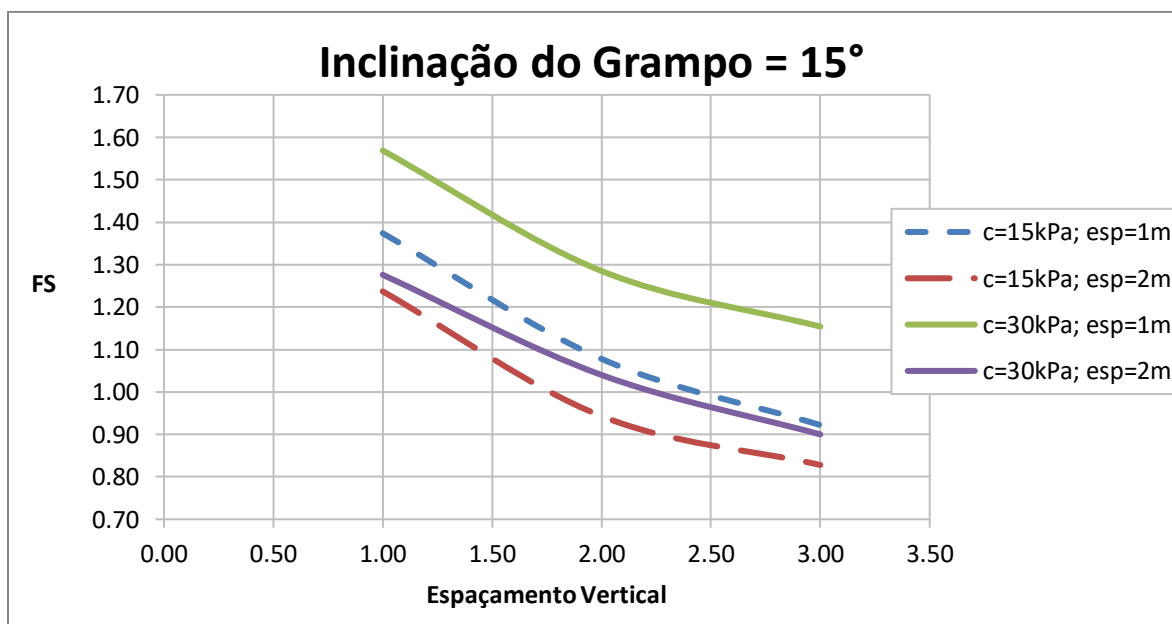


Figura 59 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos F.S. da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 15°

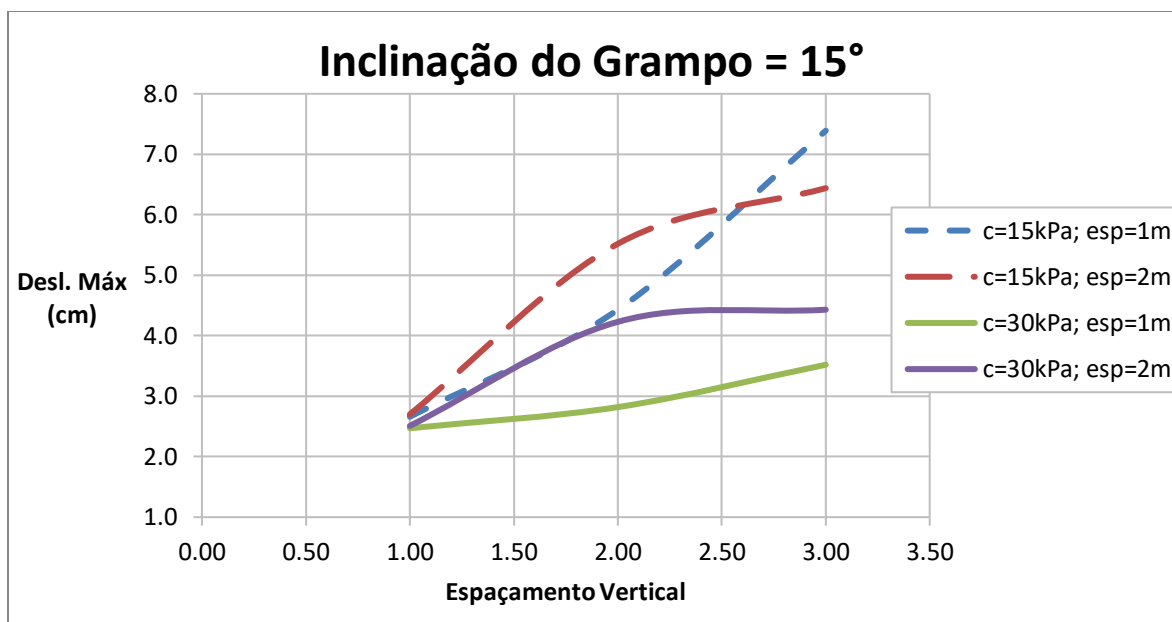


Figura 60 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 15°

A Tabela 24 mostra os resultados encontrados nas modelagens para os espaçamentos verticais de 1,0m, 2,0m e 3,0m para a inclinação dos grampos sendo 30°.

Para a inclinação dos grampos sendo igual a 30° é possível perceber que conforme o espaçamento vertical dos grampos aumenta, o F.S. diminui, conforme o esperado (Tabela 24 e Figura 61).

Na Figura 62, observa-se que quando o $c'=15$ kPa, os deslocamentos diminuem até o espaçamento vertical igual a 2,0m e depois aumentam conforme o espaçamento aumenta. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato do espaçamento vertical igual a 2,0 ser o ideal para estabilizar o maciço de solo. Caso o espaçamento entre grampos seja menor o solo é substituído pelo conjunto de calda de solo cimento e barra de aço e se torna mais pesado. Já para espaçamentos maiores, os esforços que solicitam cada grampo são maiores, pois o esforço total necessário é distribuído em uma quantidade menor de grampos.

O comportamento contrário é observado quando $c'=30$ kPa, em que os deslocamentos máximos aumentam até o espaçamento vertical igual a 2,0m e depois

diminuem conforme o espaçamento aumenta. Este fenômeno ocorreu devido à diferença da superfície de ruptura obtida entre os dois programas. Este comportamento será analisado e explicado no Item 5.3.5.

É possível observar que o F.S. encontrado nas modelagens do PLAXIS são próximos aos encontrados no GeoSlope. Nos casos em que os valores de F.S. foram mais discrepantes entre ambos os programas, também foi observada uma diferença na forma da superfície de ruptura.

Tabela 24 - Resultados obtidos na modelagem para a inclinação de 30° e diferentes espaçamentos verticais entre os grampos

Inclinação = 30°				
c' (kPa)	espessura (m)	Sv (m)	FS Plaxis	desl. (cm)
15	1,0	1,0	0,904	5,60
		2,0	0,785	4,49
		3,0	0,724	9,45
15	2,0	1,0	0,839	5,12
		2,0	0,721	5,61
		3,0	0,656	9,13
30	1,0	1,0	1,114	4,10
		2,0	1,005	8,39
		3,0	0,960	6,16
30	2,0	1,0	0,933	6,29
		2,0	0,843	8,31
		3,0	0,764	5,20

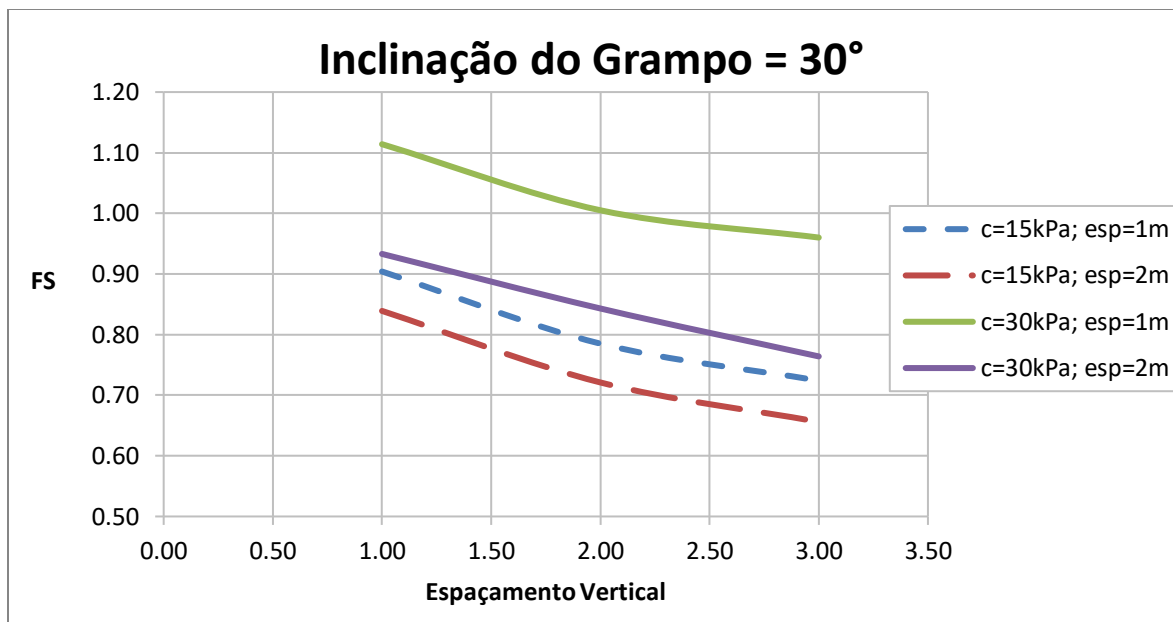


Figura 61 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos no F.S. da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 30°

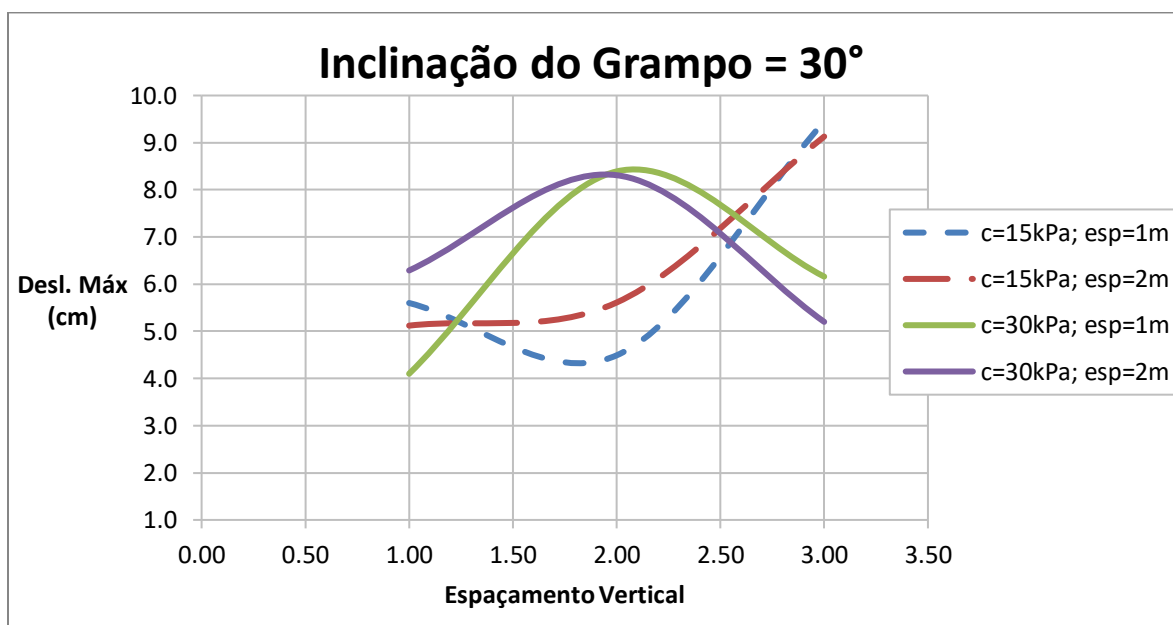


Figura 62 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado e inclinação igual a 30°

4.3.4. INFLUENCIA DA ESPESSURA DA CAMADA DE SOLO MENOS RESISTENTE NA FACE DO TALDE

No presente trabalho, foi avaliada a influência da espessura da camada de solo menos resistente na face do talude no comportamento da estrutura de solo grampeado, em função da variação de deslocamentos máximos na face e do F.S. Os resultados estão apresentados na Figura 63 à Figura 68.

Em todas as análises, observou-se que nas 3 condições de espaçamento vertical, os valores de F.S. mais altos eram referentes à inclinação de 5°, os intermediários para a inclinação de 15° e os mais baixos para a inclinação de 30°. Além disso, observa-se também que coerentemente o F.S. diminui conforme a espessura do solo da face aumenta.

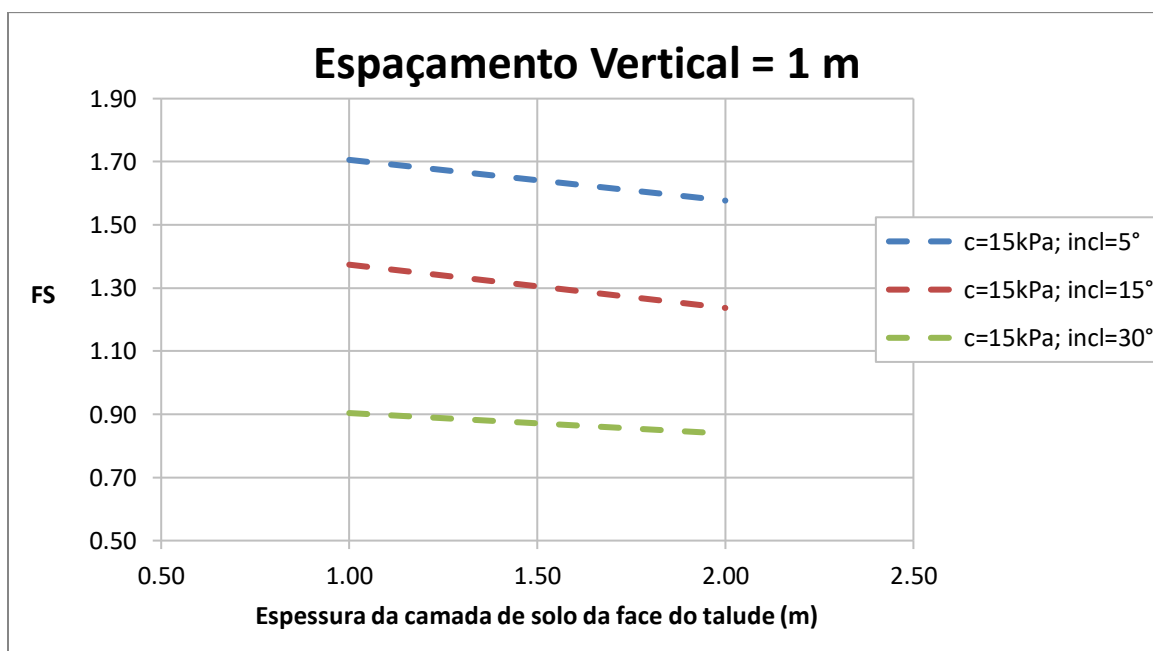


Figura 63 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v = 1,0\text{m}$ ($c' = 15\text{ kPa}$)

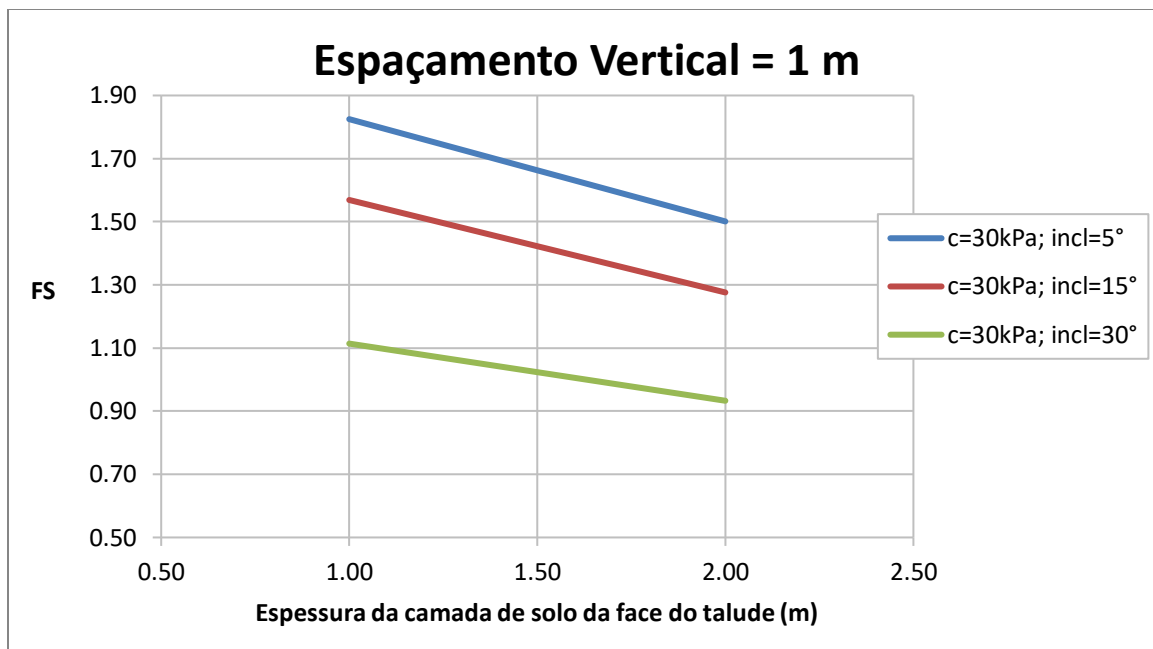


Figura 64 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v = 1,0$ m ($c' = 30$ kPa)

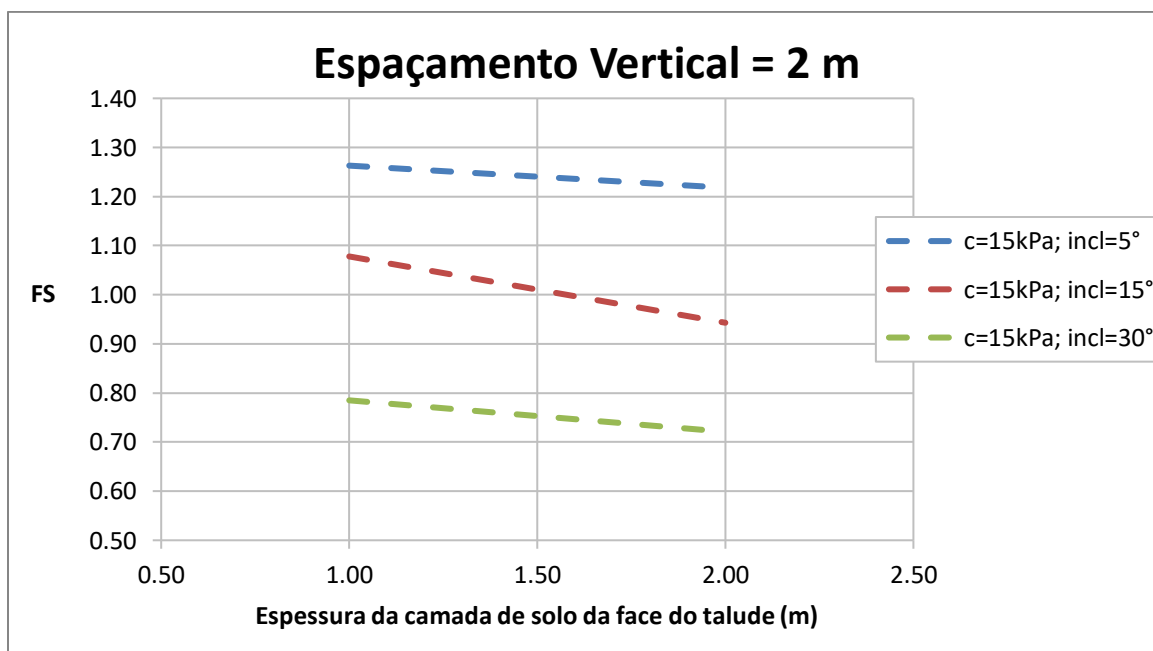


Figura 65 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v = 2,0$ m ($c' = 15$ kPa)

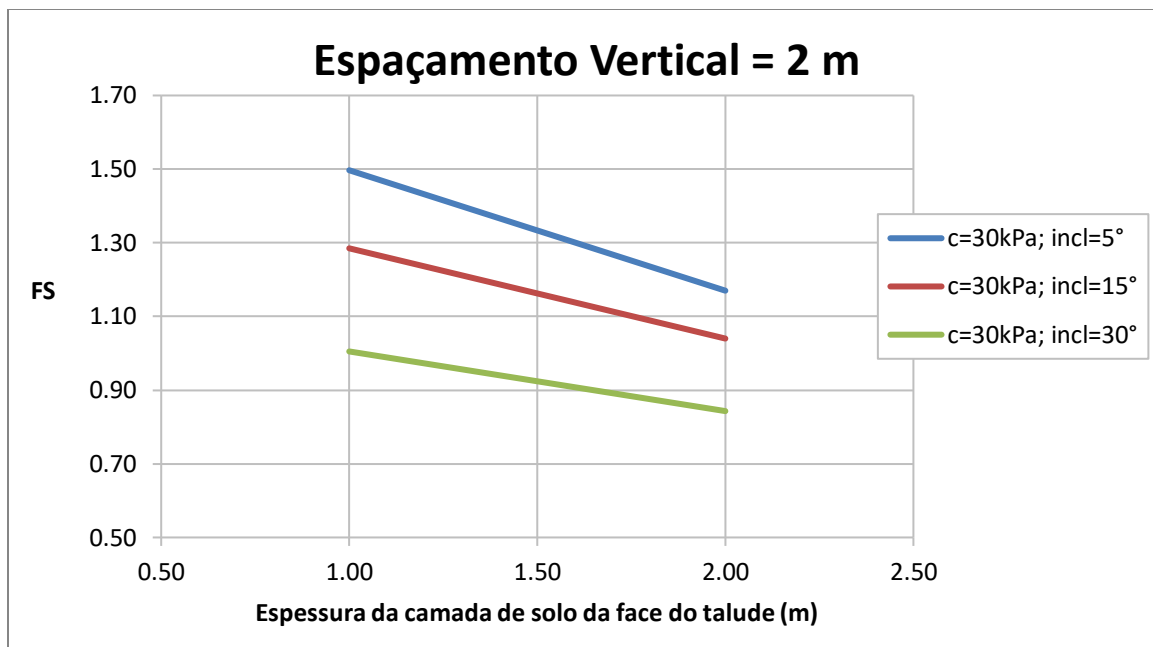


Figura 66 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v = 2,0$ m ($c' = 30$ kPa)

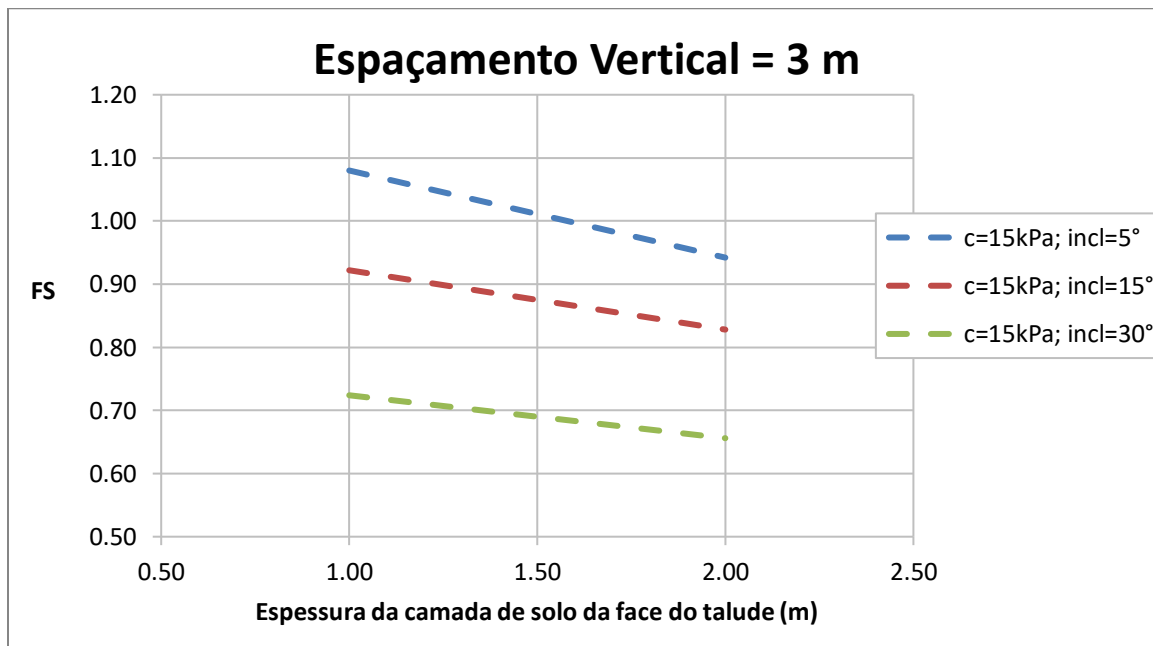


Figura 67 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v = 3,0$ m ($c' = 15$ kPa)

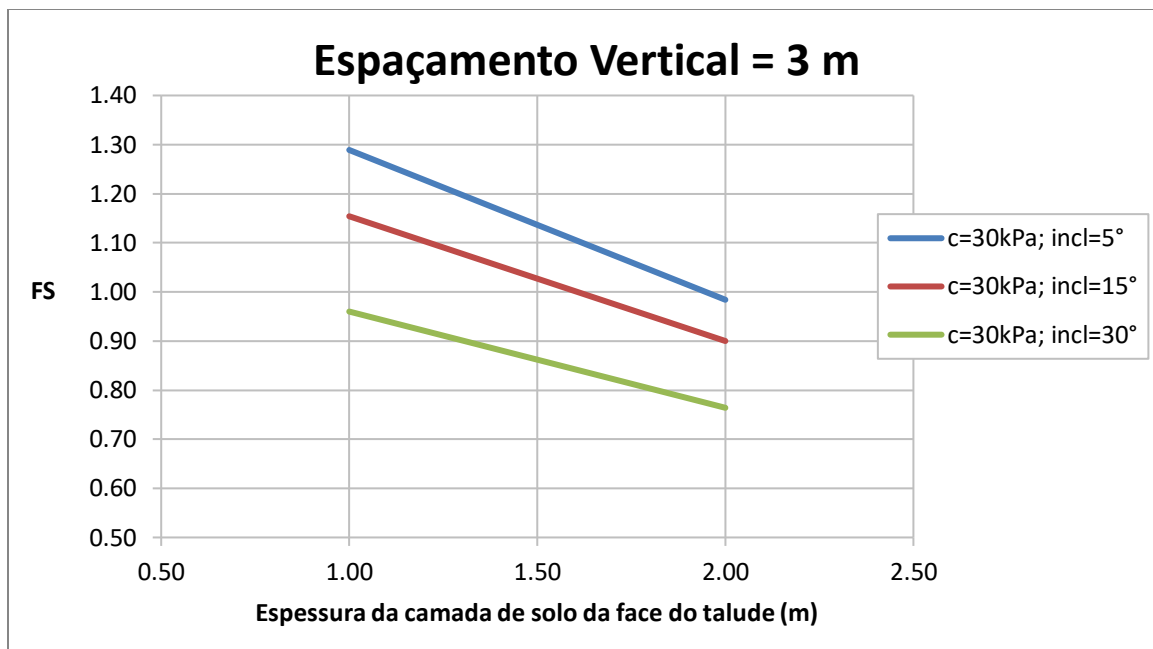


Figura 68 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude no F.S. da estrutura de solo grampeado com $S_v = 3,0$ m ($c' = 30$ kPa)

Conforme apresentado na Figura 69 e na Figura 70, considerando o espaçamento vertical entre os grampos desta análise sendo 1,0 m pode-se observar que os menores deslocamentos são observados na inclinação de 15°. Este fato foi comentado anteriormente no Item 4.3.2, na Figura 52, que mostra a inclinação ideal de 15° quando o espaçamento vertical é igual a 1,0 m.

A inclinação de 30° apresenta os maiores deslocamentos e para este caso específico, a inclinação de 5° apresenta os valores intermediários.

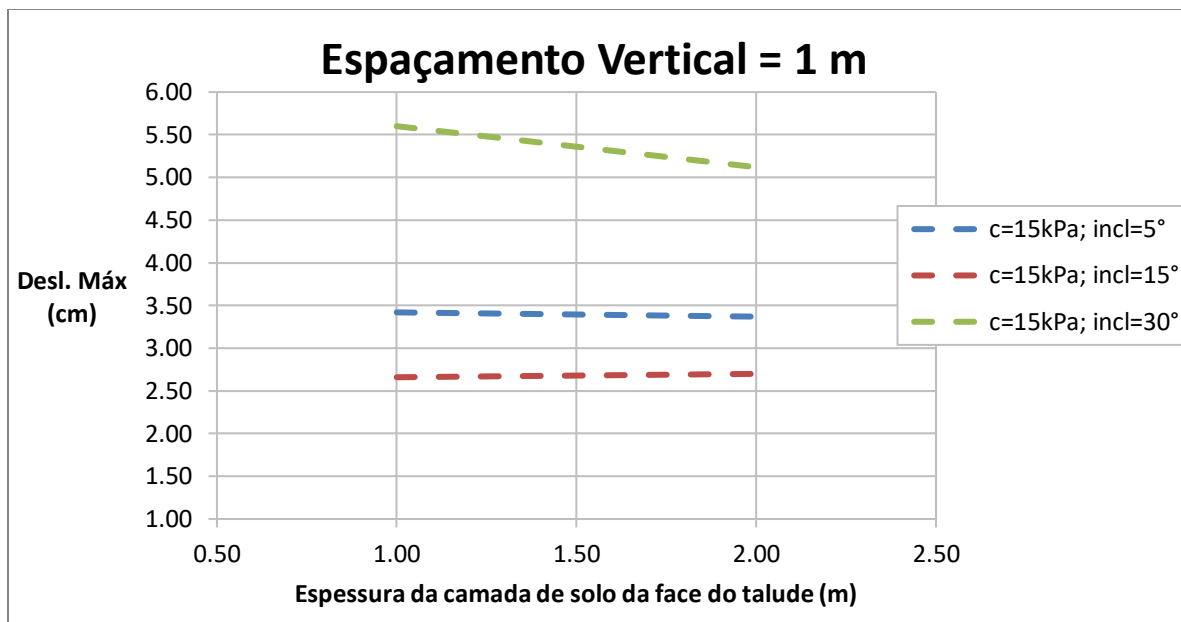


Figura 69 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 1,0 m ($c' = 15$ kPa)

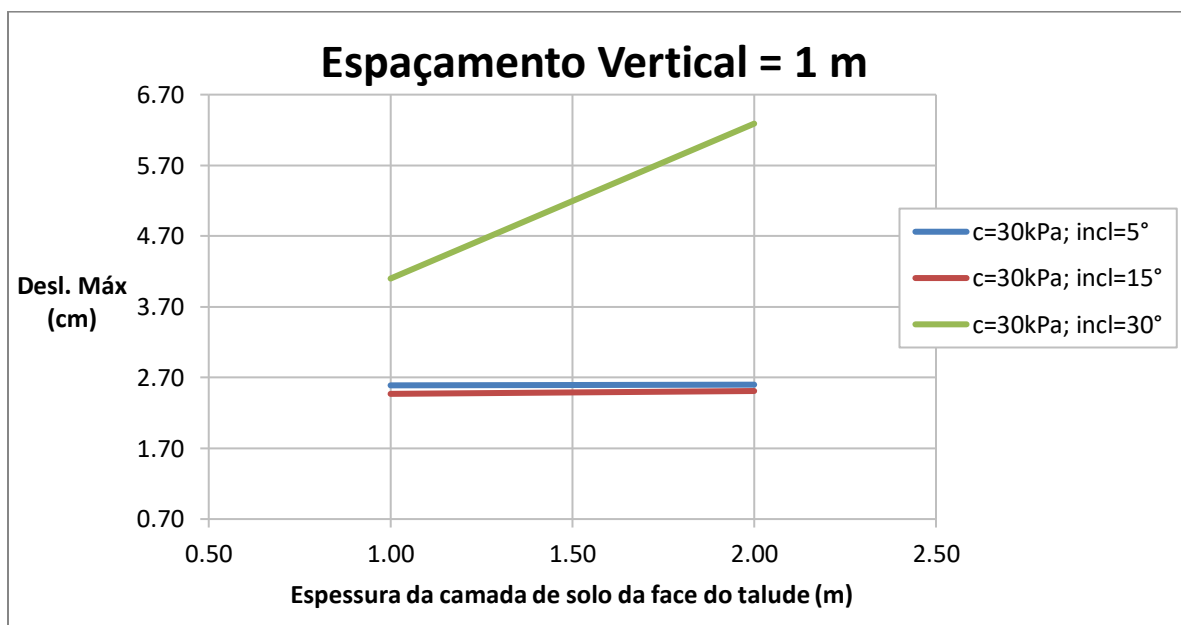


Figura 70 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 1,0 m ($c' = 30$ kPa)

Considerando os espaçamentos verticais entre os grampos sendo igual a 2,0 m e 3,0 m é possível observar que os deslocamentos aumentam conforme a inclinação dos grampos aumenta (Figura 71 a Figura 74).

No geral, conforme a espessura do solo da face aumenta, há uma perda de resistência do maciço de solo que faz os deslocamentos máximos aumentarem. Quando o solo mais resistente apresenta $c' = 30$ kPa e inclinação dos grampos igual a 30° , os deslocamentos máximos apresentam um comportamento que foge do esperado, conforme a espessura de solo da face aumenta (Figura 72 e Figura 74). Este comportamento será melhor avaliado e explicado no Item 4.3.5.

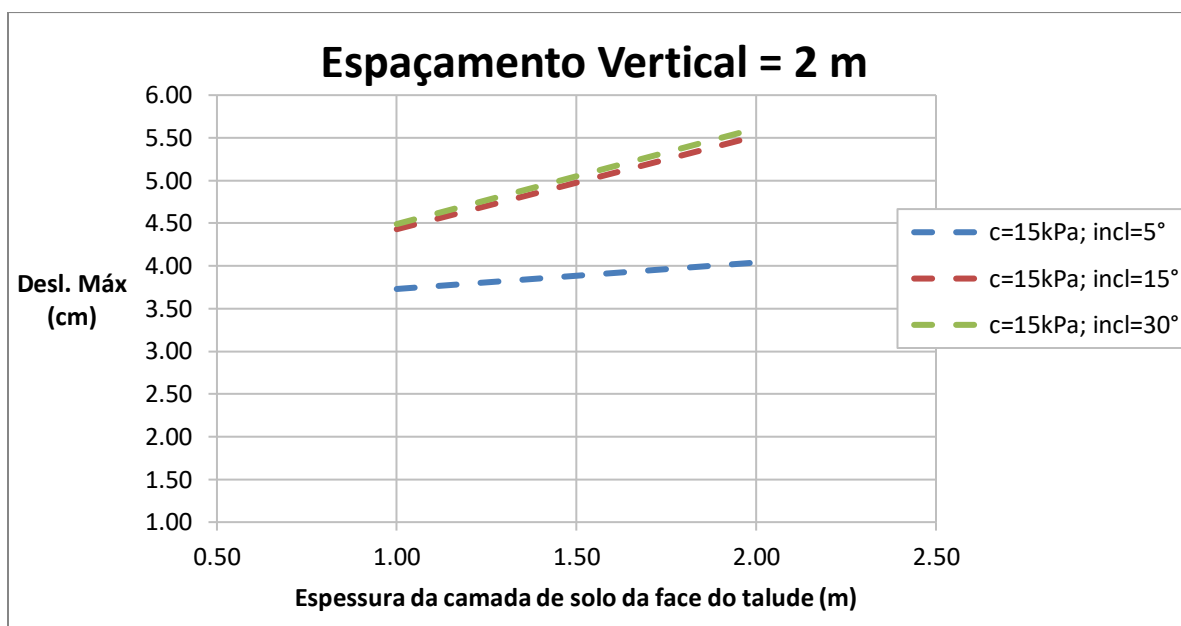


Figura 71 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 2,0 m ($c' = 15$ kPa)

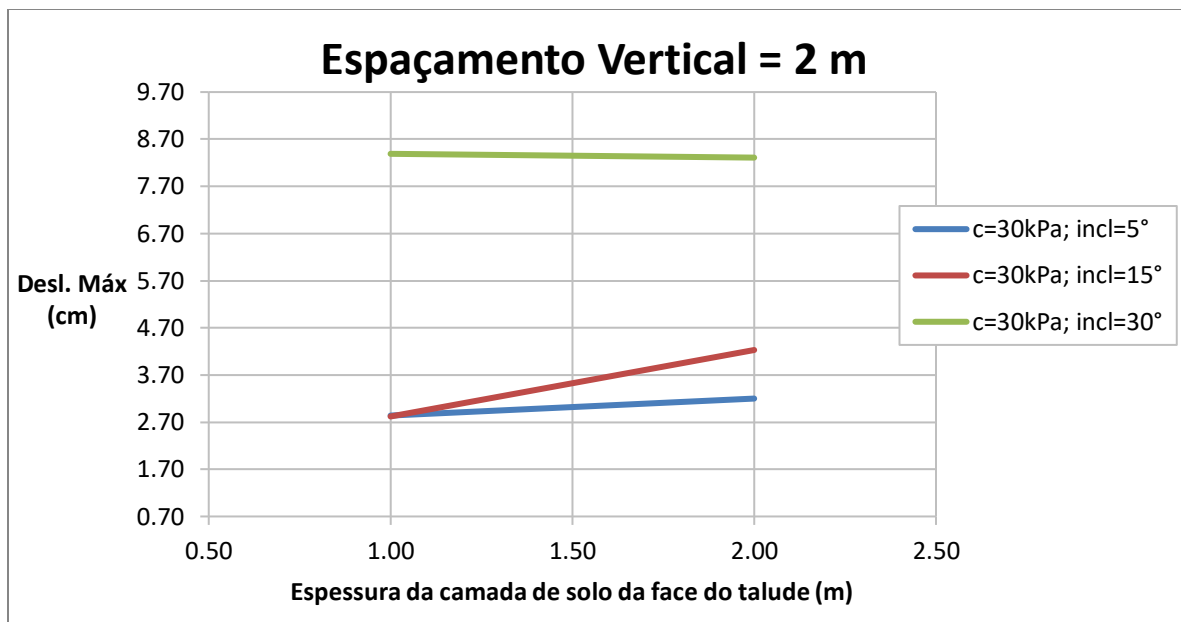


Figura 72 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 2,0 m ($c' = 30$ kPa)

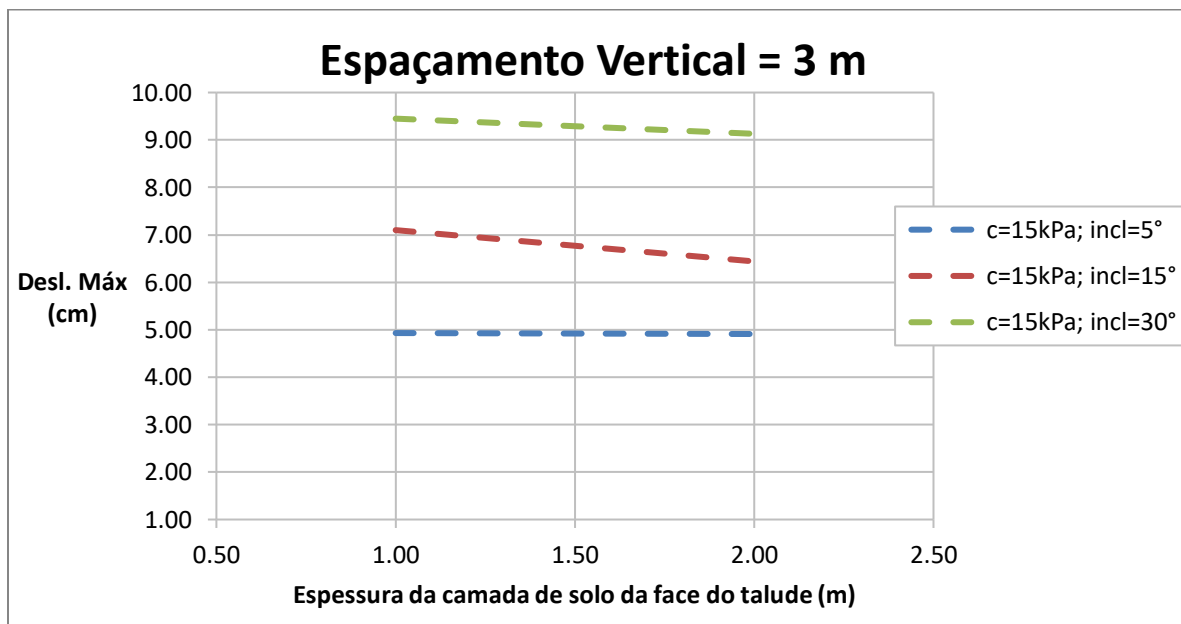


Figura 73 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 3,0 m ($c' = 15$ kPa)

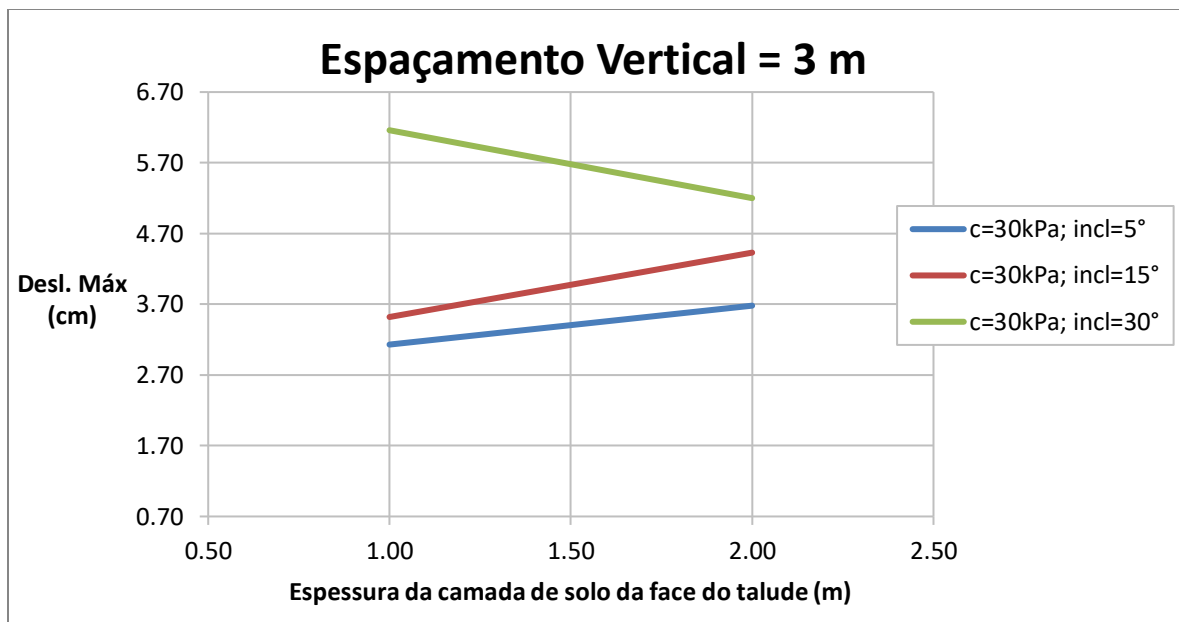


Figura 74 - Influência da espessura da camada de solo menos resistente da face do talude nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado para o espaçamento vertical sendo igual a 3,0 m ($c' = 30$ kPa)

4.3.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM

Neste trabalho, observou-se que, para algumas análises, o F.S. obtido pelo programa PLAXIS era discrepante do obtido pelo programa GeoSlope e, além disso, as superfícies de ruptura encontradas em cada programa não eram similares. Diante do exposto, serão apresentados os resultados das análises no PLAXIS em que é possível observar que a superfície de ruptura do talude se dá na camada de solo menos resistente da face do talude.

A Figura 75 à Figura 77 mostram as superfícies de ruptura encontradas nas análises paramétricas utilizando o programa PLAXIS quando $c' = 15$ kPa e que são semelhantes às obtidas pelo GeoSlope.

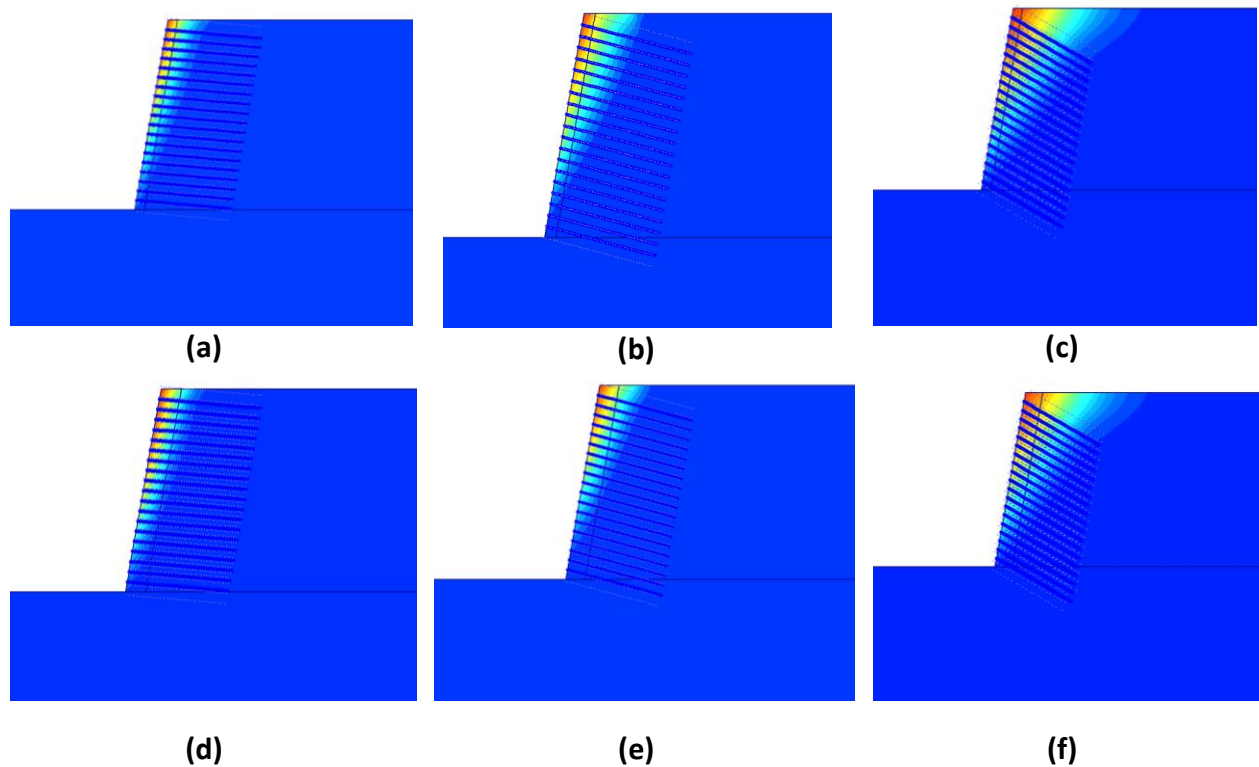
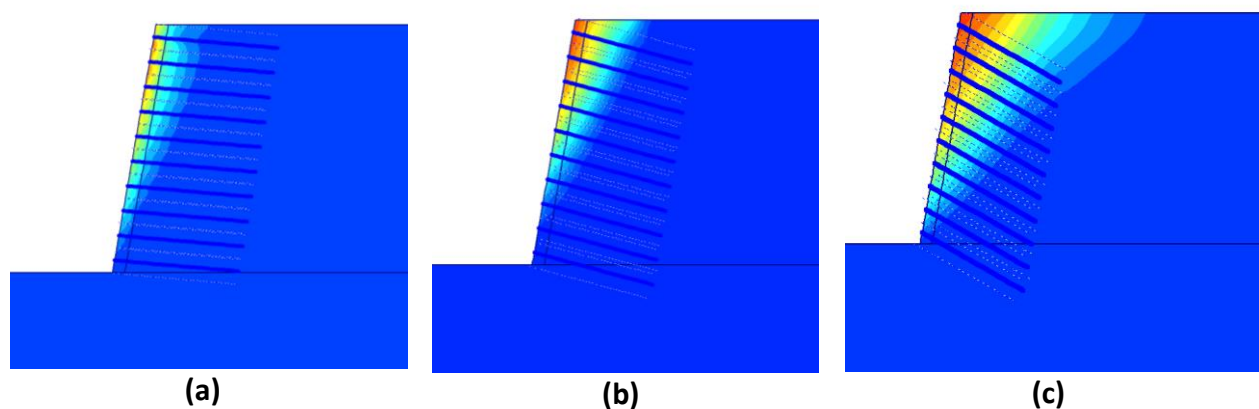


Figura 75 - Resultado das análises de estabilidade para o espaçamento vertical igual a 1,0 m e $c' = 15$ kPa do solo mais resistente para as seguintes condições: (a) inclinação do grampo igual a 5° e solo da face com 1,0 m; (b) inclinação do grampo igual a 15° e solo da face com 1,0 m; (c) inclinação do grampo igual a 30° e face com 1,0 m; (d) inclinação do grampo igual a 5° e face com 2,0 m; (e) inclinação do grampo igual a 15° e face com 2,0 m e (f) inclinação do grampo com 30° e face com 2,0 m



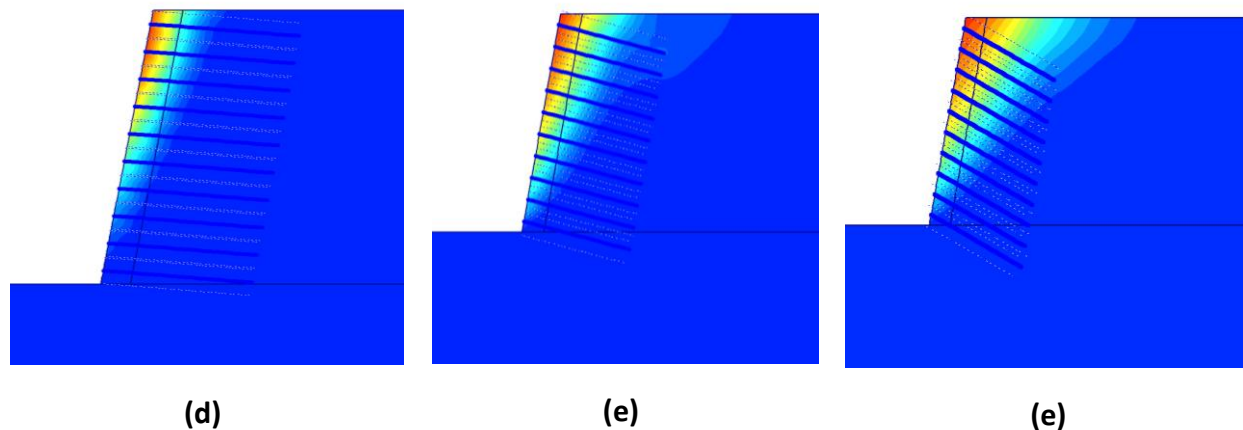


Figura 76 - Resultado das análises de estabilidade para o espaçamento vertical igual a 2,0 m e $c' = 15$ kPa do solo mais resistente para as seguintes condições: (a) inclinação do grampo igual a 5° e solo da face com 1,0 m; (b) inclinação do grampo igual a 15° e solo da face com 1,0 m; (c) inclinação do grampo igual a 30° e face com 1,0 m; (d) inclinação do grampo igual a 5° e face com 2,0 m; (e) inclinação do grampo igual a 15° e face com 2,0 m e (f) inclinação do grampo com 30° e face com 2,0 m

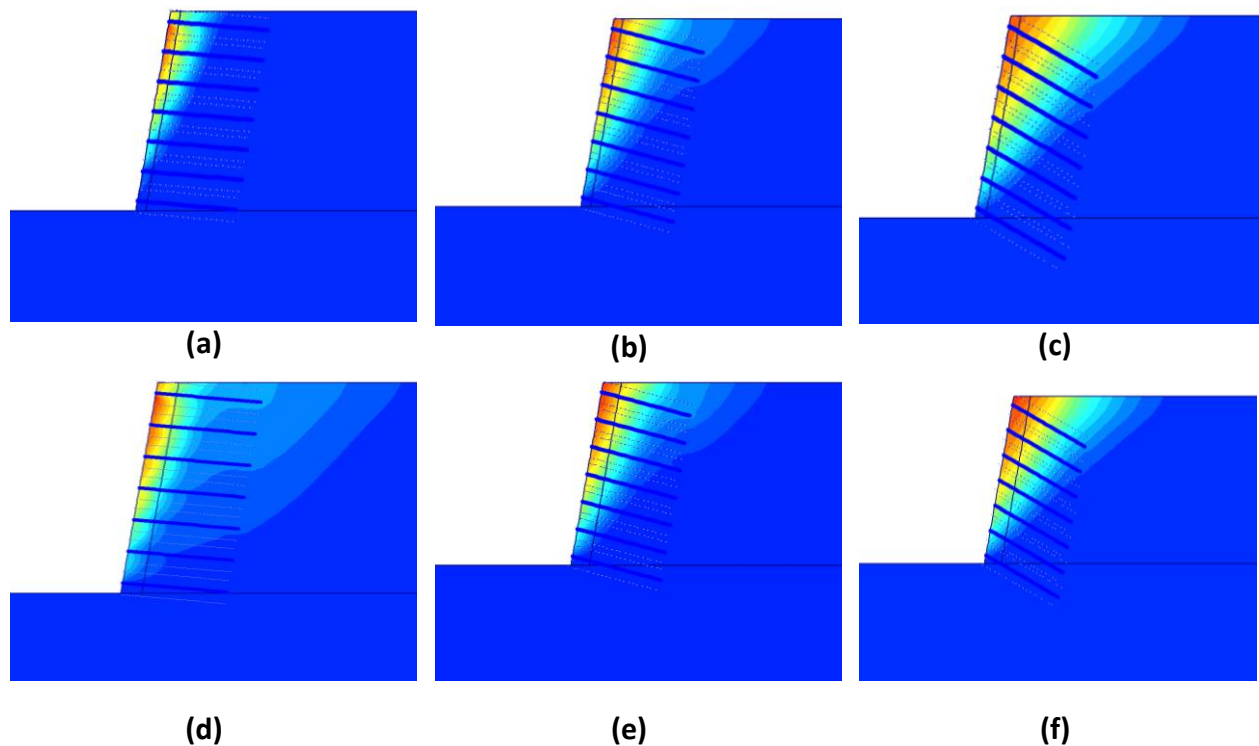


Figura 77 - Resultado das análises de estabilidade para o espaçamento vertical igual a 3,0 m e $c' = 15$ kPa do solo mais resistente para as seguintes condições: (a) inclinação do grampo igual a 5° e solo da face com 1,0 m; (b) inclinação do grampo

igual a 15° e solo da face com 1,0 m; (c) inclinação do grampo igual a 30° e face com 1,0 m; (d) inclinação do grampo igual a 5° e face com 2,0 m; (e) inclinação do grampo igual a 15° e face com 2,0 m e (f) inclinação do grampo com 30° e face com 2,0 m

A Figura 78 à Figura 80 apresentam as superfícies obtidas para o espaçamento vertical igual a 2,0 m, onde se verifica que a ruptura ocorre na face menos resistente.

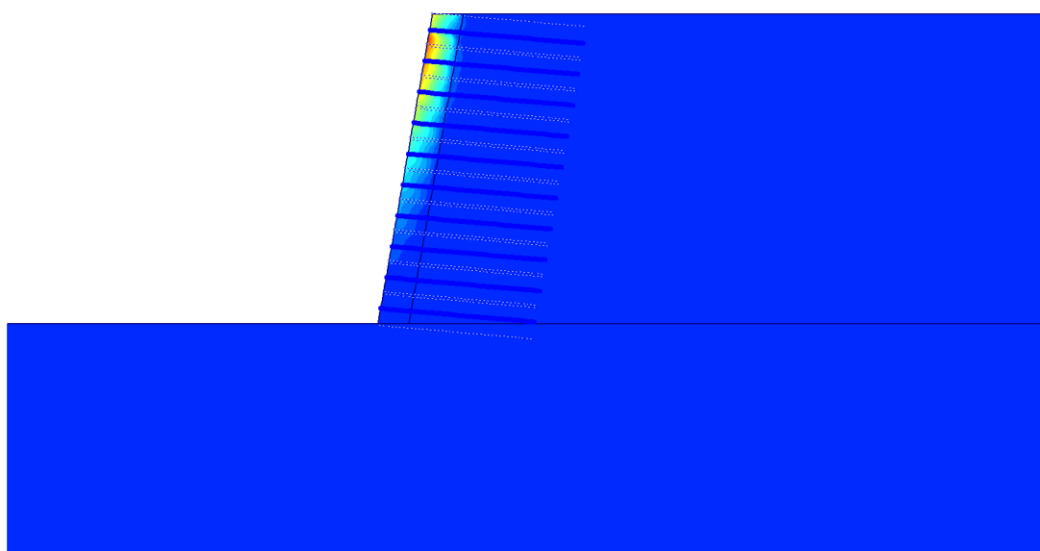


Figura 78 - $S_v = 2,0$ m, inclinação = 5° , espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa

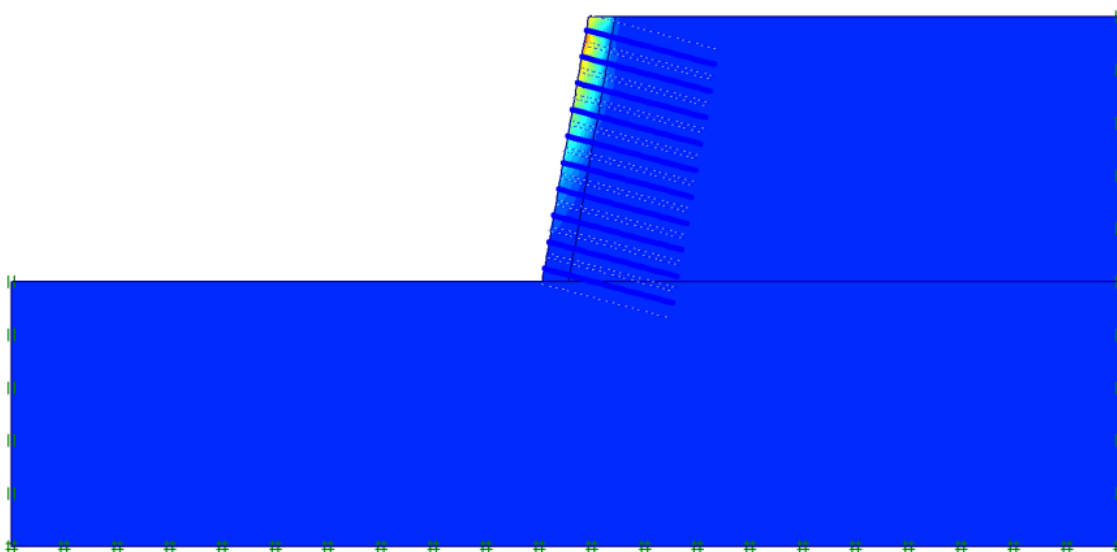


Figura 79 - $S_v = 2,0$ m, inclinação = 15° , espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa

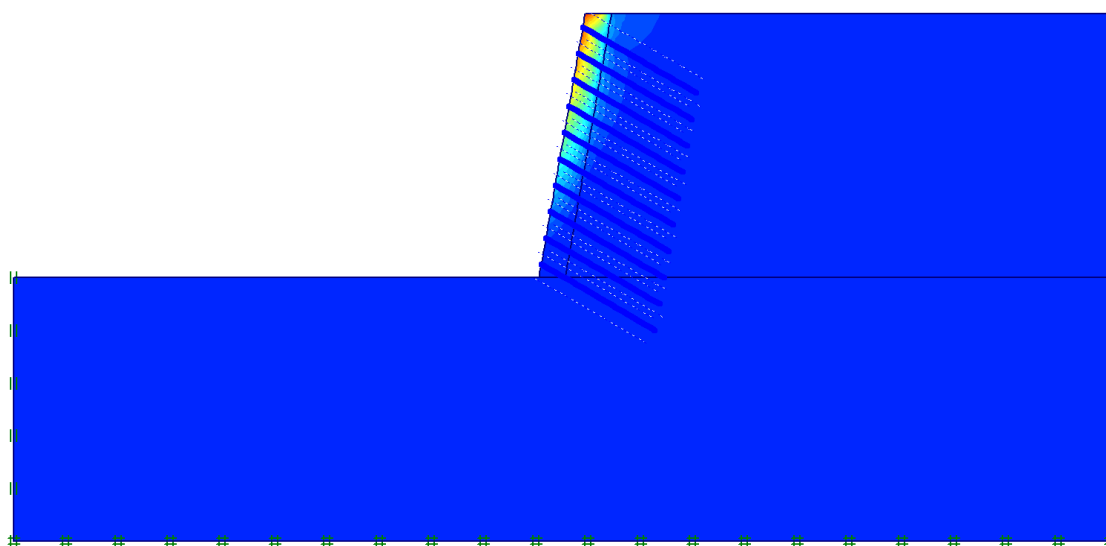


Figura 80 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 30° , espessura do solo menos resistente= $2,0$ m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa

As superfícies de ruptura obtidas para o espaçamento vertical de $3,0$ m estão apresentadas na Figura 81 à Figura 83. Mais uma vez, observa-se que a ruptura ocorre na face.

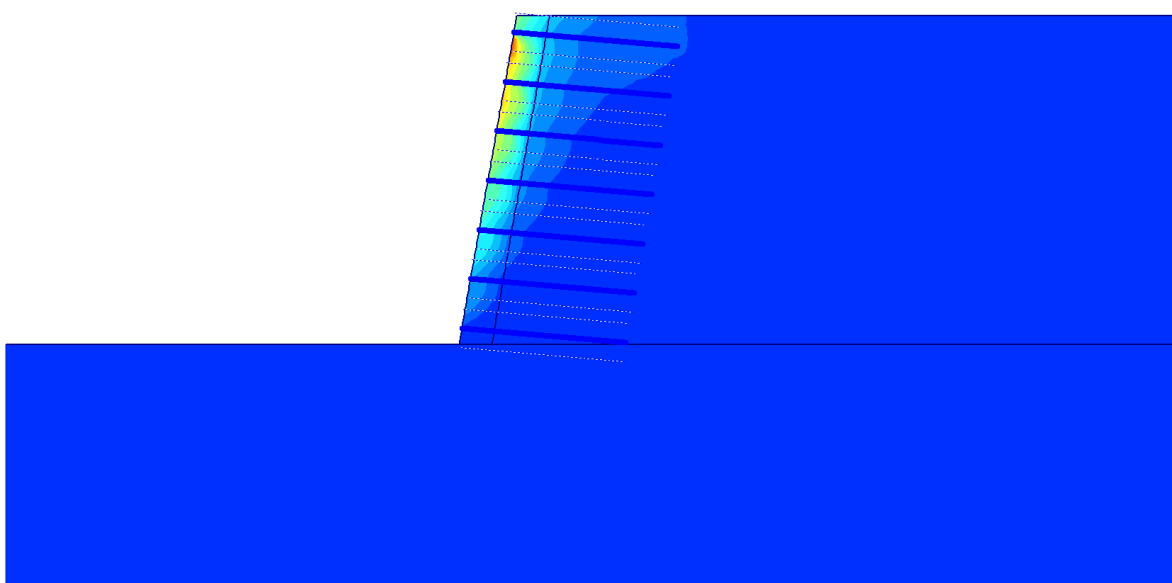


Figura 81 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 5° , espessura do solo menos resistente= $2,0$ m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa

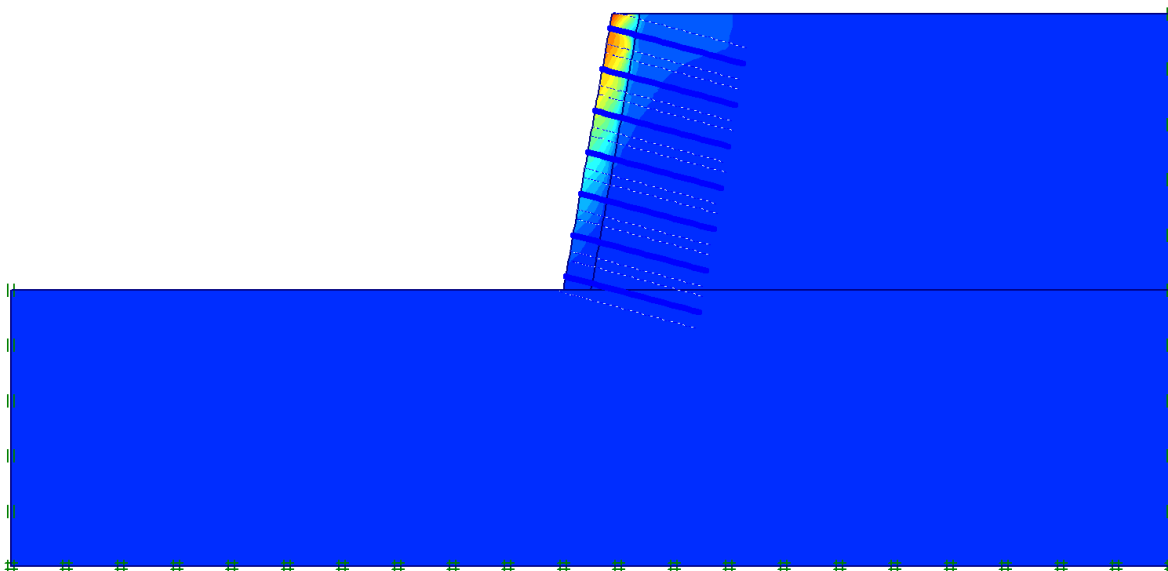


Figura 82 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 15° , espessura do solo menos resistente= $2,0$ m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa

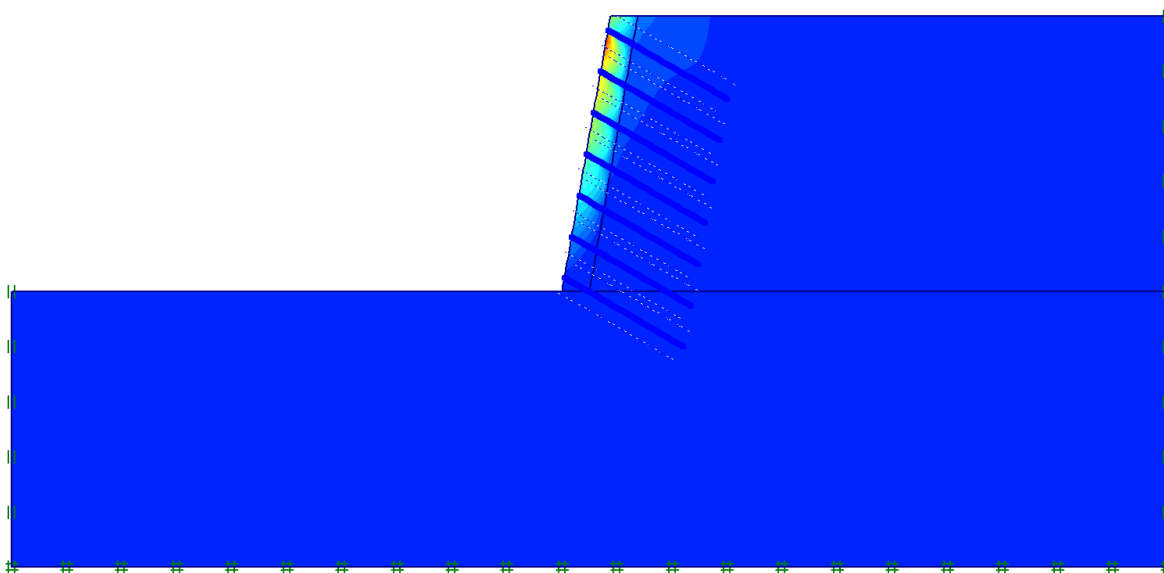


Figura 83 - $S_v = 3,0$ m, inclinação= 30° , espessura do solo menos resistente= $2,0$ m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa

Este comportamento da superfície de ruptura só ocorreu para os maiores espaçamentos verticais dos grampos ($2,0$ m e $3,0$ m) e no pior cenário da análise quando a espessura da camada de solo menos resistente da face é máxima ($2,0$ m). Além disso, essa situação só foi evidenciada quando o solo abaixo da camada da face

do talude apresentava sua coesão igual a 30 kPa, ou seja, possivelmente a ruptura é caracterizada por talude infinito. Um talude é denominado infinito quando a relação entre as suas grandezas geométricas, extensão e espessura for muito grande e o escorregamento é translacional e paralelo à superfície do talude do mesmo modo que obtido na modelagem.

O fato de não ser observada a ruptura na face pelo GeoSlope é porque este programa não leva em consideração o revestimento da face. É assumido que existe alguma forma de revestimento que impede que o solo se espraie pelo reforço. Isso poderia ser por concreto projetado, painel pré-moldado, tecido envolvente ou outro componente, de tal forma que a fragmentação ou perda de solo não ocorra a partir da face (GEO-SLOPE, 2008) e sim pela massa de solo na zona ativa da superfície de ruptura que rompe.

Pela fórmula de equilíbrio limite, apenas as forças resistentes atuando sobre a potencial massa de solo que tende a deslizar entram no cálculo. Forças associadas ao revestimento, conseqüentemente, não vão entrar diretamente na análise. As superfícies circular e não circular encontradas nas análises pelo GeoSlope, são de acordo com cada método usado, que não permitem que o solo plastifique na camada de solo menos resistente das condições analisadas neste trabalho e já possuem uma superfície de ruptura pré-estabelecida (por exemplo, superfície tende a assumir essa geometria/condição circular no método de Bishop).

O GeoSlope entende que o talude possui alguma proteção da face sem nenhuma função estrutural, apenas de proteção contra a instabilidade local da face que permitiria que o solo se espraiasse pelo reforço, podendo ser até mesmo uma membrana.

Este é um conceito importante, particularmente para o reforço perto do pé do talude onde a superfície crítica de deslizamento fica perto da face do reforço. O revestimento em si pode ser considerado em uma análise de elementos finitos, como o que foi analisado no PLAXIS.

A discrepância entre o FS dessas condições destacadas acima e a superfície de ruptura compreendida na camada menos resistente de solo da face no PLAXIS sendo diferente da ruptura pelo equilíbrio limite dos métodos oferecidos pelo GeoSlope levantaram a hipótese dessa divergência ser causada pela diferença da abordagem de cada programa relacionada à face.

Com isso, para esses casos foram rodadas novas modelagens com os mesmos parâmetros geotécnicos e considerando uma proteção superficial da face com concreto projetado de 0,5 cm, camada bem fina com exclusiva finalidade de proteger contra rupturas localizadas, sem nenhuma função estrutural no talude. Os parâmetros do concreto da face adotados estão apresentados na Tabela 25:

Tabela 25 - Parâmetros da proteção superficial da face do talude com concreto projetado

Parâmetros da Face						
E (MPa)	E (kN/m²)	esp (m)	EA	I (kN/m²/m)	EI	w
25.000	25.000.000	0,005	125.000	1,0417E-08	0,26	0,04

Uma camada bem fina de revestimento na face do talude, de 0,5 cm, foi adotada para representar uma membrana, sem nenhuma função estrutural, protegendo a face contra instabilidades locais que permitiriam que o solo se espraiasse pelo reforço. Essa membrana foi adotada para que os resultados fossem alterados o mínimo possível e para que fosse possível analisar o comportamento da ruptura do talude com apenas com uma proteção superficial com a finalidade de evitar erosões e instabilidades locais.

A Figura 84 apresenta os parâmetros inseridos no PLAXIS do revestimento da face do talude.

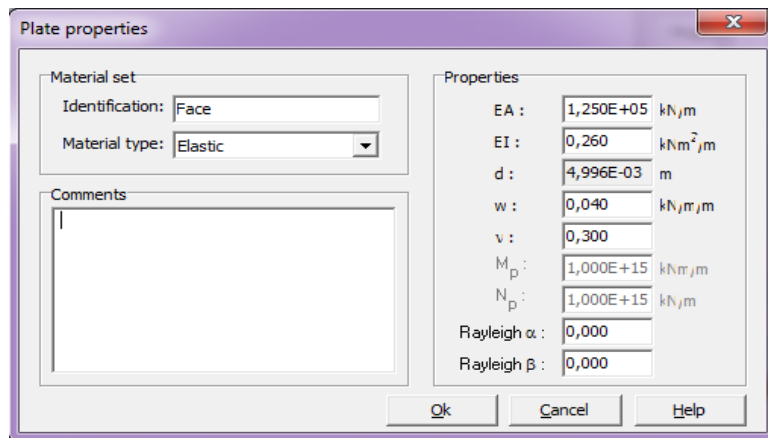


Figura 84 - Parâmetros inseridos no PLAXIS do revestimento da face do talude

Os novos resultados das análises numéricas serão apresentados na Figura 85 à Figura 87, considerando o espaçamento vertical de 2,0 m.

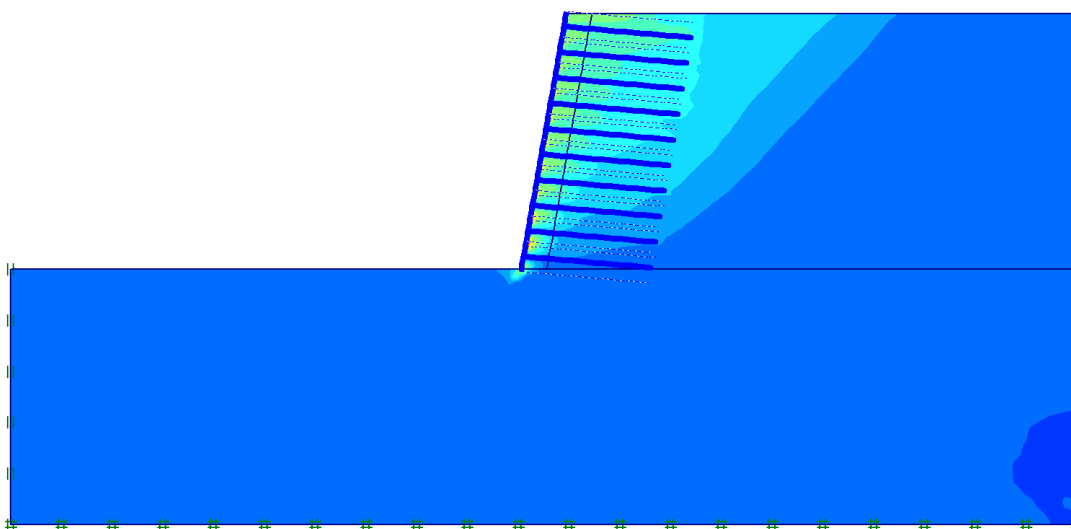


Figura 85 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 5° , espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)

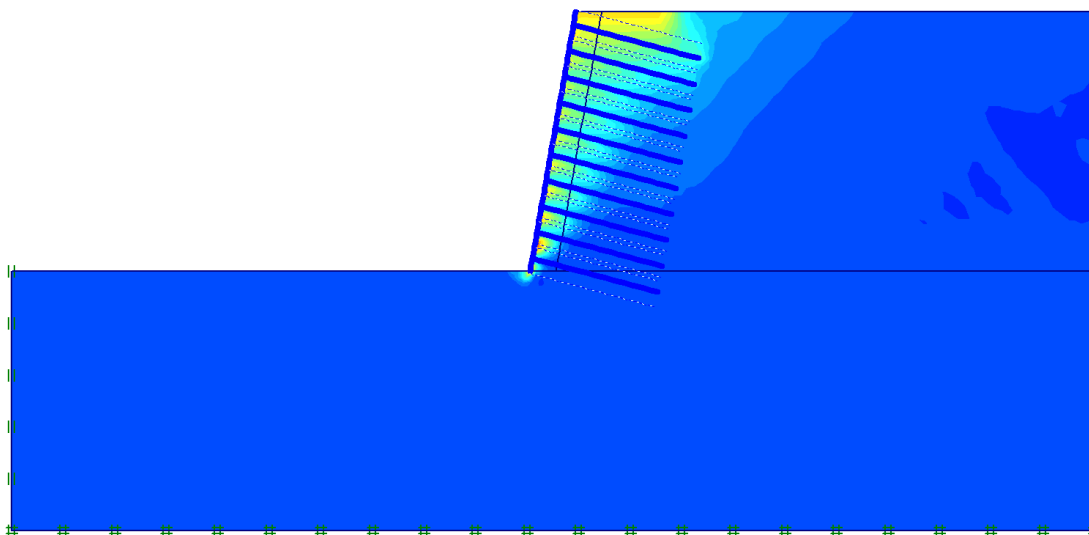


Figura 86 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 15° , espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)

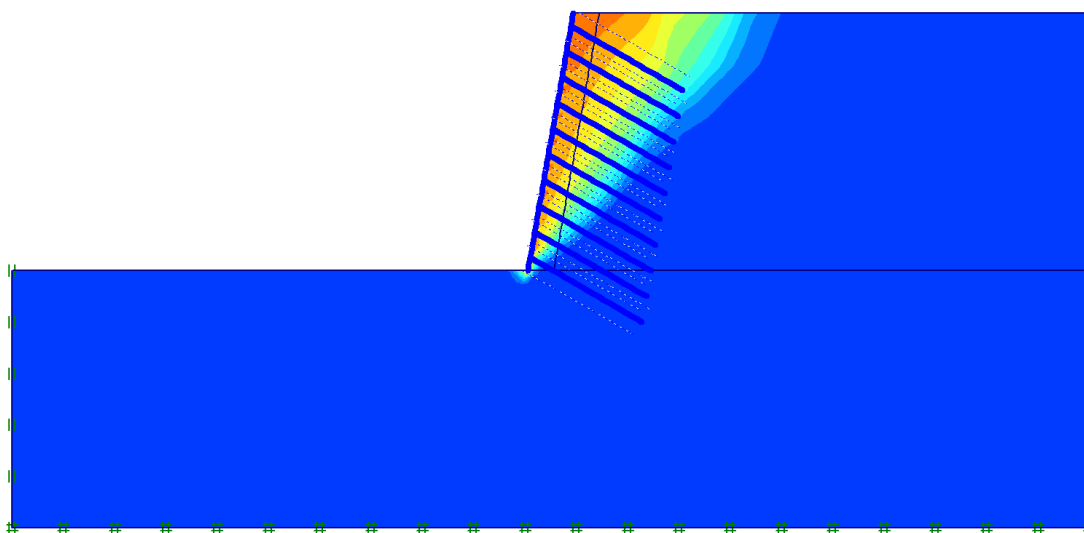


Figura 87 - $S_v = 2,0$ m, inclinação= 30° , espessura do solo menos resistente= 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)

Para o espaçamento vertical de 3,0 m, as análises numéricas forneceram os resultados apresentados na Figura 88 à Figura 90.

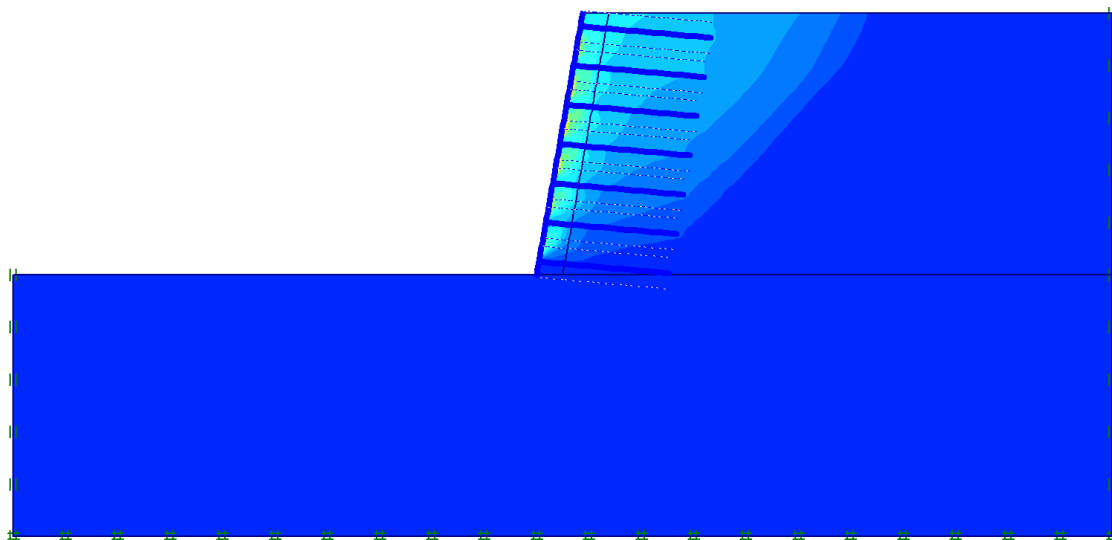


Figura 88 - $S_v = 3,0$ m, inclinação = 5° , espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)

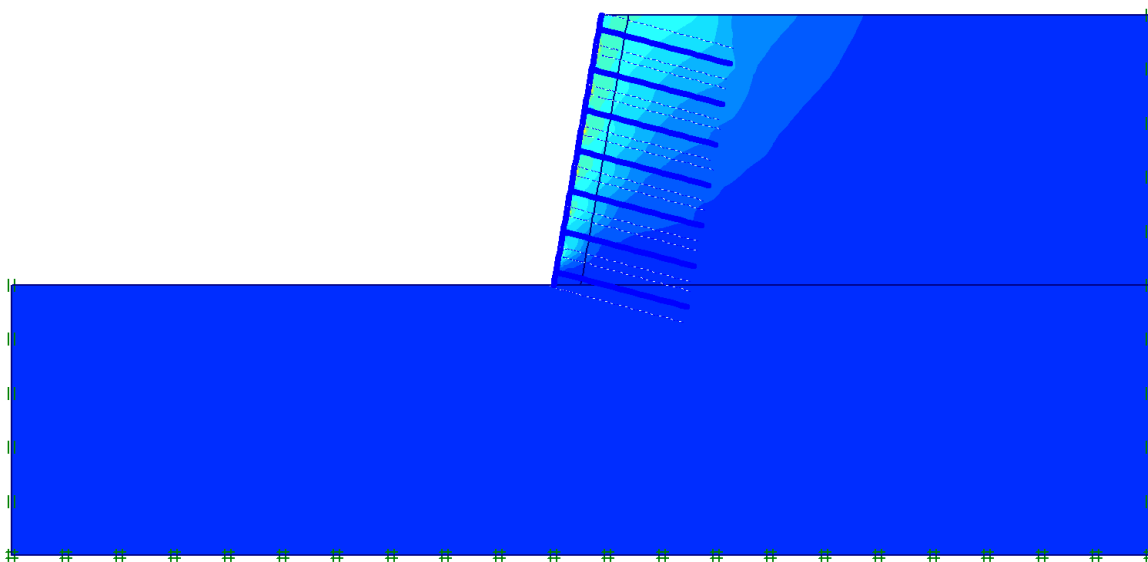


Figura 89 - $S_v = 3,0$ m, inclinação = 15° , espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)

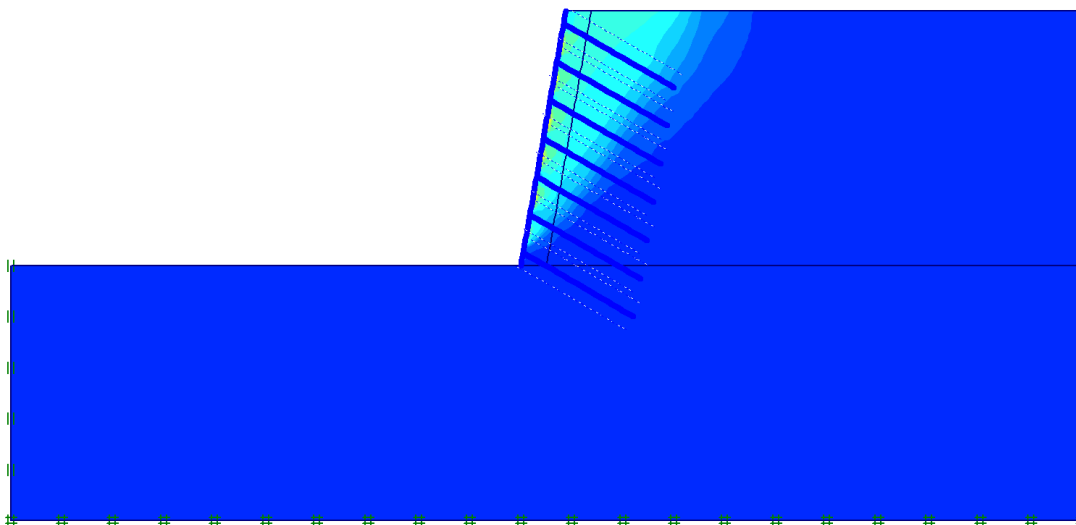


Figura 90 - $S_v = 3,0$ m, inclinação = 30° , espessura do solo menos resistente = 2,0 m, solo mais resistente $c' = 30$ kPa (Considerando revestimento da face)

As novas análises, considerando um revestimento na face do talude de concreto projetado com uma espessura de 0,5 cm (como se fosse uma membrana sem nenhuma função estrutural), forneceram valores de FS maiores (Tabela 26) e formas da superfície de ruptura deixaram de ser planares e apresentaram formato esperado e similar aos encontrados nas outras análises.

Tabela 26 - Comparação do F.S. do PLAXIS e GeoSlope antes e após a consideração do revestimento na face do talude

Sv (m)	incl (°)	ANTES	DEPOIS
		FS Plaxis	FS Plaxis
2,00	5	1,170	1,928
2,00	15	1,040	1,598
2,00	30	0,843	1,281
3,00	5	0,984	1,453
3,00	15	0,900	1,335
3,00	30	0,764	1,208

Obs.: Espessura da camada de 2,0 m, coesão igual a 30 kPa e revestimento da face de 0,5 cm.

O comportamento observado no gráfico da Figura 62, quando o $c' = 30$ kPa, é justificado pelas considerações feitas neste Item. Refazendo o gráfico utilizando os valores de deslocamentos máximos obtidos quando foi considerada uma membrana de revestimento na face do talude, o comportamento da curva volta a ser como o esperado, em que o espaçamento ideal para o maciço de solo grampeado é o de 2,0 m independente da espessura da camada de solo da face do talude (Figura 91).

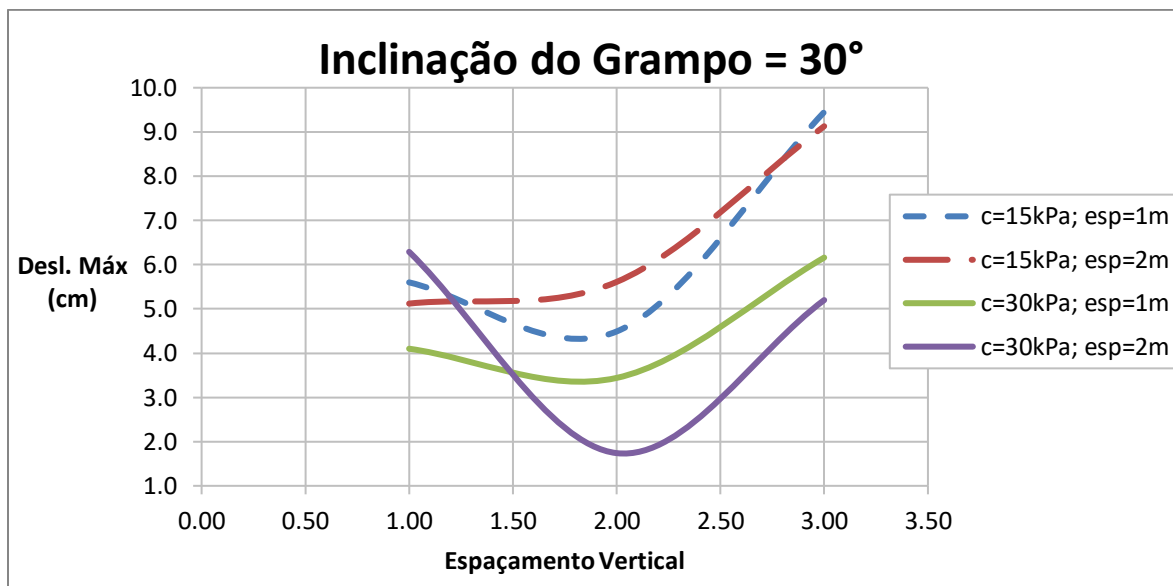


Figura 91 - Influência dos espaçamentos verticais dos grampos nos deslocamentos máximos da estrutura de solo grampeado (considerando uma membrana de revestimento na face do talude na condição que apresenta $c' = 30$ kPa)

5. CONCLUSÕES

As obras de solo grampeado têm sido frequentes no Brasil devido à adequação as encostas naturais e porque esta solução é facilmente aplicada a taludes inclinados, sem a necessidade de cortes adicionais para a verticalização da parede.

O presente trabalho teve como objetivo principal realizar análises paramétricas de talude, reforçado com a técnica do solo grampeado através do programa PLAXIS e avaliar a influência do revestimento da face no fator de segurança e na magnitude dos deslocamentos. As análises realizadas permitiram as seguintes conclusões:

- I. A comparação do programa PLAXIS com o GeoSlope e o método de Mitchell e Villet (1987) se mostraram importante para garantir a confiabilidade nos parâmetros geotécnicos e dos elementos utilizados nas análises;
- II. De um modo geral, o aumento do espaçamento vertical entre os grampos implica em maiores deslocamentos máximos e menores fatores de segurança;
- III. Observou-se, também, que conforme as inclinações dos grampos aumentavam, os deslocamentos máximos também aumentavam, com a redução do F.S.;
- IV. Coerentemente, conforme a espessura da camada de solo menos resistente da face aumenta, o solo grampeado se mostra mais instável, pois a resistência do maciço é reduzida e aumenta os deslocamentos máximos;
- V. A inclinação dos grampos pode otimizar a mobilização das tensões, porém, a inclinação acentuada dos grampos em direção a parte inferior do talude reduz as tensões mobilizadas e favorecem as tensões de cisalhamento e momentos fletores, comprometendo a estrutura;
- VI. Para alguns casos ($S_v = 2,0$ e $3,0m$) quando o solo menos resistente da face apresenta a espessura igual a 2,0 m e o solo mais resistente tem coesão igual a 30 kPa, a ruptura é planar e ocorre no contato entre essas duas camadas de solo;

- VII. A ruptura no contato entre solos só acontece na situação mais crítica de dimensionamento do solo grampeado, quando há problemas envolvendo uma camada de solo mais fina sobre uma camada de solo mais resistente;
- VIII. Após novas análises para os casos em que ocorrem as rupturas típicas planares, foi considerada uma espessura de revestimento da face muito fina (como se fosse uma membrana) e, como consequência, a superfície de ruptura retomou a sua forma esperada e semelhante às demais;
- IX. O revestimento da face se mostrou importante para evitar instabilidades locais e serve também para combater erosões no talude, com isso, uma simples proteção superficial já é suficiente;
- X. As análises mostraram que a face não tem função principal na estabilização, podendo até ser dispensada em algumas situações. Com isso, não há necessidade da face ser mais robusta e apresentar função estrutural, visto que isto torna a obra mais onerosa desnecessariamente;
- XI. O PLAXIS mostrou ser um *software* capaz de reproduzir o comportamento de estruturas em solo grampeado.

REFERÊNCIAS

- [1] Baêta, F. d., & Sartor, V. (1999). Apostila da Universidade Federal de Viçosa. Resistência dos materiais e dimensionamento de estruturas para construções agrícolas.
- [2] Brinkgreve, R. B. (1999). Beyond 2000 in computational geotechnics - Ten years of Plaxis international.
- [3] Brinkgreve, R. B., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2017). PLAXIS 2D Manuals.
- [4] Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., & Ueblacker, G. (1998). Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Wall. Washington, D. C.: U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration.
- [5] CEMADEN. (s.d.). Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. Obtido de <http://www.cemaden.gov.br/>
- [6] Coutinho, R. Q., & Silva, M. M. (s.d.). Apostila de Mecânica dos Solos 2. Estabilidade de Taludes. DEC/UFPE.
- [7] Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). Fundamentos de Engenharia Geotécnica - Tradução da 8ª edição Norte Americana. CENGAGE Learning.
- [8] Dutra, V. A. (2013). Projeto de Graduação . Projeto de estabilização de taludes e estruturas de contenção englobando dimensionamento geotécnico e estrutural.
- [9] Feijó, R. L. (2007). Tese de Doutorado. Monitoração de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnáissico não saturado.
- [10] Feijó, R. L., & Ehrlich, M. (2001). Anais da III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE). Resultados de ensaios de arrancamento em grampos injetados em dois pontos do município do Rio de Janeiro.

- [11] Feijó, R. L., & Ehrlich, M. (2006). Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). “Análise dos resultados do monitoramento de uma obra experimental em solo grampeado.
- [12] GEO-RIO. (2014). Manual Técnico de Encostas - Volume I.
- [13] GEO-RIO. (2014). Manual Técnico de Encostas - Volume II.
- [14] GEO-SLOPE. (2008). Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version, 3ª edição. GEO-SLOPE International, Ltd. .
- [15] Gerscovich, D. (2009). Apostila UERJ - Estabilidade de Taludes.
- [16] Gerscovich, D. (2016). Estabilidade de Taludes. Oficina de Textos.
- [17] Gerscovich, D. M., Sieira, A. C., Lima, A. P., & Sayão, A. S. (Setembro de 2005). IV Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – IV COBRAE. Técnicas de modelagem numérica de escavações de taludes em solo grampeado, pp. 671 - 680.
- [18] Lima, A. P. (2002). Dissertação de Mestrado. Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado.
- [19] Lima, A. P. (2007). Tese de Doutorado. Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss.
- [20] Lima, A. P., Springer, F. O., Sayão, A. S., & Gerscovich, D. M. (2002). Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Modelagem Numérica de Estruturas de Contenção com Solo Grampeado.
- [21] Marangon, M. (2009). Apostila UFJF. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra.
- [22] Mitchell, J. K., & Villet, W. C. (1987). Reinforcement of earth slopes and embankments. Washington, D. C.: NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board.

- [23] Ortigão, J. A., Zirlis, A. C., & Palmeira, E. M. (1993). Experiência com solo grampeado no Brasil - 1970-1993. *Revista Solos e Rochas, ABMS*, 291 - 304.
- [24] Santos, R. B. (2014). Projeto de Graduação . Estudo da influência da rede de fluxo na análise de estabilidade de talude no Município de Nova Friburgo - RJ.
- [25] Solotrat. (2018). Manual de Serviços Geotécnicos Solotrat - 6ª Edição.
- [26] Springer, F. O. (2001). Dissertação de Mestrado. Estudos da deformabilidade de escavações.
- [27] Springer, F. O. (2006). Tese de Doutorado. Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss.
- [28] Springer, F. O., Gerscovich, D. M., & Sayão, A. S. (2001). III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Deformabilidade de taludes estabilizados com solo grampeado, pp. 483-490.
- [29] Teixeira, C. F. (2006). Dissertação Mestrado. Análise Numérica de Ensaio em Solo Reforçado com.
- [30] Teixeira, W. (2000). Decifrando a Terra. Oficina de Textos.
- [31] Vargas, M. (1977). Introdução à mecânica dos solos. Universidade de São Paulo e McGraw-Hill do Brasil Ltda.
- [32] Varnes, & (2016), a. G. (1978). Estabilidade de Taludes.

ANEXO

Solo Grampeado – Método Mitchell and Villet (1987)

	Parâmetros do solo		
	c' (Kpa)	ϕ (°)	γ (KN/m ³)
Solo 01	15	33	18
Solo de Fundação	30	38	22

Parâmetros do grampo	
ϕ furo	75 mm
ϕ barra	32 mm
Sv	2 m
Sh	2 m
inclinação	15°

Superfície de ruptura de Rankini

$$\varphi = \frac{i + \phi}{2} = \frac{80 + 33}{2} = 56,5^\circ$$

Esforço resistente a tração em cada grampo é limitado a resistência da barra de aço CA-50 de 32 mm.

- Barra de aço CA-50: $f_{yk} = 500\text{MPa} = 0,5 \text{ KN/mm}^2$
- $F_{lim} = 0,9 \cdot f_{yk} \cdot A_s$, sendo:

F_{lim} = Força limite a tração da barra de aço;

f_{yk} = Tensão de escoamento da barra de aço;

A_s = Área da seção transversal da barra de aço.

$$F_{lim} = 0,9 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 32^2}{4} \right) = 361,91 \text{ KN} \cong 362 \text{ KN}$$

Atrito solo/calda

- $F_{m\acute{a}x} = q_s \cdot A_{lateral}$, sendo:

$F_{m\acute{a}x}$ = Força de atrito máxima;

q_s = Atrito lateral unitário;

$A_{lateral}$ = Área lateral do furo por metro.

$$F_{m\acute{a}x} = 250 \cdot \left(2\pi \cdot \frac{0,075}{2} \right) = 58,9 \text{ KN/m de grampo}$$

Face as incertezas dos parâmetros geotécnicos: $F_d = 0,90 F_{m\acute{a}x} \cong 53 \text{ KN/m}$

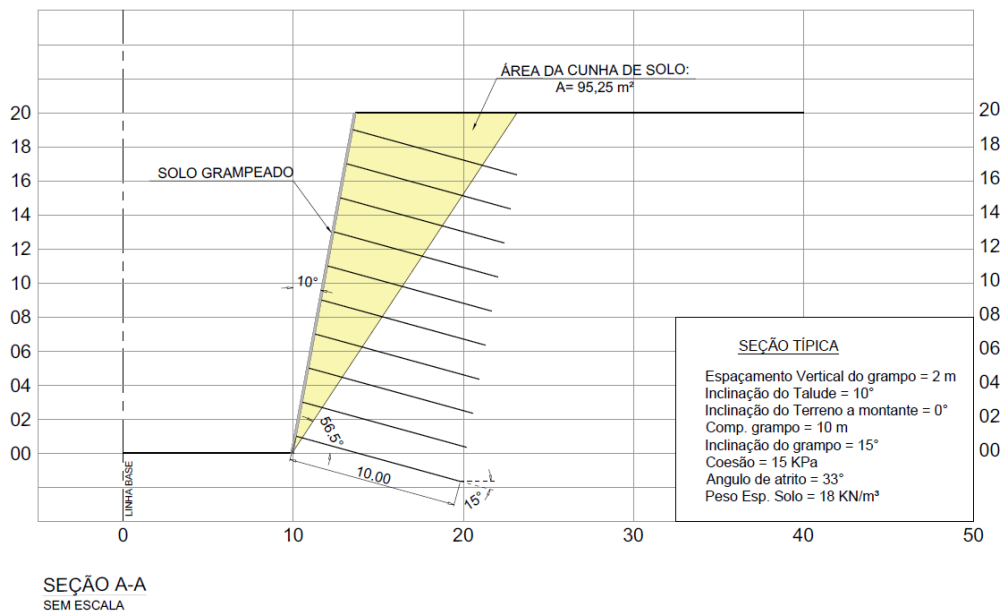
$F_{lim a\grave{c}o}$ tem que ser maior que a $F_{m\acute{a}x}$ do atrito solo/calda (ver explicação tutorial geoslope)

$$\frac{F_{lim}}{F_{m\acute{a}x}} = \frac{362}{53} = 6,83 \text{ m} = L_{ui \text{ máx}}$$

$L_{ui \text{ máx}}$ = máximo valor de comprimento ancorado para a estrutura não ficar superdimensionada e não romper na calda primeiro.

Estabilidade

PERFIL DE SOLO GRAMPEADO



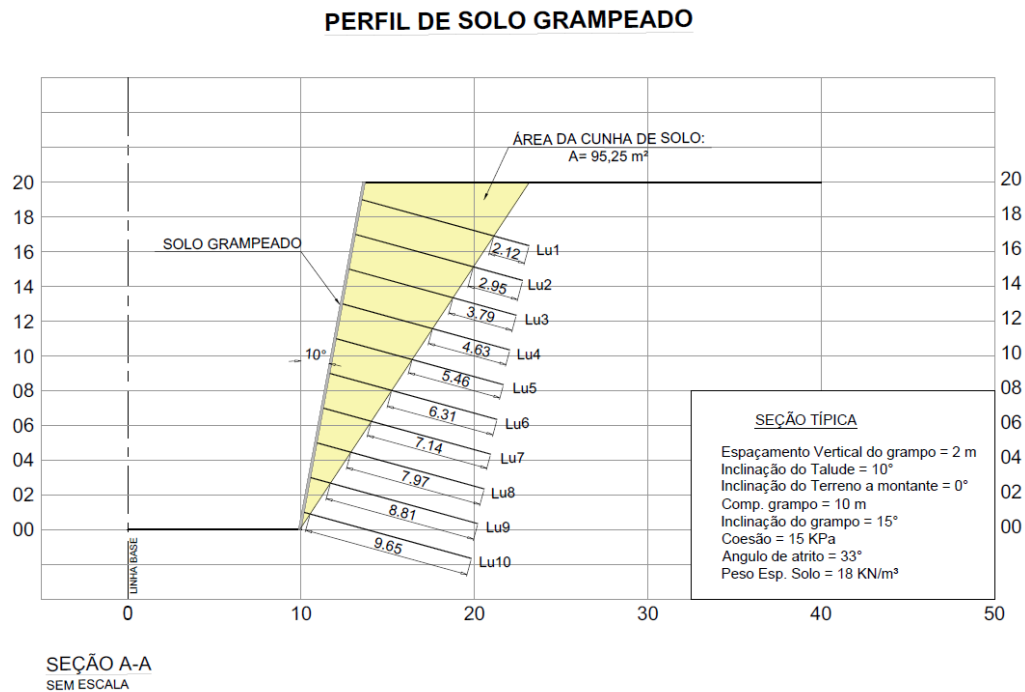
- $w = S \cdot \gamma$ (peso da cunha de solo)

$S =$ Área da cunha de solo;

$\gamma =$ Peso específico do solo.

$w = 95,25 \times 18 = 1714,5$ KN/m (extensão da estrutura)

Esforços resistentes nos grampos



$$L_{u1} = 2,12 \text{ m}$$

$$L_{u2} = 2,95 \text{ m}$$

$$L_{u3} = 3,79 \text{ m}$$

$$L_{u4} = 4,63 \text{ m}$$

$$L_{u5} = 5,46 \text{ m}$$

$$L_{u6} = 6,31 \text{ m}$$

$$L_{u7} = 7,14 \text{ m} > L_{m\acute{a}x} = 6,83 \text{ m}$$

$$L_{u8} = 7,97 \text{ m} > L_{m\acute{a}x} = 6,83 \text{ m}$$

$$L_{u9} = 8,81 \text{ m} > L_{m\acute{a}x} = 6,83 \text{ m}$$

$$L_{u10} = 9,65 \text{ m} > L_{m\acute{a}x} = 6,83 \text{ m}$$

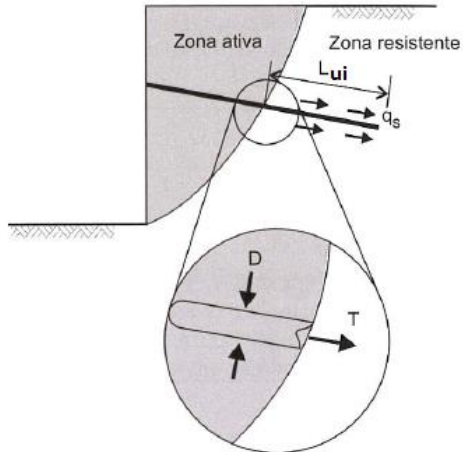


Figura 03 - Adaptado do Manual da GEORIO
Volume I - página 281

$$L_{ui} > L_{m\acute{a}x} \text{ em 4 grampos!!!}$$

Carga admissível em cada grampo:

$$T_i = \frac{F_{m\acute{a}x}}{F.S.} \cdot L_{ui} \rightarrow \frac{F_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{53}{1,5} = 35,33 \text{ KN/m}$$

$$T_p = \frac{T_i}{F.S.} = \frac{T_i}{1,5}$$

$$T_r = \frac{F_{lim\ a\c{c}o}}{F.S.} = \frac{362}{1,5} = 241,33$$

De acordo com o Manual da GEORIO, Volume I – página 281, pelo fato dos grampos não serem protendidos há mais incerteza na determinação do valor das cargas dos grampos (T_i), que devem ser consideradas nas análises de estabilidade.

Recomenda-se considerar os seguintes valores:

- I. $T_i = T_p$ se $T_p < T_r$
- II. $T_i = T_r$ se $T_r < T_p$

Sendo:

T_p : Força de arrancamento;

T_r : Força de ruptura por tensão no grampo (ruptura do aço).

$$T_{i1} = 35,33 \times 2,12 = 74,90 \text{ KN}$$

$$T_{i2} = 35,33 \times 2,95 = 104,22 \text{ KN}$$

$$T_{i3} = 35,33 \times 3,79 = 133,90 \text{ KN}$$

$$T_{i4} = 35,33 \times 4,63 = 163,58 \text{ KN}$$

$$T_{i5} = 35,33 \times 5,46 = 192,90 \text{ KN}$$

$$T_{i6} = 35,33 \times 6,31 = 222,93 \text{ KN}$$

$$T_{i7} = 35,33 \times 7,14 = 252,26 \text{ KN}$$

$$T_{i8} = 35,33 \times 7,97 = 281,58 \text{ KN}$$

$$T_{i9} = 35,33 \times 8,81 = 311,25 \text{ KN}$$

$$T_{i10} = 35,33 \times 9,65 = 340,93 \text{ KN}$$

→ $T_{i7}, T_{i8}, T_{i9}, T_{i10}$ nesses grampos $T_r < T_p$,
logo, considerar $T_i = T_r = 241,33$

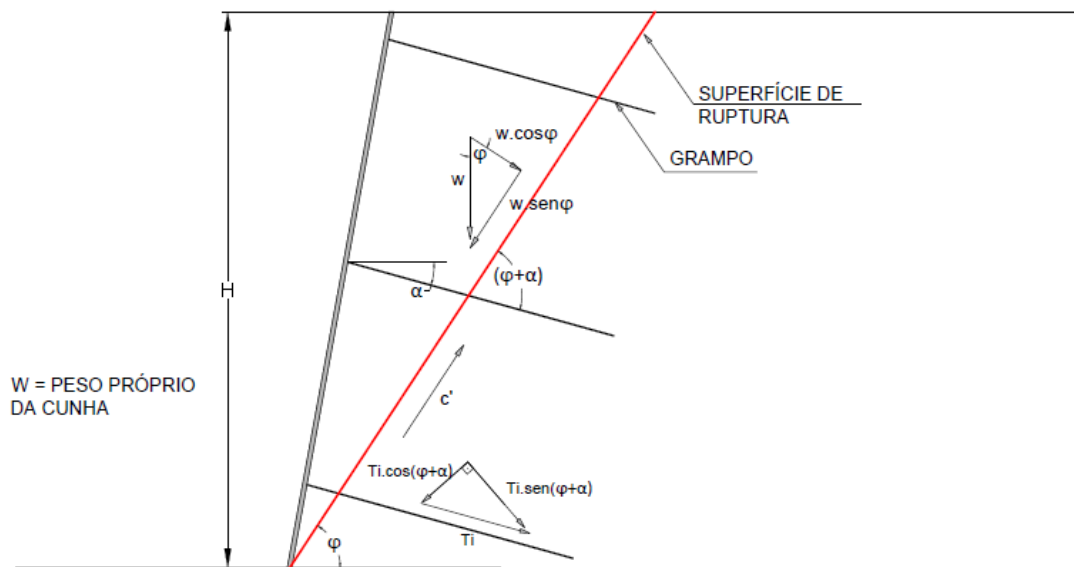
$$\Sigma T_i = 2.078,45 \text{ KN}$$

Novo valor de somatório considerando $T_{i7}, T_{i8}, T_{i9}, T_{i10} = Tr = 241,33 \text{ KN}$:

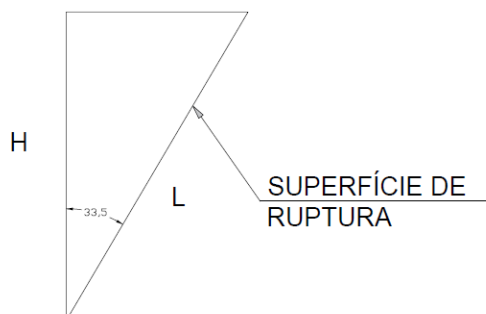
$$\Sigma Ti = 1857,75 \text{ KN}$$

$$T = \frac{\Sigma Ti}{Sh} = \frac{1857,75}{2} = 928,88 \text{ KN}$$

Cálculo do Fator de Segurança



$$FS = \frac{W \cdot \cos \varphi \cdot \text{tg} \phi + T \cdot \sin(\varphi + \alpha) \cdot \text{tg} \phi + c' L}{W \cdot \sin \varphi - T \cos(\varphi + \alpha)}$$



$$\cos 33,5 = \frac{20}{L} \therefore L \cong 24 \text{ m}$$

$$FS = \frac{1714,50 \cdot \cos 56,5 \operatorname{tg} 33 + 928,88 \cdot \operatorname{sen}(56,5 + 15) \operatorname{tg} 33 + 15 \times 24}{1714,50 \cdot \operatorname{sen} 56,5 - 928,88 \cdot \cos(56,5 + 15)}$$

$$FS = \frac{1548,14}{1132,79} \cong \mathbf{1,367}$$

Caso não sejam consideradas as recomendações do Manual da GEORIO, Volume I – página 281 (pois no método do Mitchell and Villet não são consideradas).

$$T = \frac{\sum Ti}{Sh} = \frac{2078,45}{2} = 1039,23 \text{ KN}$$

$$FS = \frac{1714,50 \cdot \cos 56,5 \operatorname{tg} 33 + 1039,23 \cdot \operatorname{sen}(56,5 + 15) \operatorname{tg} 33 + 15 \times 24}{1714,50 \cdot \operatorname{sen} 56,5 - 1039,23 \cdot \cos(56,5 + 15)}$$

$$FS = \frac{1616,21}{1097,70} \cong \mathbf{1,472}$$