

**PROJETO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM SOLO REFORÇADO E EM SOLO  
GRAMPEADO NA CIDADE DE SÃO FIDÉLIS**

FELIPE DE PAIVA NASCIMENTO E OLIVEIRA  
MARCONI NEVES SAMPAIO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
DEZEMBRO - 2007

**PROJETO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM SOLO REFORÇADO E EM SOLO  
GRAMPEADO NA CIDADE DE SÃO FIDÉLIS**

FELIPE DE PAIVA NASCIMENTO E OLIVEIRA  
MARCONI NEVES SAMPAIO

“Projeto Final em Engenharia Civil apresentado ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Civil”.

Orientador: Prof. Paulo César de Almeida Maia

Co-orientador: Prof. Sérgio Tibana

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
DEZEMBRO - 2007

**PROJETO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM SOLO REFORÇADO E EM SOLO  
GRAMPEADO NA CIDADE DE SÃO FIDÉLIS**

FELIPE DE PAIVA NASCIMENTO E OLIVEIRA  
MARCONI NEVES SAMPAIO

“Projeto Final em Engenharia Civil apresentado ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Civil”.

Aprovada em 06 de dezembro de 2007

Comissão Examinadora:

---

Prof. Robson Saramago (D.Sc., Geotecnia) – Terrae

---

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

---

Prof. Sérgio Tibana (Co-orientador, D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

---

Prof. Paulo César de Almeida Maia (Orientador, D.Sc., Engenharia Civil) – UENF

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço e em primeiro lugar a Jesus, por ter sido um amigo tão fiel e presença tão forte nos momentos de alegria e de necessidade.

Aos meus pais Maria Lúcia e José (Juquinha) pelo apoio, amor, compreensão e por terem me dado a oportunidade de concluir este curso. Vocês são responsáveis por tudo que sou hoje.

Às minhas irmãs Bethânia e Natália por sempre ficarem do meu lado e pelas palavras de incentivo. Vocês são muito importantes pra mim.

Aos amigos que fiz ao longo da Universidade. Pessoas especiais que fizeram dessa jornada algo mais suave e prazeroso.

Aos amigos Viviane, Carolina e Rafael. Sem o apoio, compreensão e alegria de vocês nada teria sido possível.

Ao orientador Paulo Maia e ao Co-orientador Sérgio Tibana pela compreensão e pela paciência.

E a todas as pessoas que me ajudaram de forma direta ou indireta para que tudo isso fosse possível.

*Marconi Neves Sampaio*

Com esperança de concluir essa caminhada, agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora, por me guiar e permitir que chegasse até aqui.

Aos meus pais, Carlos e Rosane, pelo amor e dedicação com que me apoiaram para me tornar o que sou hoje.

Aos meus irmãos Daniel e Rafael, pelos incentivos e pelas brigas, pois com elas também aprendemos.

A todos os amigos da Faculdade, que não foram apenas colegas e se tornaram amigos de verdade, inclusive nas festas.

Aos professores e funcionários que ajudaram de alguma forma nessa conquista.

Ao orientador Paulo Maia e ao Co-orientador Sérgio Tibana, também pela compreensão e pela paciência.

*Felipe de Paiva Nascimento e Oliveira*

## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES.....	xvii
CAPÍTULO I - Introdução .....	17
1.1 - Objetivos .....	17
1.2 - Justificativa .....	17
CAPÍTULO II – Metodologia .....	19
2.1 - Solo reforçado .....	19
2.1.1 - Definição .....	19
2.1.2 - Parâmetros de projeto .....	20
2.1.3 - Estabilidade externa .....	21
2.1.4 - Segurança contra o deslizamento da estrutura ao longo da base .....	22
2.1.5 - Segurança contra o Tombamento .....	24
2.1.6 - Segurança contra a ruptura do solo de fundação.....	24
2.1.7 - Segurança contra a ruptura global .....	26
2.1.8 - Estabilidade interna .....	27
2.1.9 - Rigidez relativa solo-reforço .....	29
2.1.10 - Compactação do solo .....	30
2.1.11 - Determinação das tensões máximas nos reforços .....	31
2.1.12 - Análise para verificação de arrancamento .....	32
2.1.13 - Fatores de redução .....	33
2.2 - Solo grampeado .....	34
2.2.1 - Definição .....	34
2.2.2 - Vantagens e limitações da técnica .....	34
2.2.3 - Método Construtivo .....	36
2.2.4 - Execução dos Chumbadores .....	36
2.2.5 - Revestimento de concreto projetado .....	38
2.2.6 - Armação .....	39
2.2.7 - Metodologia de Cálculo .....	40
CAPÍTULO III - Caso de Estudo .....	43

3.1 - Descrição .....	43
3.2 - Dados do projeto .....	46
3.2.1 - Resultado dos ensaios de Compressão triaxial .....	46
3.2.2 - Resultado dos ensaios de Cisalhamento direto .....	47
3.2.3 - Resultado dos ensaios de Caracterização física .....	49
CAPÍTULO IV - Análise de Estabilidade Global do Talude .....	50
CAPÍTULO V - Cálculo do Muro de solo reforçado .....	53
5.1 - Regularização do Talude .....	53
5.2 - Características do solo e do muro (seção mais crítica do talude) .....	56
5.2.1 - Geometria do muro .....	56
5.2.2 - Parâmetros do solo .....	56
5.2.3 - Parâmetros do geossintético .....	57
5.2.4 - Características do rolo compactador .....	57
5.3 - Análise de estabilidade externa .....	57
5.3.1 - Determinação do comprimento do reforço .....	57
5.3.1.a) - Cálculo do empuxo da zona não reforçada .....	57
5.3.1.b) - Verificação do deslizamento .....	58
5.3.1.c) - Verificação de tombamento .....	58
5.3.1.d) - Verificação das tensões na base .....	58
5.3.1.e) - Capacidade de carga do terreno de fundação .....	59
5.4 - Análise de estabilidade interna .....	60
5.4.a) - Análise de estabilidade interna .....	60
5.4.b) - Cálculo da tensão geostática no nível do reforço .....	60
5.4.c) - Cálculo da tensão $\sigma'_{zc}$ .....	61
5.4.d) - Cálculo de $\beta$ .....	61
5.4.e) - Cálculo da tensão máxima $T_{max}$ .....	62
5.4.f) - Refinamento de cálculo .....	62
5.4.g) - Resistência à tração admissível no reforço .....	64
5.4.h) - Estabilidade ao arrancamento .....	64
5.5 - Especificação do Geossintético .....	64
5.6 - Estabilidade Global .....	69
5.7 - Orçamento .....	72
5.8 - Projeto Executivo .....	74
CAPÍTULO VI - Cálculo do Muro de solo grampeado .....	75

6.1 - Introdução .....	75
6.2 - Escolha da melhor geometria.....	75
6.3 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção com 9,0 m de altura.....	81
6.3.1 - Estabilidade global.....	81
6.3.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural.....	84
6.3.3 - Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 9,0m de altura.....	86
6.4 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 8m de altura.....	90
6.4.1 - Estabilidade global.....	90
6.4.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural.....	93
6.4.3 - Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 8,0m de altura.....	94
6.5 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 6,0m de altura.....	98
6.5.1 - Estabilidade global.....	98
6.5.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural.....	102
6.5.3 - Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 6,0m de altura.....	103
6.6 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 4,0m de altura.....	105
6.6.1 - Estabilidade global.....	105
6.6.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural.....	109
6.6.3 - Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 4,0m de altura.....	110
6.7 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 2,0m de altura.....	114
6.7.1 - Estabilidade global.....	114

6.7.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural.....	117
6.7.3 - Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 2,0m de altura.....	118
6.8 - Materiais utilizados.....	119
6.8.1 - Grampo.....	119
6.8.2 - Especificação do Concreto Projetado.....	122
6.9 - Orçamento.....	124
CAPÍTULO VII - Conclusão .....	125
BIBLIOGRAFIA .....	126

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é dimensionar duas estruturas de contenção para um talude no município de São Fidélis. Uma estrutura em solo reforçado e outra em solo grampeado. O projeto é de grande importância devido à visível instabilidade do talude, visto também que ele se localiza próximo a casas habitadas.

Inicialmente, será realizada uma análise da estabilidade global do talude atual, passa-se então ao cálculo das estruturas de contenção em si. Para o mesmo talude serão calculadas uma estrutura em solo reforçado e uma estrutura em solo grampeado.

O projeto será constituído de detalhamento das estruturas de contenção, incluindo planta de situação, planta do talude, plantas do talude com as estruturas de contenção e detalhes executivos. Serão feitos também um levantamento quantitativo das obras e uma previsão de orçamento baseado nas planilhas de referência da EMOP e SINAPI, para comparação dos custos de cada estrutura de contenção.

**PALAVRAS CHAVE:** contenção; solo reforçado; solo grampeado; talude; estabilidade; São Fidélis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Geometria típica e parâmetros de projeto de estruturas em taludes reforçados.....	21
Figura 2.2 - Mecanismo para análise de estabilidade externa de maciços reforçados.....	22
Figura 2.3 - Forças atuantes para estudo de estabilidade.....	23
Figura 2.4 - Distribuição das tensões verticais na base.....	25
Figura 2.5 - Mecanismo para análise de estabilidade interna.....	29
Figura 2.6 - Ábacos para determinação de “x” para o cálculo de $T_{max}$ .....	32
Figura 2.7 - Muro de solo grampeado.....	35
Figura 2.8 - Fases de execução do muro de solo grampeado.....	36
Figura 2.9 - Modos de fixação dos chumbadores.....	38
Figura 2.10 - Aplicação de concreto projetado na face do muro.....	39
Figura 2.11 - Detalhe das “sombras” na projeção do concreto.....	40
Figura 2.12 - Zona ativa e passiva do talude.....	41
Figura 3.1 - Localização do Município São Fidélis no Estado do Rio de Janeiro.....	43
Figura 3.2 - Levantamento topográfico planialtimétrico e localização da área de estudo.....	44
Figura 3.3 - Modelo tridimensional do relevo da área de estudo.....	45
Figura 3.4 - Seção crítica do talude.....	45
Figura 3.5 - Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo argilo arenoso.....	46
Figura 3.6 - Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo areia fina siltosa.....	46
Figura 3.7 - Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo silte areno argiloso.....	47
Figura 3.8 - Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo argilo arenoso.....	48
Figura 3.9 - Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo areia fina siltosa.....	48
Figura 3.10 - Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo silte areno argiloso.....	49
Figura 4.1 - Talude e sobrecarga.....	50
Figura 4.2 - Superfícies e raios de escorregamento.....	51
Figura 4.3 - Superfície crítica de ruptura.....	52
Figura 5.1 - Superfície de ruptura para o talude de 9m regularizado.....	53
Figura 5.2 - Superfície de ruptura para o talude de 8m regularizado.....	54

Figura 5.3 - Superfície de ruptura para o talude de 6m regularizado.....	54
Figura 5.4 - Superfície de ruptura para o talude de 4m regularizado.....	55
Figura 5.5 - Superfície de ruptura para o talude de 2m regularizado.....	55
Figura 5.6 - Seção crítica do talude.....	56
Figura 5.7 - Superfície de ruptura global para a seção de 9m e fator de segurança segundo o método de Bishop.....	70
Figura 5.8 - Superfície de ruptura global para a seção de 8m e fator de segurança segundo o método de Bishop.....	70
Figura 5.9 - Superfície de ruptura global para a seção de 6m e fator de segurança segundo o método de Bishop.....	71
Figura 5.10 - Superfície de ruptura global para a seção de 4m e fator de segurança segundo o método de Bishop.....	71
Figura 5.11 - Superfície de ruptura global para a seção de 2m e fator de segurança segundo o método de Bishop.....	72
Figura 6.1 - Geometria do talude com espaçamento entre os grampos de 2,0 m....	76
Figura 6.2 - Geometria do talude com espaçamento entre os grampos de 1,5 m ...	77
Figura 6.3 - Geometria do talude com espaçamento entre os grampos de 1,0m ....	78
Figura 6.4 - Configuração do talude de 9,0 metros com reforço .....	79
Figura 6.5 - Superfície de ruptura crítica para seção de 9,0 metros com reforço .....	80
Figura 6.6 - Configuração do talude com 9,0m regularizado sem reforço .....	81
Figura 6.7 - Superfície de ruptura crítica do talude com 9,0m regularizado sem reforço .....	82
Figura 6.8 - Configuração do talude regularizado de 9,0m com reforço .....	83
Figura 6.9 - Superfície de ruptura crítica para seção de 9,0m com reforço.....	84
Figura 6.10 - Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 9,0m, sem reforço.....	85
Figura 6.11 - Configuração do talude de 9,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.....	85
Figura 6.12 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 9m.	87
Figura 6.13 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 9m.	88
Figura 6.14 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “c”, para seção de 9m.	88
Figura 6.15 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “d”, para seção de 9m.	89
Figura 6.16 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “e”, para seção de 9m.	89
Figura 6.17 - Configuração do talude de 8,0m natural, sem reforço.....	90

Figura 6.18 - Superfície de ruptura crítica para seção de 8,0m natural.....	91
Figura 6.19 - Configuração do talude com 8,0m regularizado sem reforço.....	91
Figura 6.20 - Superfície de ruptura crítica do talude com 8,0m regularizado sem reforço.....	92
Figura 6.21 - Configuração do talude regularizado de 8,0m com reforço.....	92
Figura 6.22 - Superfície de ruptura crítica para seção de 8,0m, com reforço.....	93
Figura 6.23 - Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 8,0m, sem reforço.....	93
Figura 6.24 - Configuração do talude de 8,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.....	94
Figura 6.25 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 8m.....	95
Figura 6.26 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 8m.....	95
Figura 6.27 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “c”, para seção de 8m.....	96
Figura 6.28 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “d”, para seção de 8m.....	96
Figura 6.29 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “e”, para seção de 8m.....	97
Figura 6.30 - Configuração do talude de 6,0m natural, sem reforço.....	98
Figura 6.31 - Superfície de ruptura crítica para seção de 6,0m natural.....	99
Figura 6.32 - Configuração do talude com 6,0m regularizado sem reforço.....	99
Figura 6.33 - Superfície de ruptura crítica do talude com 6,0m regularizado sem reforço.....	100
Figura 6.34 - Configuração do talude regularizado de 6,0m com reforço.....	101
Figura 6.35 - Superfície de ruptura crítica para seção de 6,0m, com reforço.....	101
Figura 6.36 - Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 6,0m, sem reforço.....	102
Figura 6.37 - Configuração do talude de 6,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.....	102
Figura 6.38 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 6m.....	103
Figura 6.39 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 6m.....	104
Figura 6.40 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “c”, para seção de 6m.....	104
Figura 6.41 - Configuração do talude de 4,0m natural, sem reforço.....	105

Figura 6.42 - Superfície de ruptura crítica para seção de 4,0m natural.....	106
Figura 6.43 - Configuração do talude com 4,0m regularizado sem reforço.....	106
Figura 6.44 - Superfície de ruptura crítica do talude com 4,0m regularizado sem reforço.....	107
Figura 6.45 - Configuração do talude regularizado de 4m com reforço insuficiente.....	108
Figura 6.46 - Superfície de ruptura crítica para seção de 4,0m, com reforço.....	108
Figura 6.47 - Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 4,0m, sem reforço.....	109
Figura 6.48 - Configuração do talude de 4,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.....	109
Figura 6.49 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 4m.....	110
Figura 6.50 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 4m.....	111
Figura 6.51 - Configuração do talude regularizado de 4m com os grampos corrigidos.....	112
Figura 6.52 - Superfície de ruptura crítica para seção de 4,0m, com reforço corrigido.....	112
Figura 6.53 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 4,0m, com os grampos corrigidos para 12,0 e 10,0 metros.....	113
Figura 6.54 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 4,0m, com os grampos corrigidos para 12,0 e 10,0 metros.....	113
Figura 6.55 - Configuração do talude de 2,0m natural, sem reforço.....	114
Figura 6.56 - Superfície de ruptura crítica para seção de 2,0m natural.....	115
Figura 6.57 - Configuração do talude com 2,0m regularizado sem reforço.....	115
Figura 6.58 - Superfície de ruptura crítica do talude com 2,0m regularizado sem reforço.....	116
Figura 6.59 - Configuração do talude regularizado de 2,0m com reforço.....	116
Figura 6.60 - Superfície de ruptura crítica para seção de 2,0m, com reforço.....	117
Figura 6.61 - Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 2,0m, sem reforço.....	117
Figura 6.62 - Configuração do talude de 2,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.....	118

Figura 6.63 - Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 2,0m.....	119
Figura 6.64 - Detalhe da cabeça do grampo.....	120
Figura 6.65 - Placa de Ancoragem.....	120
Figura 6.66 - Contra-porca.....	121
Figura 6.67 - Anel de compensação.....	121
Figura 6.68 - Distanciadores.....	121
Figura I.1 - Determinação de k e n do solo de reaterro.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faixa de valores indicativos para os fatores de redução.....	34
Tabela 3.1 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial .....	47
Tabela 3.2 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.....	49
Tabela 3.3 - Valores de $\gamma_{\text{sat}}$ e $\gamma_{\text{nat}}$ dos diferentes materiais.....	49
Tabela 4.1 - Fatores de segurança para cada método calculados pelo GeoSlope...51	
Tabela 5.1 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 9m.....	62
Tabela 5.2 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 9m.....	63
Tabela 5.3 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 9m.....	63
Tabela 5.4 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 9m.....	63
Tabela 5.5 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 8m.....	65
Tabela 5.6 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 8m.....	65
Tabela 5.7 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 8m.....	66
Tabela 5.8 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 8m.....	66
Tabela 5.9 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 6m.....	66
Tabela 5.10 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 6m.....	67
Tabela 5.11 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 6m.....	67
Tabela 5.12 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 6m.....	67
Tabela 5.13 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 4m.....	68

Tabela 5.14 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 4m.....	68
Tabela 5.15 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 4m.....	68
Tabela 5.16 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 4m.....	68
Tabela 5.17 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 2m.....	69
Tabela 5.18 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 2m.....	69
Tabela 5.19 - Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 2m.....	69
Tabela 5.20 - Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 2m.....	69
Tabela 5.21 - Custos para serviços preliminares.....	72
Tabela 5.22 - Custos para raspagem e limpeza manual do terreno.....	72
Tabela 5.23 - Custos para escavação mecanizada.....	73
Tabela 5.24: Custos para compactação do terreno.....	73
Tabela 5.25 - Custo do concreto projetado.....	73
Tabela 5.26 - Custo do geocomposto.....	73
Tabela 6.1 - Cálculo do F.S. para os grampos com espaçamento vertical de 2m.....	77
Tabela 6.2 - Cálculo do F.S. para os grampos com espaçamento vertical de 1,5m..	77
Tabela 6.3 - Cálculo do F.S. para os grampos com espaçamento vertical de 1m.....	78
Tabela 6.4 - Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 9m.....	89
Tabela 6.5 - Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 8,0m.....	97
Tabela 6.6 - Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 6,0m.....	105
Tabela 6.7 - Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 4,0m.....	111
Tabela 6.8 - Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 4,0m com os grampos corrigidos.....	114

Tabela 6.9 - Cálculo do Fator de Segurança ao arrancamento para o talude de 2,0m.....	119
Tabela 6.10 - Características do grampo.....	120
Tabela 6.11 - Cargas admissíveis do grampo.....	120
Tabela 6.12 -Tabela de Orçamento.....	123

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES

H	Altura do muro de solo reforçado
$\omega$	Inclinação da estrutura de contenção
$L_r$	Comprimento do reforço
$S_v$	Espaçamento vertical entre os reforços
$S_h$	Espaçamento horizontal entre os reforços
FS	Fator de segurança
$\gamma$	Peso específico do solo
$\gamma$	Peso específico do solo
$\phi'$	Ângulo de atrito interno do solo
$c'$	Coesão do solo
E	Empuxo ativo
$N_c, N_q$ e $N_\gamma$	Fatores de capacidade de carga
$E_r$	Módulo de elasticidade do reforço
$A_r$	Área da seção transversal do reforço
k	Parâmetro de módulo tangente inicial do solo
$P_a$	Pressão atmosférica
$\nu_0$	Coeficiente de Poison
n	Módulo expoente da curva tensão-deformação do solo
$S_i$	Índice de rigidez relativa solo-reforço
$K_a$	Coeficiente de empuxo ativo de Rankine
$F^*$	Fator de resistência ao arrancamento
$\sigma'_v$	Tensão efetiva vertical na interface solo/reforço
$R_t$	Resistência à tração do grampo (arrancamento)
AL	<i>Anchor Load</i> (Carga de sollicitação)
$A_{cont}$	Área de contato entre o solo e o concreto que recobre o grampo
$\tau$	Tensão de cisalhamento
U	Perímetro do furo
d	Diâmetro do furo
$l_e$	Comprimento do grampo cotado a partir da superfície de ruptura até sua extremidade
z	Altura da camada de solo sobre o grampo



# **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**

## **1.1 - Objetivos**

Esse trabalho tem por objetivo elaborar um projeto executivo de duas opções de estruturas para contenção para um talude localizado na região urbana de São Fidélis-RJ.

Inicialmente, será realizada uma análise da estabilidade global para verificação das condições atuais da estabilidade do talude. Posteriormente, faz-se o dimensionamento das estruturas de contenção. São consideradas as seguintes estruturas: solo reforçado e solo grampeado.

O projeto executivo será constituído por memória de cálculo das estruturas, plantas e detalhes das contenções, incluindo planta de situação, altimetria do talude e detalhes das estruturas de contenção. Serão apresentados também os detalhes e processos executivos, fundamentais para a implantação da obra.

Com o objetivo de comparar os custos das duas soluções propostas, será feito o levantamento de quantitativo uma planilha de orçamento. A previsão de orçamento será baseada nas planilhas de referência da EMOP e SINAPI.

## **1.2 - Justificativa**

O projeto se justifica pela instabilidade do talude verificada em estudo anterior (Miranda, 2005) e por visitas técnicas feitas no local. Vale destacar que na mesma encosta já foram executadas obras de estabilização em solo grampeado.

As estruturas em solo reforçado e em solo grampeado têm mostrado crescimento nas suas aplicações nos últimos tempos.

Nas últimas décadas, os geossintéticos, usados para reforço de solo, vêm desempenhando um papel fundamental, substituindo ou aprimorando técnicas existentes, permitindo associações e combinações com solos e agregados, resultando

em soluções mais rápidas, mais leves, mas esbeltas, mais confiáveis e mais econômicas.

Da mesma forma, a técnica de solo grampeado, que utiliza grampos chumbados no solo e revestimentos com função secundária para a face do talude, como por exemplo concreto projetado, tem como principais características a rapidez de execução, a facilidade de transporte dos equipamentos, o que reduz o custo comparado a obras de contenção equivalentes, a possibilidade de execução em lugares de difícil acesso e a possibilidade de adoção de soluções mistas, combinadas com outros tipos de contenções.

## **CAPÍTULO II – METODOLOGIA**

### **2.1 - Solo reforçado**

#### **2.1.1 - Definição**

“Trata-se da utilização à tração de um geossintético para reforçar e/ou restringir deformações em estruturas geotécnicas”.

“Mesmo nas obras em que a função principal do geossintético é o reforço, existem variações nos tipos de solicitações quanto à intensidade, ao tempo de duração, ao mecanismo de interação, aos níveis de deformação, etc., exigindo estudos diferenciados e específicos para cada aplicação. As propriedades do geossintético que podem intervir variam também em função de seu tipo, de sua matéria-prima e das condições de contorno. Assim, a correta especificação de um geossintético para reforço começa pelo estudo de suas propriedades relevantes.”

“Em maciços de solo reforçado, a inclusão de materiais geossintéticos como elemento de reforço do material de aterro propicia uma redistribuição global das tensões e deformações, permitindo a adoção de estruturas com face vertical (muros) ou maciços mais íngremes (taludes), com menor volume de aterro compactado. Este fato associado à possibilidade de se utilizar solos disponíveis no local da obra, pode reduzir de forma significativa o custo da solução envolvendo solo reforçado, quando esta é comparada com as convencionais.”

“São inúmeras as vantagens da utilização de geossintéticos como elemento de reforço:

- a) Possibilita a construção de taludes e aterros com inclinações acentuadas;
- b) Minimiza o impacto ambiental decorrente das obras de contenção;
- c) Permite a adoção de tipos variados de acabamento da face dos taludes;
- d) Permite a execução de obras em locais de difícil acesso;
- e) Permite o uso de mão de obra não qualificada e equipamentos simples;
- f) Reduz consideravelmente o tempo de construção da obra.”

“A estabilidade de maciços reforçados deve ser garantida pelos mecanismos de interação solo-reforço. Neste sentido, são importantes os parâmetros de interação solo-reforço, a resistência à tração do geossintético e o confinamento do solo subjacente.”

“O reforço deve conferir ao solo a resistência à tração que este não possui. Os geossintéticos empregados com mais frequência em maciços reforçados são os geotêxteis tecidos e não-tecidos, as geogrelhas, as geotiras e os geocompostos resistentes.”

### **2.1.2 - Parâmetros de projeto**

“A Figura 2.1 apresenta o arranjo típico de uma estrutura em solo reforçado com as características geométricas e os parâmetros geotécnicos a serem considerados no projeto deste tipo de estrutura. As variáveis utilizadas no dimensionamento são as seguintes:

- a) Altura do talude reforçado ( $H$ );
- b) Inclinação da estrutura de arrimo ( $\omega$ );
- c) Ângulo de inclinação do terreno ( $\alpha$ );
- d) Propriedades de resistência dos solos de aterro e de fundação;
- e) Resistência da interface solo/geossintético;
- f) Resistência, comprimento ( $L$ ) e espaçamento  $S_v$  do geossintético;
- g) Condições de compactação do aterro;
- h) Carregamentos externos ( $q$ );
- i) Fatores de segurança de estabilidades.”

“O dimensionamento da estrutura de solo reforçado será dividido em duas etapas: análise da estabilidade externa e da estabilidade interna da estrutura. A zona reforçada atua como um muro de peso convencional. O colapso da estrutura pode ocorrer interna ou externamente à zona reforçada.”

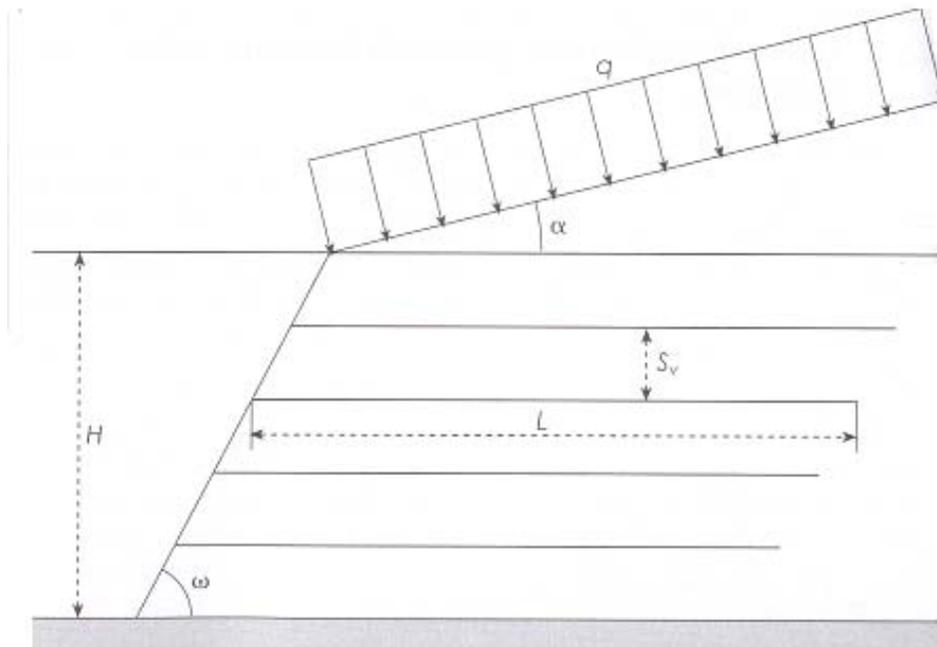


Figura 2.1: Geometria típica e parâmetros de projeto de estruturas em taludes reforçados (Figura 4-17 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 86).

### 2.1.3 - Estabilidade externa

“Na verificação da estabilidade externa, considera-se o comportamento do conjunto similar ao de um muro de peso. Deve-se verificar a ocorrência de quatro mecanismos clássicos de instabilização de estruturas de contenção (Figura 2.2): deslizamento da base, tombamento, capacidade de carga da fundação e ruptura global.

Para a determinação dos empuxos de solo  $E$  que a massa de solo não reforçada exerce na massa reforçada é possível adotar as teorias clássicas de equilíbrio limite.

Devido à formulação de Coulomb admitir o atrito entre o muro e o terreno como equivalente ao ângulo de atrito interno do solo no estado crítico, a formulação de Rankine se mostra mais ajustada, porque a zona reforçada não se comporta como bloco rígido. Os empuxos ativos são admitidos como sendo paralelos à superfície do terreno ( $\delta=0$ ).

A Figura 2.3 apresenta um esquema de um maciço reforçado e os esforços de peso próprio, sobrecargas e empuxo de terra nele atuantes. O empuxo de terra  $E$  pode

ser calculado por uma das teorias de empuxo disponíveis (Rankine ou Coulomb). Neste trabalho, a teoria adotada será a de Rankine.”

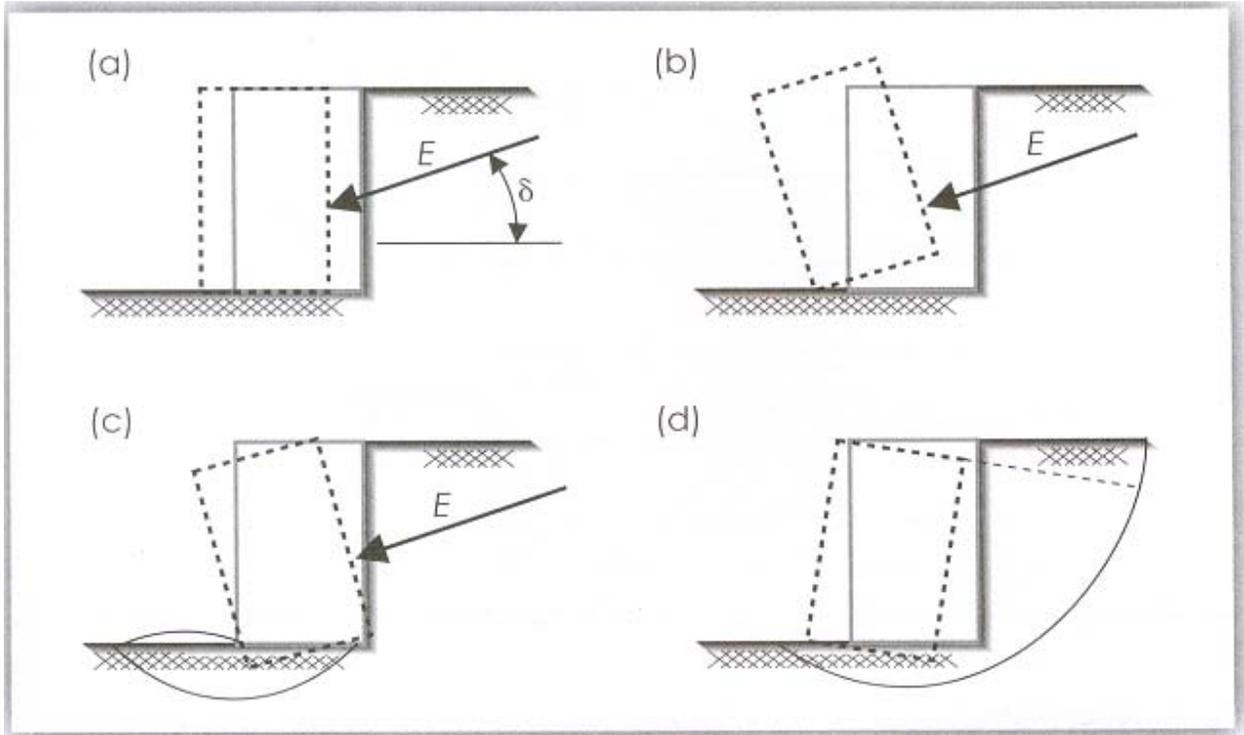


Figura 2.2: Mecanismo para análise de estabilidade externa de muros reforçados: a) deslizamento; b) tombamento; c) capacidade de carga; d) estabilidade global (Figura 4-18 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 87).

#### 2.1.4 - Segurança contra o deslizamento da estrutura ao longo da base

“O fator de segurança ao deslizamento  $FS_d$  é determinado pela razão entre a força resistente capaz de ser mobilizada na base muro e a força de empuxo de terra:

$$FS_d = \frac{(\gamma_1 \cdot H) \cdot L_r \cdot \tan \phi'_1}{E} \geq 1,5 \quad [1]$$

onde:

$\gamma_1$ : o peso específico do solo;

$H$ : altura do maciço reforçado;

$\phi'_1$ : ângulo de atrito interno do solo, na base do maciço reforçado;

$E$ : empuxo ativo”

“Na Figura 2.3 o comprimento do reforço  $L_r$  pode ser calculado por:

$$L_r = \frac{FS_d \cdot E}{(\gamma_1 \cdot H) \cdot \tan \phi'_1} \quad [2]$$

No caso mais simples de muros verticais com retroaterro em areia e sem a presença de sobrecarga, a equação de Rankine para o cálculo do empuxo ativo pode ser escrita como:

$$E = \frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma_2 \cdot H^2 \quad [3]$$

$K_a$ : coeficiente de empuxo ativo do solo;

$\gamma_2$ : o peso específico do solo”

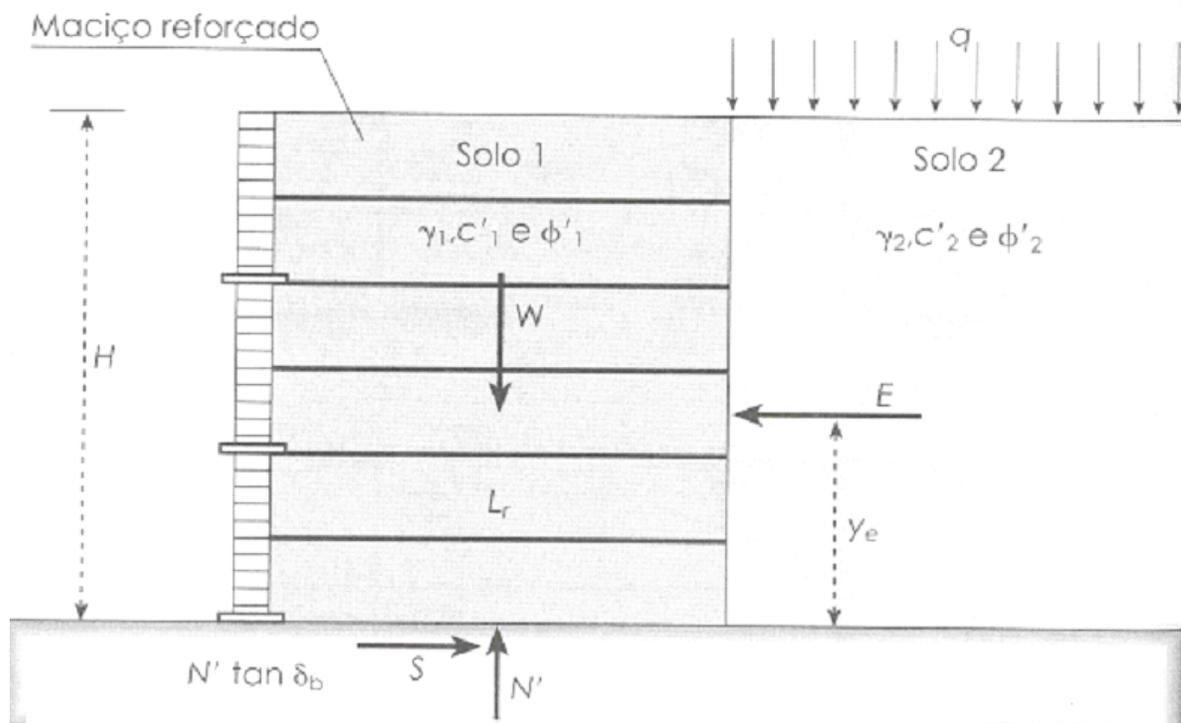


Figura 2.3: Forças atuantes para estudo de estabilidade (Figura 4-19 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 88).

### 2.1.5 - Segurança contra o Tombamento

“O fator de segurança ao tombamento  $FS_{td}$  é definido pela razão entre o momento estabilizante proporcionado pelo peso do muro e o momento instabilizante gerado pelo empuxo de solo  $E$  e pode ser determinado pela expressão:

$$FS_t = \frac{W \cdot \frac{L_r}{2}}{E \cdot y_E} = \frac{W \cdot L_r}{2 \cdot E \cdot y_E} \geq 2,0 \quad [4]$$

onde:

$W$ : peso do muro;

$L_r$ : coeficiente do reforço ou largura da base da massa de solo reforçado;

$y_E$ : braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura.”

“Neste caso, pode-se determinar a largura da massa reforçada de modo a se garantir a estabilidade quanto ao tombamento:

$$L_r = \frac{2 \cdot FS_t \cdot E \cdot y_E}{W} \quad [5]$$

onde:

$FS_t$ : fator de segurança contra o tombamento;”

### 2.1.6 - Segurança contra a ruptura do solo de fundação

“A resultante das tensões normais atuantes na base do muro deve garantir toda base sujeita apenas à compressão (Fig 2.4). Para tanto, a excentricidade ( $e$ ) deve ser inferior à sexta parte de  $L_r$ , ou seja:

$$e = \frac{E \cdot y_E}{R} = \frac{E \cdot y_E}{\gamma \cdot H \cdot L_r} \leq \frac{L_r}{6} \quad [6]$$

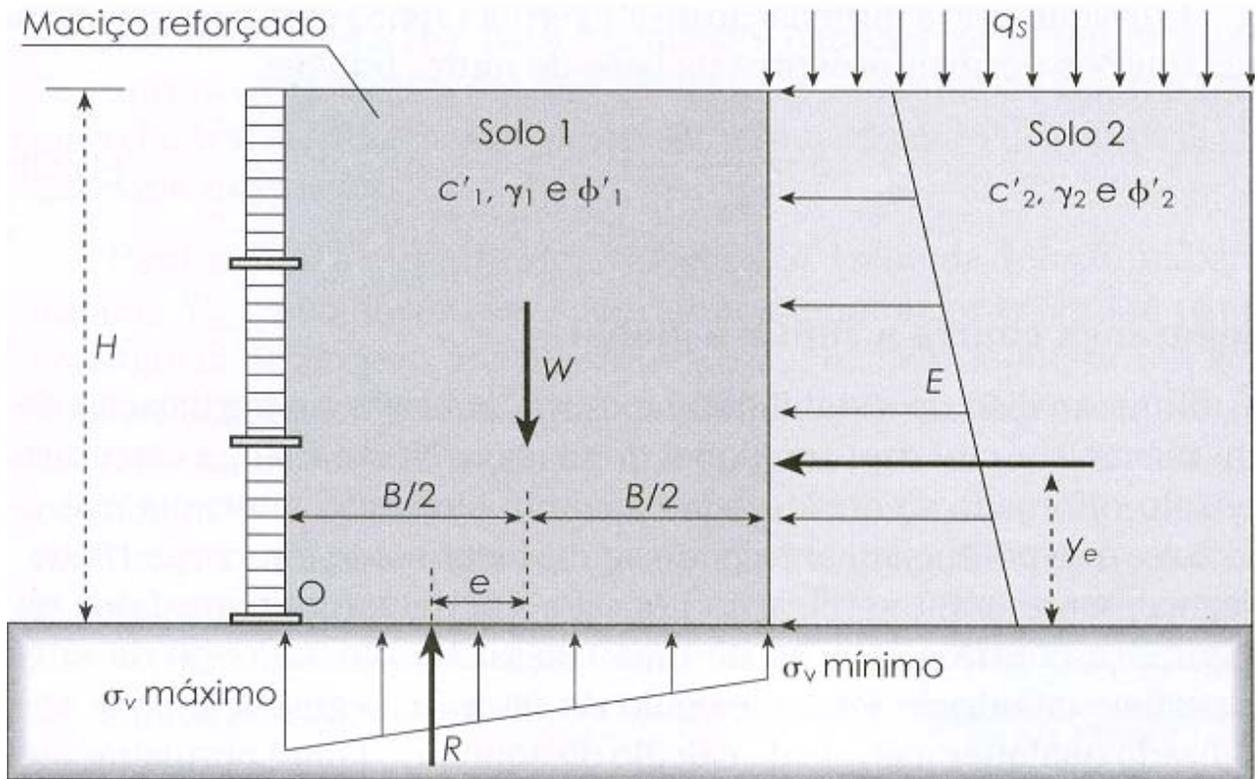


Figura 2.4: Distribuição das tensões verticais na base (Figura 4-20 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 89)

O comprimento do reforço deve ser determinado de modo a atender aos 3 critérios apresentados: deslizamento da base, tombamento e ruptura do solo de fundação. Para que os 3 critérios sejam atendidos, deve-se utilizar o maior valor de  $L_r$  (obtido a partir das equações 2, 5 e 6) no dimensionamento de maciços reforçados.

A capacidade de carga do solo de fundação pode ser estimada pela expressão (Terzaghi e Peck, 1967):

$$q_{\max} = c' N_c + q_s N_q + 0,5 \gamma_f B' N_\gamma \quad [7]$$

onde

$q_{\max}$ : a capacidade de carga do solo de fundação;

$c'$ : coesão do solo de fundação;

$q_s$ : sobrecarga no nível da base da estrutura, caso esta esteja parcialmente enterrada;

$\gamma$ : peso específico do solo de fundação;

$N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$ : fatores de capacidade de carga obtidos a partir das expressões (Terzaghi e Peck, 1967):

$$N_q = e^{(\pi \cdot \tan \phi')} \cdot \tan^2(45^\circ + \phi'/2) \quad [8]$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad [9]$$

$$N_\gamma = 1,80 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi' \quad [10]$$

No caso de solo de fundação fino solicitado por carregamento não drenado, a expressão de capacidade de carga a utilizar é dada por:

$$q_{\max} = S_u N_c + q_s \quad [11]$$

Tanto no caso de carregamento drenado como no caso não drenado, deve-se ter:

$$FS_f = \frac{q_{\max}}{\sigma} \geq 3 \quad [12]$$

onde  $FS_f$  é o fator de segurança contra a ruptura do solo de fundação.

Considerando a formulação de Meyerhof (1955) para a distribuição das tensões normais atuantes na base do muro, tem-se:”

$$\sigma = \frac{R}{L_r - 2.e} \quad [13]$$

### 2.1.7 - Segurança contra a ruptura global

“Consiste na verificação de um mecanismo de ruptura global do maciço. Neste caso, a estrutura de solo reforçado é considerada como um elemento interno à massa

de solo, que potencialmente pode se deslocar como um corpo rígido. Normalmente essa verificação consiste em se garantir um fator de segurança contra a rotação de uma massa de solo ao longo de uma superfície cilíndrica. Para o cálculo do fator de segurança, pode ser utilizado qualquer método de cálculo de equilíbrio limite normalmente empregado para avaliação da estabilidade de taludes.”

“O fator de segurança é definido como:

$$FS_g = \frac{\sum M_r}{\sum M_s} \quad [14]$$

onde:

$\sum M_r$ : somatório dos momentos dos esforços resistentes em relação ao centro de rotação;

$\sum M_s$ : somatório dos momentos dos esforços solicitantes em relação ao centro de rotação.”

“Os valores aceitos para o fator de segurança acima definido são:

$FS_g \geq 1,3$  para obras provisórias;

$FS_g \geq 1,5$  para obras permanentes.”

### **2.1.8 - Estabilidade interna**

“O aspecto particular no dimensionamento de uma estrutura em solo reforçado é a análise de sua estabilidade interna. A ruptura interna pode ocorrer quando as solicitações impostas ao reforço são superiores àquelas que o mesmo pode suportar (Fig. 2.5a) ou quando há o escorregamento do reforço na massa de solo por insuficiência de ancoragem (Fig. 2.5b). Neste contexto, caracteriza-se um processo de ruptura progressiva, em que os esforços oriundos do reforço rompido são transferidos aos adjacentes, desencadeando um processo de colapsos sucessivos.

Para evitar a ruptura dos esforços, o valor da tensão máxima atuante  $T_{max}$  não deverá ser superior ao menor valor esperado para a resistência de projeto do geossintético  $T_d$ , resguardado por um adequado fator de segurança. Analogamente, o

projeto deve estabelecer um embutimento mínimo do reforço na zona resistente, evitando-se a possibilidade de perda de sua ancoragem. Para tanto, o valor de  $T_{max}$  não deverá superar o valor da resistência ao arrancamento do reforço  $P_r$ , resguardado também por um correspondente fator de segurança. Esses mecanismos podem ser controlados mediante a especificação de espaçamentos e comprimentos apropriados para os elementos de reforço.

Em geral, o paramento não desempenha papel relevante neste tipo de estrutura. Entretanto, a conexão entre os esforços e a face deve ser eficiente o bastante para garantir mecanismos adequados de transferência das tensões locais. Embora as conexões tenham comumente resistências menores que os reforços, as tensões próximas à face  $T_0$  tendem a ser menores do que os valores de  $T_{max}$ . Em um sistema adequado de contenção em solo reforçado, a resistência admissível da conexão  $P_{r,o}$  deve ser superior à máxima solicitação no reforço junto à face  $T_0$ , evitando-se, desta forma, um mecanismo de instabilização dos reforços nesta região (Fig. 2.5c). Adicionalmente, como qualquer sistema de contenção incremental, as análises devem incorporar a possibilidade de mecanismos de instabilização local (Fig. 2.5d).

No caso da adoção de critérios determinísticos, a estabilidade interna deverá atender aos seguintes fatores de segurança:

Ruptura do reforço

$$T_d \geq T_{max} \cdot FS \quad \Rightarrow \quad FS \geq 1,50 \text{ (para obras permanentes e}$$

críticas)

$$\Rightarrow \quad FS \geq 1,15 \text{ (para obras temporárias e não críticas)}$$

Arrancamento

$$P_r \geq T_{max} \cdot FS \quad \Rightarrow \quad FS \geq 1,50$$

Estabilidade das conexões

$$P_{r,o} \geq T_0 \cdot FS \quad \Rightarrow \quad FS \geq 1,50$$

Os procedimentos usuais para determinação de  $T_{max}$  são baseados em métodos de equilíbrio limite, porém este tipo de abordagem é limitada, pois não incorpora nas análises a influência da rigidez dos reforços e os efeitos resultantes da compactação.”

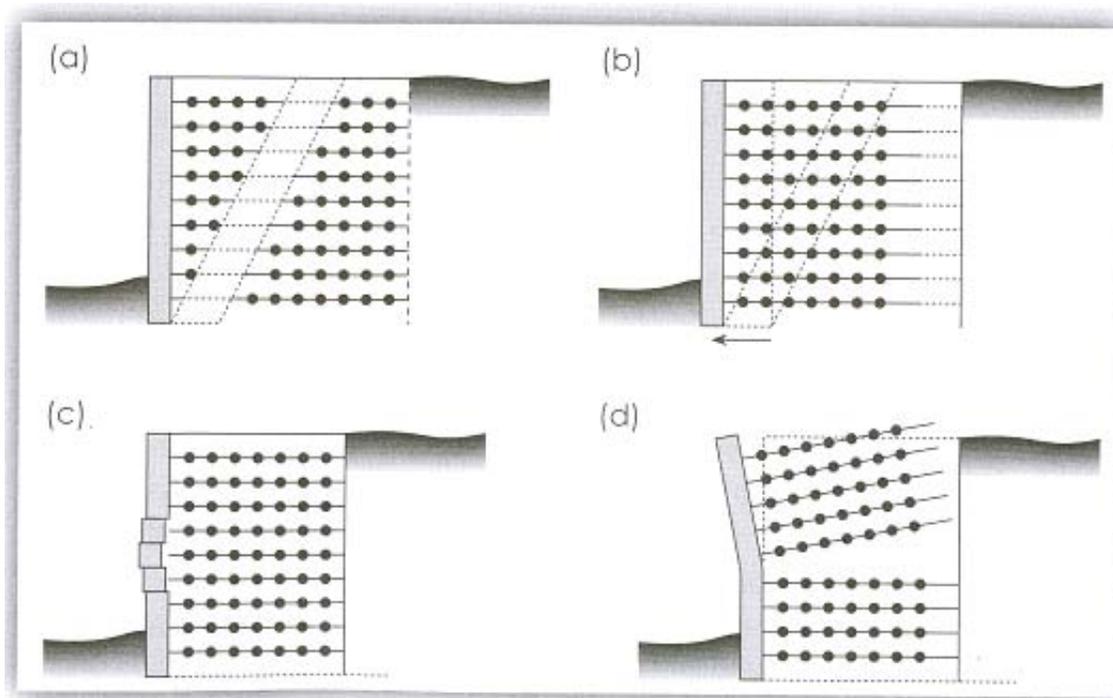


Figura 2.5: Mecanismo para análise de estabilidade interna: a) ruptura dos reforços; b) arrancamento dos reforços; c) desprendimento da face; d) instabilidade local (Figura 4-21 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 92).

### 2.1.9 - Rigidez relativa solo-reforço – Método de Ehrlich e Mitchell (1994)

“A tensão ou deformação, assumindo uma condição de equilíbrio entre solo e reforço, depende da razão entre os valores de rigidez do reforço e do solo, denominada Índice de Rigidez Relativa,  $S_i$ :

$$S_i = \frac{E_r \cdot A_r}{k \cdot P_a \cdot S_v \cdot S_h} \quad [15]$$

onde:

$E_r$ : módulo de elasticidade do reforço;

$A_r$ : área da seção transversal do reforço;

$k$ : parâmetro de módulo tangente inicial do solo (do modelo hiperbólico);

$P_a$ : pressão atmosférica;

$S_v$ : espaçamento vertical entre reforços;

$S_h$ : espaçamento horizontal entre reforços.”

### 2.1.10 - Compactação do solo

“A compactação gera no solo reforçado um efeito similar ao sobre-adensamento, sendo  $\sigma'_{zc,i}$  a máxima tensão vertical efetiva induzida durante a operação do equipamento de compactação. Caso  $\sigma'_z$  ultrapasse  $\sigma'_{zc,i}$ , passa a prevalecer o peso próprio. A pressão de sobreadensamento  $\sigma'_{zc}$  é definida como a máxima tensão vertical que ocorreu no solo em sua história. Enquanto o valor de  $\sigma'_{zc,i}$  for superior à tensão vertical  $\sigma'_z$  atuante na camada considerada, o efeito da compactação prevalece no solo.

No caso de compactação com rolo vibratório, o valor de  $\sigma'_{zc,i}$  pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$\sigma'_{zc,i} = (1 - \nu_o) \cdot (1 + K_a) \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot \frac{Q \cdot N \gamma}{L}} \quad [16]$$

onde:

$K_a$ : coeficiente de empuxo ativo;

$\gamma$ : peso específico do solo compactado;

$L$ : comprimento do tambor do rolo;

$N_\gamma$ : coeficiente de capacidade de carga do solo;

$\nu_o$ : coeficiente de Poisson no repouso.

Considerando o solo com comportamento elástico-linear, tem-se:

$$\nu_o = \frac{K_o}{1 + K_o} \quad [17]$$

onde o coeficiente de empuxo no repouso ( $K_o$ ) pode ser estimado através da correlação empírica com base no ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) de solos normalmente adensados:”

$$K_o = 1 - \text{sen} \phi' \quad [18]$$

### 2.1.11 - Determinação das tensões máximas nos reforços

“As tensões máximas induzidas nos reforços são determinadas com base nos ábacos da Figura 2.6, considerando para cada camada a tensão vertical atuante  $\sigma'_z$ , a tensão vertical máxima após a compactação ( $\sigma'_{zc}$ ) e o valor do parâmetro  $\beta$ , que reflete a deformabilidade do reforço:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma'_{zc}}{P_a}\right)^n}{S_i} \quad [19]$$

sendo:

$n$ : módulo expoente da curva tensão-deformação do solo;

$S_i$ : índice de rigidez relativa do solo-reforço;

$P_a$ : pressão atmosférica.”

“Como  $S_i$  é função da área transversal dos reforços, a determinação de  $T_{\max}$  no geossintético dá-se segundo um processo iterativo.

A tensão vertical ao final da construção  $\sigma'_z$  pode ser determinada considerando a excentricidade da resultante das tensões na base. O cálculo é efetuado com base no equilíbrio da massa acima do reforço em questão, considerando o peso próprio e o empuxo ativo exercido pelo aterro do muro:

$$\sigma' = \frac{\gamma' z}{1 - \left(\frac{K_a}{3}\right) \left(\frac{z}{L_r}\right)^2} \quad [20]$$

sendo:

$L_r$ : comprimento dos reforços;

$K_a$ : coeficiente de empuxo ativo de Rankine.”

“Com base nos ábacos da Figura 2.6, obtém-se o valor de  $\chi$ , definido por:”

$$\chi = \frac{T}{S_v \cdot S_h \cdot \sigma'_{zc}} \quad [21]$$

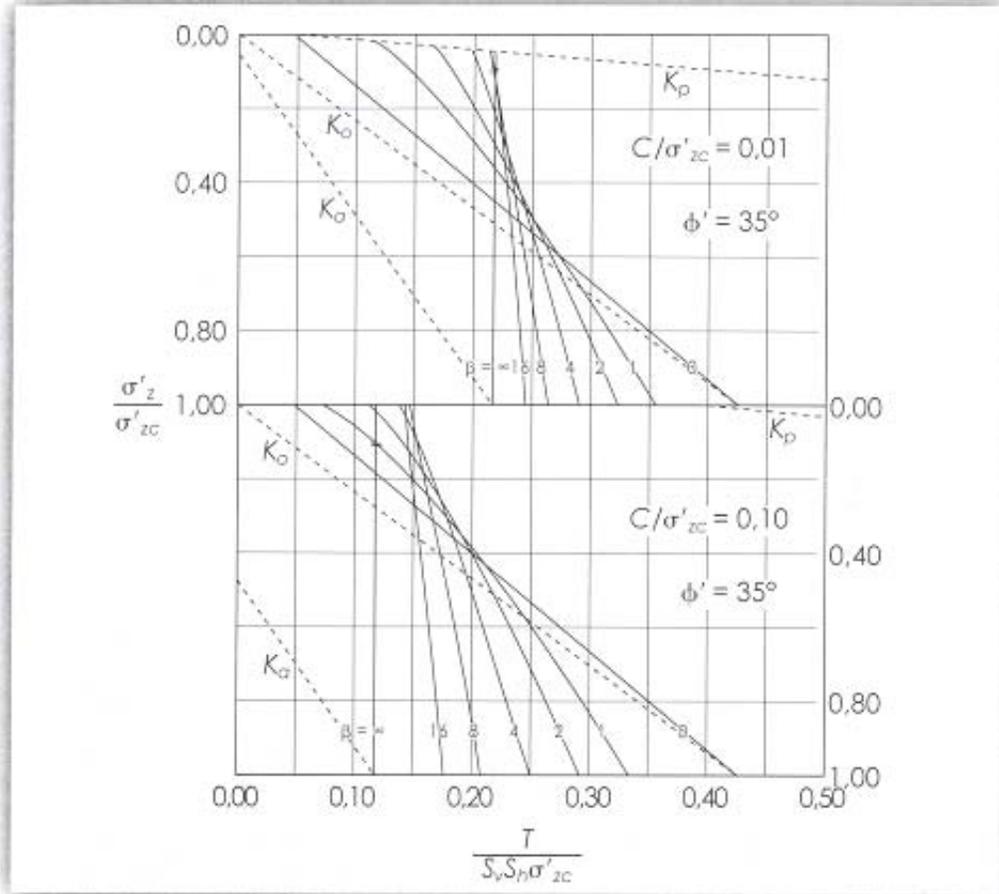


Figura 2.6: Ábacos para determinação de “x” para o cálculo de  $T_{\max}$  (Figura 4-28 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 104).

### 2.1.12 - Análise para verificação de arrancamento

“A expressão geral para análise da resistência ao arrancamento por unidade de comprimento transversal do reforço ( $Pr$ ) é a seguinte:

$$Pr = 2F \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot L_e \geq FS \cdot T_{\max} \quad [22]$$

onde:

$L_e$ : comprimento de reforço na zona resistente além da superfície potencial de ruptura;

$F^*$ : fator de resistência ao arrancamento;  
 $\alpha$ : fator de correlação do efeito de escala;  
 $\sigma'_v$ : tensão efetiva vertical na interface solo/reforço.”

“O fator  $F^*$  pode ser determinado pela expressão:

$$F^* = f_a \cdot \tan \phi \quad [23]$$

onde:

$\phi$ : ângulo de atrito do solo;  
 $f_a$ : coeficiente de aderência.”

“Recomenda-se adotar, de forma conservativa, valor de  $f_a$  entre 0,7 e 0,8 para geotêxteis e entre 0,8 e 1,0 para geogrelhas.”

### 2.1.13 - Fatores de redução

“Os projetos básico e executivo têm por objetivo determinar os esforços solicitantes nos geossintéticos. Devido a incertezas com relação aos parâmetros adotados e/ou os métodos de cálculo adotados, costuma-se majorar os esforços solicitantes calculados através de um fator de segurança global  $FS$ .

Vários fatores levam a se reduzir o valor índice de sua resistência à tração indicada pelo fabricante. Tal redução pode ser feita levando-se em conta vários fatores parciais. Uma das formas de considerá-los simultaneamente é através da adoção do conceito de fator de redução total  $FR$ , conforme indicado a seguir:

$$FR = f_{cr} \cdot f_{mr} \cdot f_a \cdot f_m \quad [24]$$

onde:

$FR$ : fator de redução global;  
 $f_{cr}$ : fator de redução parcial para fluência em tração;  
 $f_{mr}$ : fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação;  
 $f_a$ : fator de redução parcial para degradação ambiental;

$f_m$ : fator de redução parcial para incertezas estatísticas na determinação da resistência do geossintético;”

A tabela 2.1 mostra uma faixa de variação dos fatores de redução parciais.

Fator	Valor mínimo	Valor máximo
Fluência sob tração ( $f_{cr}$ )	2,00	5,00
Danos de instalação ( $f_{mr}$ )	1,50	2,00
Degradação ambiental ( $f_a$ )	1,05	2,00
Incertezas estatísticas do material ( $f_m$ )	1,05	1,40
Fator de redução global (FR)	3,03	28,00

Tabela 2.1: Faixa de valores indicativos para os fatores de redução (Tabela 4-1 - Manual Brasileiro de Geossintéticos, pg 70).

## 2.2 - Solo grampeado

### 2.2.1 - Definição

A técnica do solo grampeado, solo pregado, ou chumbamento de solos trata-se de uma estabilização rápida, temporária ou permanente de taludes por meio de introdução de reforço no maciço de solo, obtido através da inclusão de elementos como grampos, pregos ou chumbadores, resistentes a tensões de tração, esforços cortantes e momentos de flexão, podendo ou não ser aplicado um revestimento na face do talude, com tela metálica, concreto projetado armado ou fibras de aço, e associado à drenagem superficial e profunda.

Sua origem remonta às minas de exploração de minérios que, a partir da década de 50, teve um grande incremento na utilização para estabilização de túneis e emboques de túneis, principalmente na França, Alemanha e Áustria.

### 2.2.2 - Vantagens e limitações da técnica

A técnica apresenta vantagens econômicas tanto no escoramento de escavações quanto na estabilização de taludes.

A disseminação da técnica de solo grampeado deve-se a vantagens como a facilidade no transporte dos equipamentos, o que torna seu custo reduzido comparado com outras obras, e sua execução possível em lugares de difícil acesso ou densamente ocupados, como mostra a Figura 2.7 abaixo, maior rapidez executiva com o trabalho de forma contínua, a aplicação em diferentes tipos de solo, a possibilidade de ter inclinação no sentido do terreno, o que melhora a estabilidade global e reduz o movimento de terra na obra, e a possibilidade de adoção de soluções mistas, em que grampos são combinados com outros tipos de contenções.



Figura 2.7: Muro de solo grampeado (Manual Técnico Solotrat, 2006).

A técnica de solo grampeado apresenta também algumas limitações:

- a) O solo deve possuir alguma coesão ou cimentação e não deve ser suscetível a variações volumétricas significativas (argilas expansivas, solos orgânicos);
- b) Qualidade do Grampo: o grampo deve ser de boa qualidade, mantendo suas propriedades mecânicas e sua resistência a ataques químicos ao longo de toda vida útil da obra;
- c) Não aplicável em escavações em argila mole, uma vez que será necessária uma alta densidade de chumbadores e com comprimentos elevados.

### 2.2.3 - Método Construtivo

A estrutura de reforço será executada em fases sucessivas de corte do terreno na geometria de projeto. Trabalhando-se do pé do talude em direção ao topo, a massa de solo será gradualmente reforçada durante sua construção a partir da primeira linha de chumbadores e a aplicação do revestimento.

Como o talude já está cortado, se poderia trabalhar também de forma descendente, de acordo com a conveniência da obra, como mostrado na Figura 2.8.

Simultaneamente ao reforço serão executados os drenos convencionais profundos e de superfície, conforme projeto.

Como o material da região do talude é relativamente estável, os grampos são imediatamente instalados. Caso contrário, deveria ser aplicada uma fina camada de concreto projetado, a fim de evitar que o talude sofra deslocamentos inadmissíveis.

A espessura do concreto projetado a ser utilizado para revestimento é normalmente pequena, entre 0,05m e 0,15m, o que representará uma economia de material.

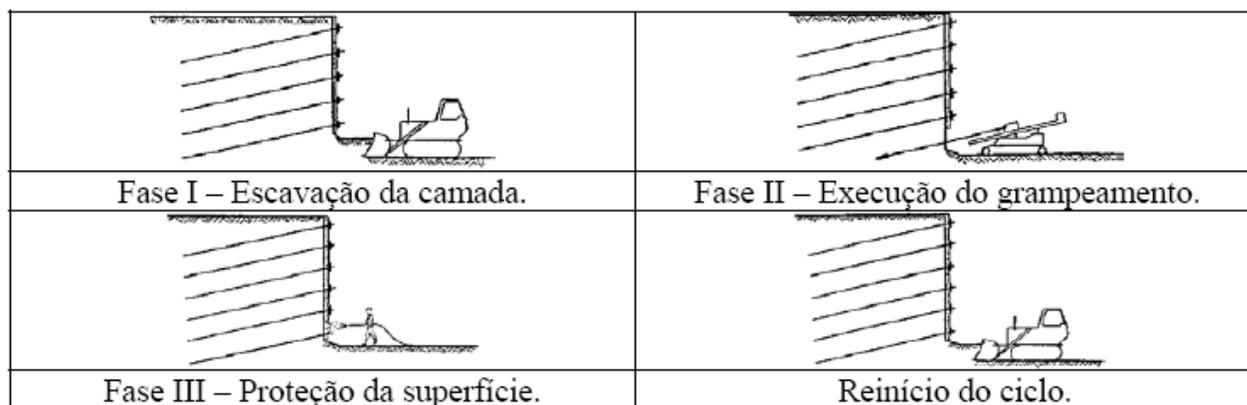


Figura 2.8: Fases de execução do muro de solo grampeado (Manual Solotrat, 2006).

### 2.2.4 - Execução dos Chumbadores

Os grampos serão introduzidos no maciço através de pré-furo, seguido pela introdução de elemento metálico e preenchimento do furo com material cimentante, chamado grampo injetado, sendo a injeção de calda de cimento com elevado teor de cimento por se tratar de reforço em solos.

As perfurações são executadas por equipamentos leves, de fácil manuseio, instalação e trabalho sobre qualquer talude.

Para perfuração e limpeza do furo será utilizado o sistema de lavagem com água, que é o mais utilizado.

A cavidade perfurada deverá permanecer estável até que a injeção seja concluída. Caso seja necessária a utilização da lama bentonítica, deverá ser assegurado o atrito lateral necessário, sendo recomendável maior frequência nos ensaios de arrancamento.

Concluída a perfuração, segue-se à instalação e fixação dos elementos de reforços, que serão metálicos. O elemento fixado não deverá perder suas características de resistência ao longo do tempo, devendo receber tratamento anticorrosivo adequado. Usualmente utilizam-se barras de aço nervuradas disponíveis para construção civil.

As barras são introduzidas nos furos e posicionadas com auxílio de centralizadores, para garantir o contínuo recobrimento.

A injeção da calda de cimento será realizada após a instalação da barra de ferro, por meio de uma tubulação acessória cuja extremidade é posicionada na parte inferior da perfuração, e é injetada a calda de cimento de baixo para cima, para se evitar bolsões de ar.

A técnica do grampo injetado é mais segura e minimiza erros operacionais, além de promover um melhor adensamento e uma melhor fixação da barra ao solo.

A injeção além de promover a melhor ancoragem do chumbador, trata o maciço adensando-o e preenchendo as fissuras, melhorando a eficiência do chumbador.

A escolha do comprimento do grampo, ângulo de instalação e dos espaçamentos vertical e horizontal entre grampos, depende de alguns fatores tais como altura e ângulo de inclinação da face; tipo de grampo (injetado ou cravado), quantidade de grampos; resistência mobilizada no contato solo/grampo; e variáveis ambientais que eventualmente venham alterar características mecânicas do grampo.

Para barras de aço com diâmetro menor ou igual a 20mm, a extremidade externa poderá ser dobrada a 90° ou rosqueada e fixadas nos elementos do revestimento.

Para barras com diâmetro maior que 20mm, que é o limite usual para “dobra” em campo, a extremidade externa deverá ser rosqueada, recebendo uma placa metálica e

uma porca, conforme ilustrado na Figura 2.9 abaixo. Pode-se também solicitar que as barras de 25 ou 32mm sejam fornecidas “já dobradas”. A porca e a placa de apoio permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação, que serve para garantir contato solo-concreto projetado.



Figura 2.9: Modos de fixação dos chumbadores (Manual Técnico Solotrat, 2006).

Como regra geral, os grampos são dispostos em linhas, suavemente inclinados em relação à horizontal, com ângulos de inclinação variando de 5 a 30°. Entretanto, os grampos são mais eficientes no controle de deslocamentos laterais da estrutura quando instalados direção perpendicular à superfície potencial de ruptura, que corresponde aproximadamente à horizontal.

Como é recomendável para projetos, os grampos deverão possuir o mesmo diâmetro, comprimento e ângulo de inclinação, para reduzir a possibilidade de erros construtivos. Diferentes inclinações podem ser justificadas em casos especiais, por exemplo, em presença de obstáculos tais como: parte de fundações de edificações vizinhas, pilares, cabos e interferências de qualquer espécie.

### 2.2.5 - Revestimento de concreto projetado

O concreto projetado é o resultado da aplicação de uma camada de concreto em todo o talude. O concreto, formado pela mistura de cimento, areia média e pedriscos, sem adição de água, é pressurizado e conduzido por mangotes até o bico de projeção, quando então a água é adicionada a cerca de 1m do paramento, como ilustrado na Figura 2.10. Podem ainda ser adicionadas ao traço da mistura outros componentes.

A aplicação por via seca apresenta grande praticidade, pois pode ser interrompido e reiniciado o trabalho sem perda de material e tempo para limpeza de equipamento. A elevada energia de projeção do concreto produz uma ótima compactação e colabora com a alta resistência do concreto e com o adensamento da capa superficial do solo.

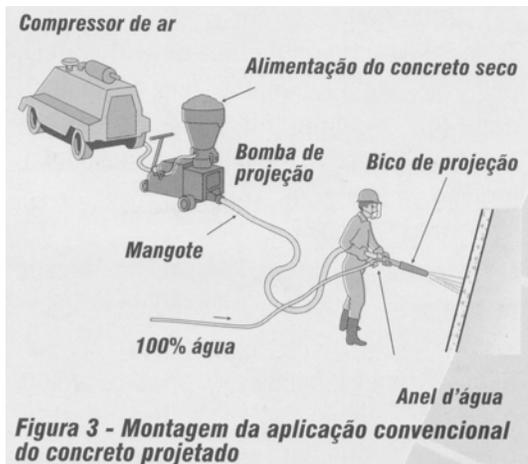


Figura 2.10: Aplicação de concreto projetado na face do muro (Manual Solotrat, 2006).

O concreto projetado utilizado receberá a adição de fibras metálicas de aço, formando uma mistura homogênea, produzindo um concreto de baixa permeabilidade, já que as fibras agem no combate às tensões de tração, durante o período da cura, homogeneamente em todas as regiões do revestimento.

O concreto com as fibras se ajusta facilmente ao corte do talude, aceitando superfícies irregulares, com espessuras constantes, e atua como substituto para a armação convencional em aço.

### 2.2.6 - Armação

Como armação para a face do talude pode ser utilizada tela de aço eletrossoldadas, que atua em conjunto com o concreto projetado na estabilização e no revestimento do talude.

A instalação das telas é feita em uma ou duas camadas, conforme necessidade, podendo ser instaladas juntamente com o a projeção do concreto em camadas ou antes do concreto.

É importante observar a execução do revestimento para que a tela funcione como anteparo e ocorram vazios atrás da mesma, que são as chamadas sombras de projeção do concreto, como ilustra a Figura 2.11.

Para o cobrimento da tela de aço são adotadas espessuras convencionais, e para as fibras não há necessidade de cuidados especiais, pois a corrosão se limita à fibra que esta em contato com a atmosfera, não prosseguindo para as outras no interior do concreto.

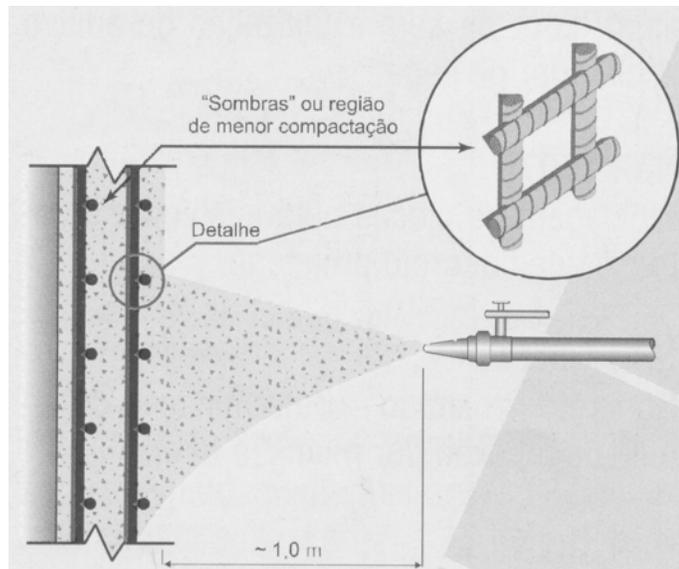


Figura 2.11: Detalhe das “sombras” na projeção do concreto (Manual Solotrat, 2006).

### 2.2.7 - Metodologia de Cálculo

O projeto de dimensionamento do muro com solo grampeado será realizado através de análises de estabilidade baseadas no conceito de equilíbrio limite, onde a superfície potencial de ruptura é examinada utilizando-se o programa de cálculo Geo Slope.

A análise do comportamento mecânico do solo grampeado tem como base as propriedades mecânicas do solo e propriedades dos reforços, e é realizada a partir da idéia de que o solo atrás da face do talude esta subdividido em duas áreas: a primeira,

zona ativa, entre a superfície do talude e a superfície potencial de ruptura, e a segunda, zona passiva, parte estável do maciço onde os grampos deverão ser ancorados, mostrado na Figura 2.12.

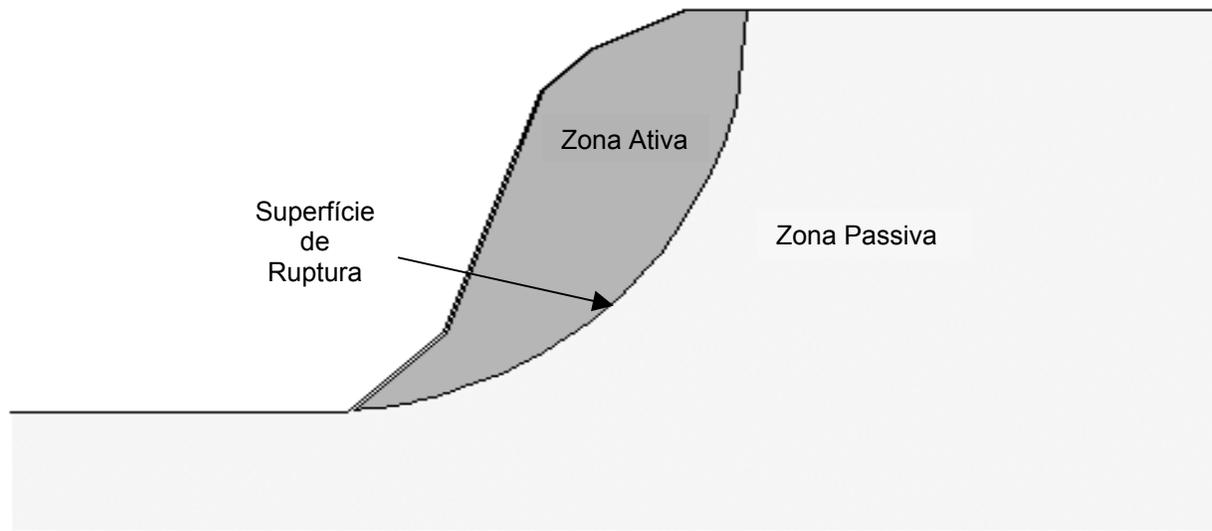


Figura 2.12: Zona ativa e passiva do talude

Os esforços de cisalhamento presentes na superfície de ruptura são equilibrados com a introdução dos grampos com inclinações definidas em relação à horizontal, que ultrapassam a superfície de ruptura, e resistem aos esforços de cisalhamento que são solicitados na superfície de ruptura.

Na superfície do talude, os grampos são submetidos esforços de tração controlados e respondem exercendo uma tensão de compressão na superfície do talude, pressionando a massa de solo da zona ativa que tende a se desprender do maciço estável e escorregar pela superfície potencial de ruptura.

Sendo definida a superfície de ruptura, se estima a disposição e as características dos grampos na estrutura, definindo sua inclinação em relação à horizontal, comprimento total, diâmetro e tipo de rugosidade da barra e esforço de tração necessário aplicado na barra.

Através de interações sucessivas, pelo princípio da tentativa e erro, o dimensionamento estimado dos grampos são incluídas na geometria trabalhada pelo programa, e se verifica, em cada interação, a estabilidade global do muro até se obter uma relação favorável entre a definição dos reforços nas barras e os esforços solicitantes no talude.

O dimensionamento mais adequado será aquele que apresentar o fator de segurança mais favorável, dentro do limite recomendado.

## CAPÍTULO III – CASO DE ESTUDO

### 3.1 - Descrição

Os dados contidos neste capítulo foram retirados do trabalho *Análise da Estabilidade de Contensões através de Métodos Probabilísticos* (Miranda, 2005).

A área em estudo localiza-se no Município de São Fidélis - RJ.

Este Município possui uma área total de 1.035,6 km<sup>2</sup> correspondente a 10,6% da área da Região Norte Fluminense. O município limitando ao Norte com o Município de Cambuci, ao Sul com Santa Maria Madalena, a Leste com Campos dos Goytacazes, Cardoso Moreira e Italva e a Oeste com Itaocara e São Sebastião do Alto como mostra a Figura 3.1 (Silva e Cunha, 2001).

O maior rio que corta o município é o Paraíba do Sul.

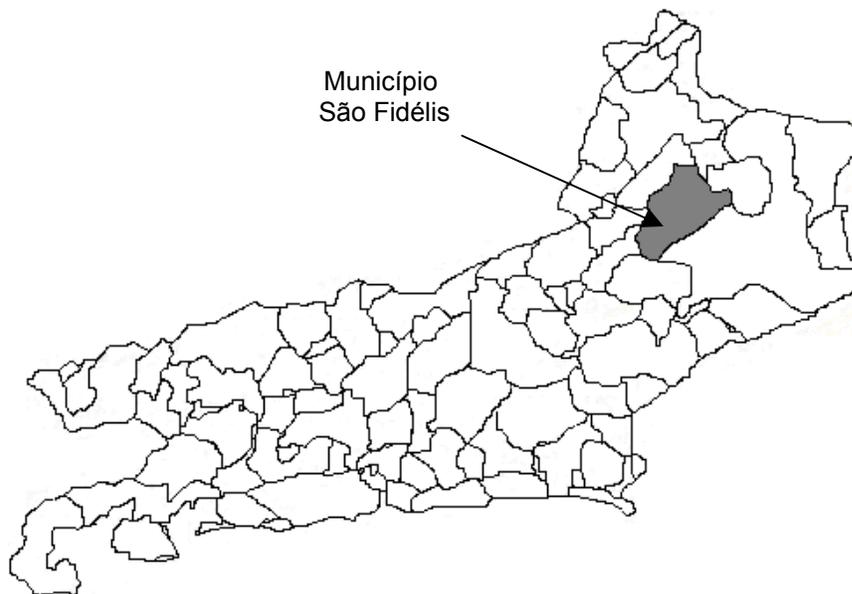


Figura 3.1: Localização do Município São Fidélis no Estado do Rio de Janeiro.

Nessa região existem vários taludes sem obras de contenção. Associado a isto, as condições precárias de infra-estrutura da área aumentam o risco de escorregamentos com conseqüentes perdas materiais e de vidas humanas.

O Município de São Fidélis possui um relevo bastante acidentado. Possui poucas planícies, localizado na encosta da Serra do Mar que faz parte do Planalto Atlântico. A morfologia é bastante acidentada ao Sul, onde estão as mais importantes manifestações montanhosas.

Os solos encontrados na região de estudo são os latosólicos podzólicos vermelho ou alaranjado e os solos hidromórficos. Em sua maior parte o solo é podzólico vermelho escuro, com acentuada suscetibilidade à erosão.

O clima da região é tropical quente e úmido, com estação chuvosa nos meses de primavera e verão, e estação seca nos meses de outono e inverno.

Nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 podemos ver, respectivamente, as curvas de nível do terreno, o modelo tridimensional da área de estudo e a seção crítica do talude.

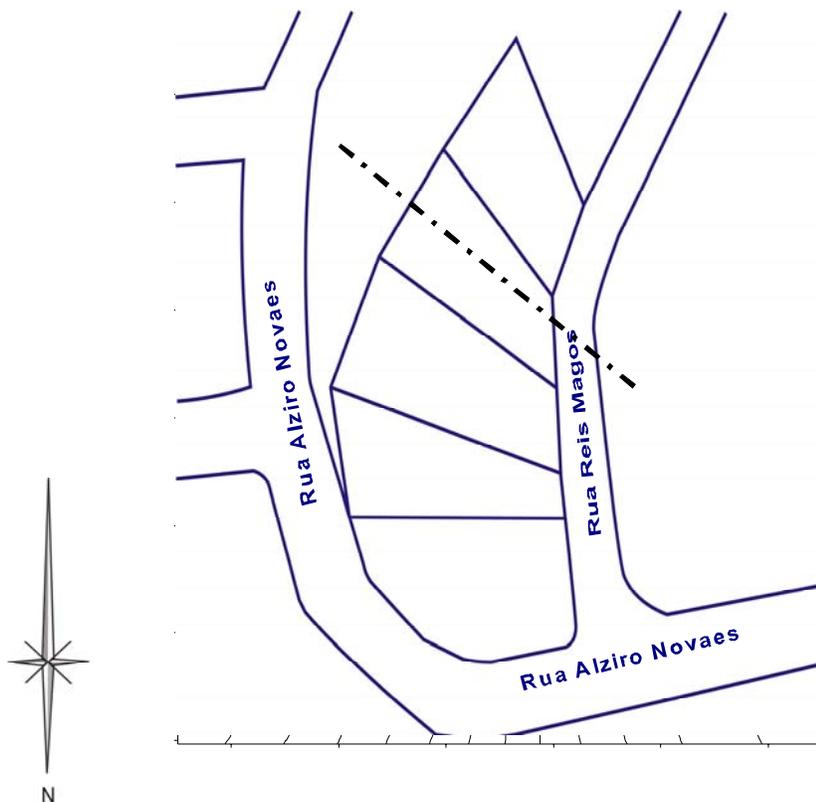


Figura 3.2: Levantamento topográfico planialtimétrico e localização da área de estudo.

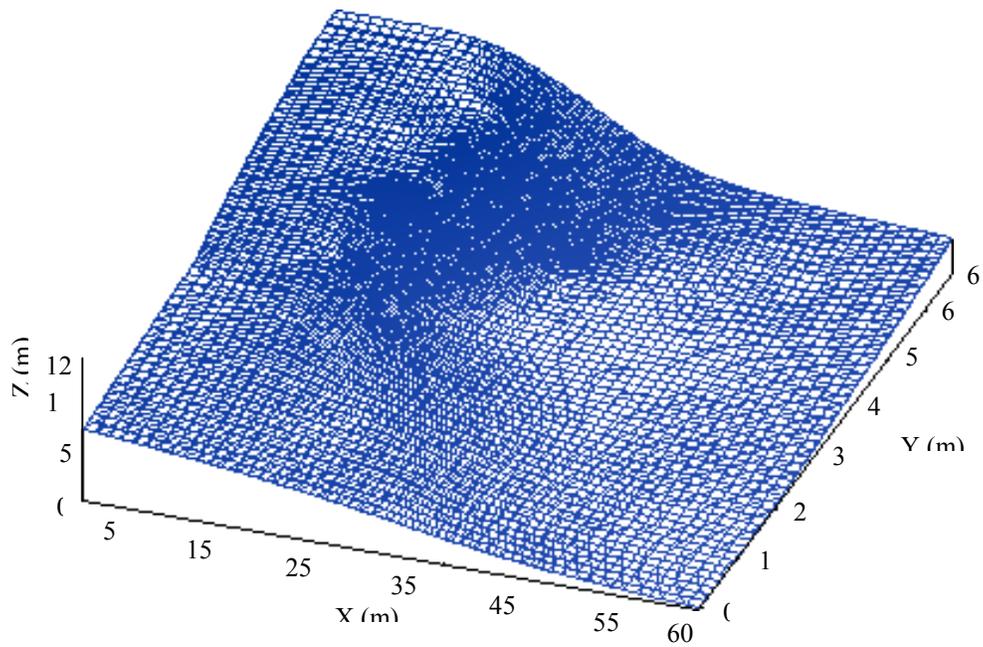


Figura 3.3: Modelo tridimensional do relevo da área de estudo.

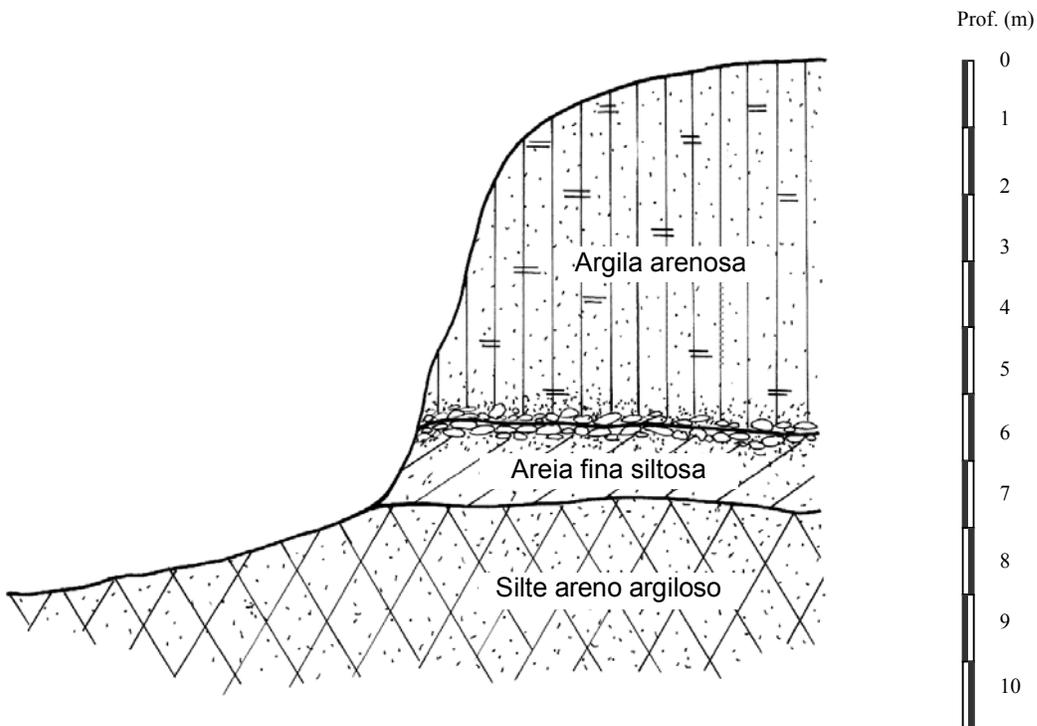


Figura 3.4: Seção crítica do talude: A-A.

## 3.2 - Dados de projeto

### 3.2.1 - Resultado dos ensaios de Compressão triaxial

Os resultados de ensaios de compressão triaxial para os diferentes solos se encontram abaixo. Para a argila arenosa na Figuras 3.5, para a areia fina siltosa na Figura 3.6 e para o silte areno argiloso na Figura 3.7. A tabela 3.1 apresenta os resultados médios, bem como sua variância e seu desvio padrão (Miranda, 2005).

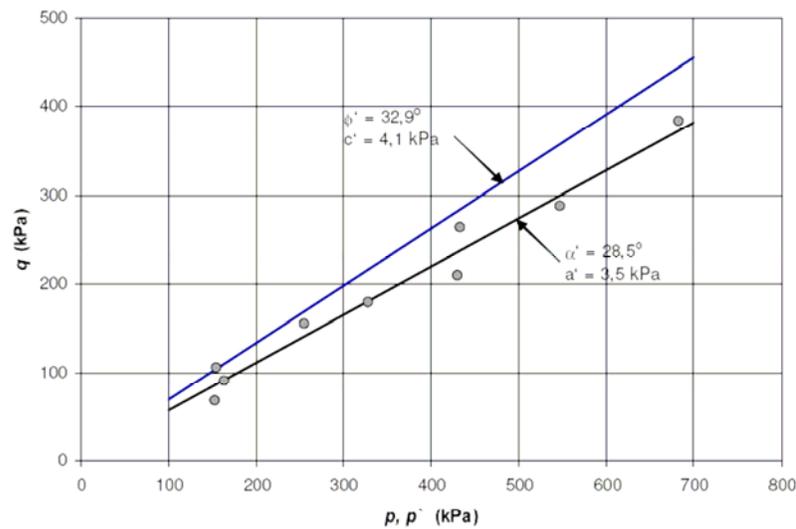


Figura 3.5: Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo argilo arenoso.

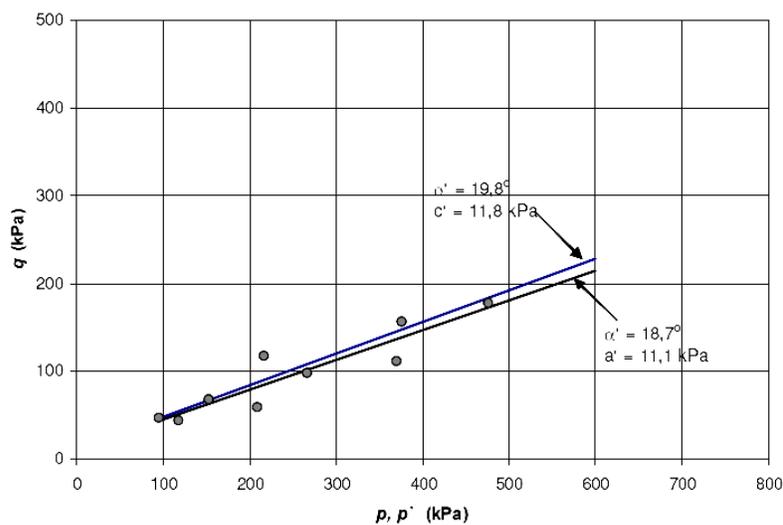


Figura 3.6: Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo areia fina siltosa.

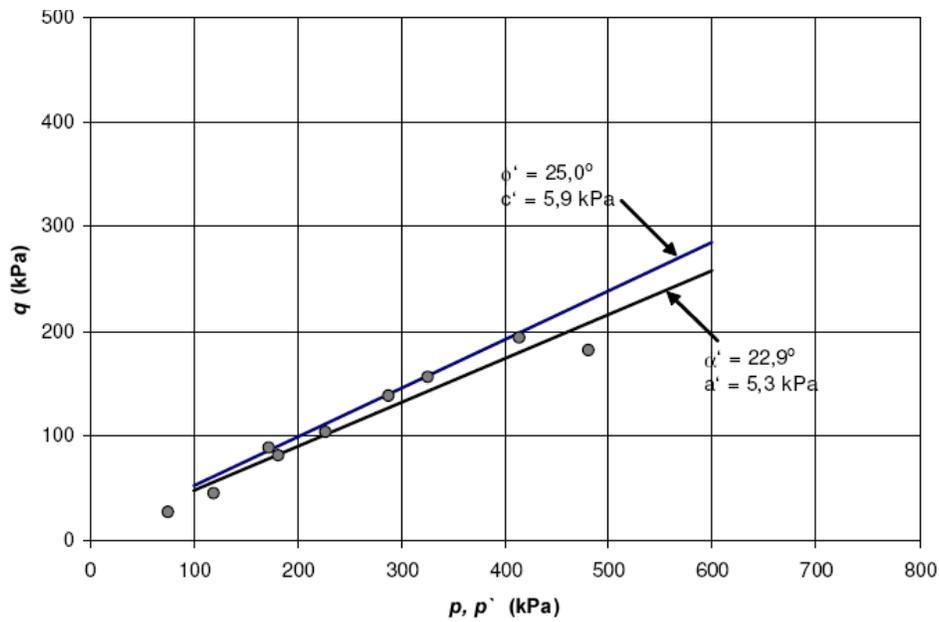


Figura 3.7: Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo silte areno argiloso.

Solo	$c' \text{ (kPa)}$			$\phi' \text{ (graus)}$		
	Média	Variância	Desvio padrão	Média	Variância	Desvio padrão
Argila arenosa ( $< 5,9m$ )	10,69	221,60	14,89	32,16	18,65	4,32
Areia fina siltosa ( $5,9$ a $7,5m$ )	16,55	355,69	18,86	19,12	38,85	6,23
Silte areno argiloso ( $>7,5m$ )	8,03	233,40	15,28	25,28	22,80	4,77
Retroaterro	7,84	45,98	6,78	36,49	18,30	4,28

Tabela 3.1: Resultados dos ensaios de compressão triaxial

### 3.2.2 - Resultado dos ensaios de Cisalhamento direto

Os resultados de ensaios de cisalhamento direto para os diferentes solos se encontram abaixo. Para a argila arenosa na Figuras 3.8, para a areia fina siltosa na Figura 3.9 e para o silte areno argiloso na Figura 3.10. A tabela 3.2 apresenta os resultados médios, bem como sua variância e seu desvio padrão (Miranda, 2005).

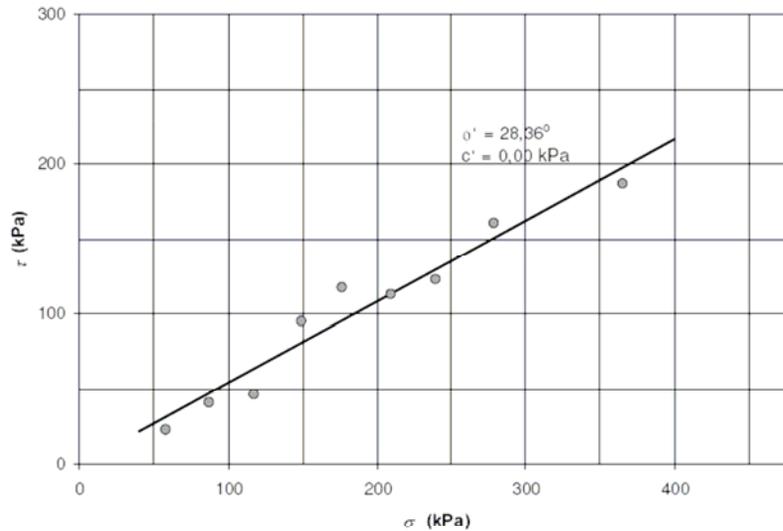


Figura 3.8: Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo argilo arenoso.

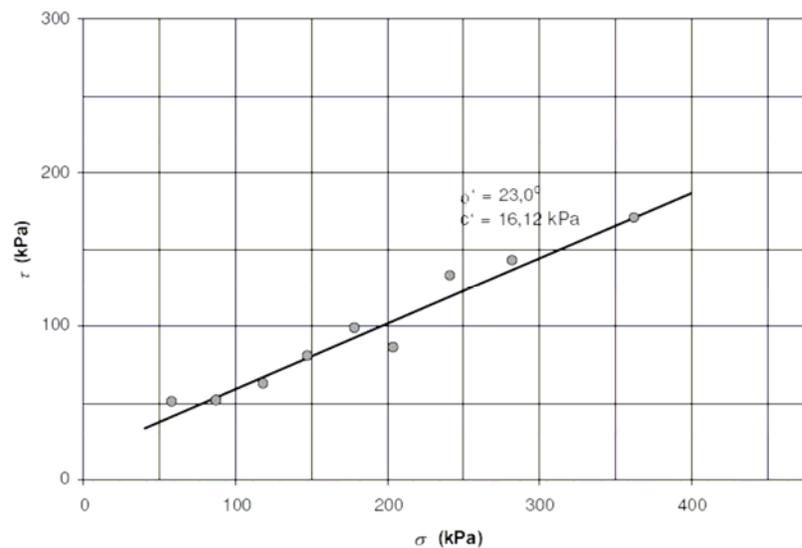


Figura 3.9: Envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb do solo areia fina siltosa.



## CAPÍTULO IV – ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL DO TALUDE

A análise de estabilidade global do talude foi feita utilizando o programa GeoSlope. Primeiro foi definido o talude e posteriormente foi aplicada sua sobrecarga correspondente a uma estrada localizada a montante do talude, como mostra a Figura 4.1. As cargas concentradas têm o valor de 8,5t relativas a um caminhão de eixo tandem e a carga distribuída, o valor de 3kN/m<sup>2</sup> relativa ao carregamento da estrada segundo a NBR 6120. Esse valor é utilizado para garagens e estacionamentos, mas foi tomado como aproximadamente o carregamento da estrada.

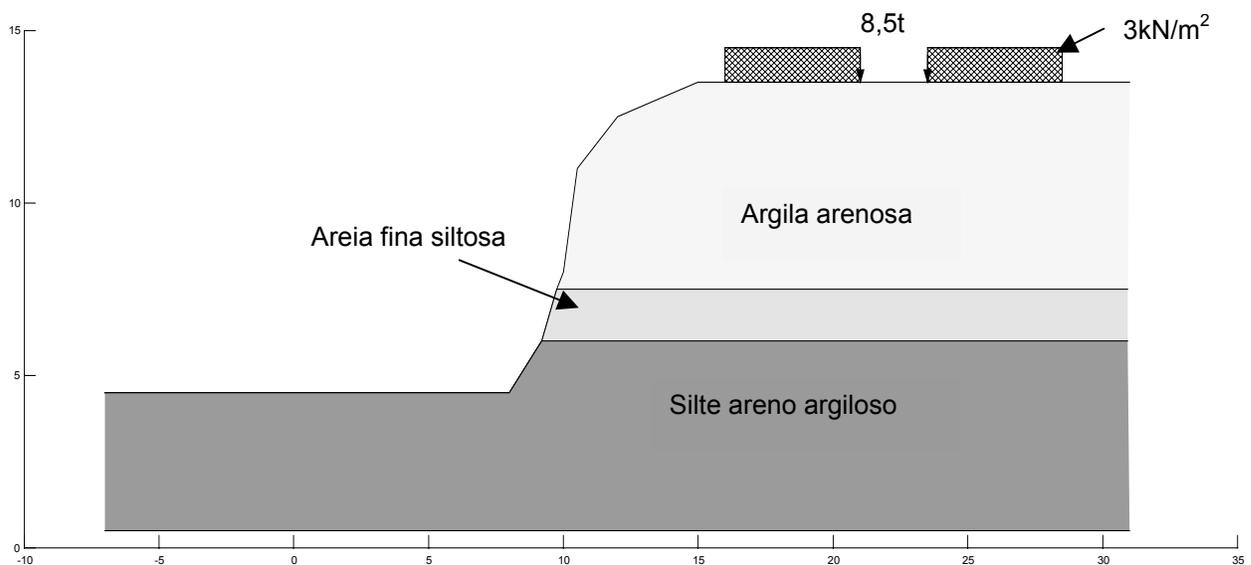


Figura 4.1: Talude e sobrecarga.

Posteriormente, foram definidos a grade de superfícies de escorregamento e os raios de superfície de escorregamento, como mostra a Figura 4.2.

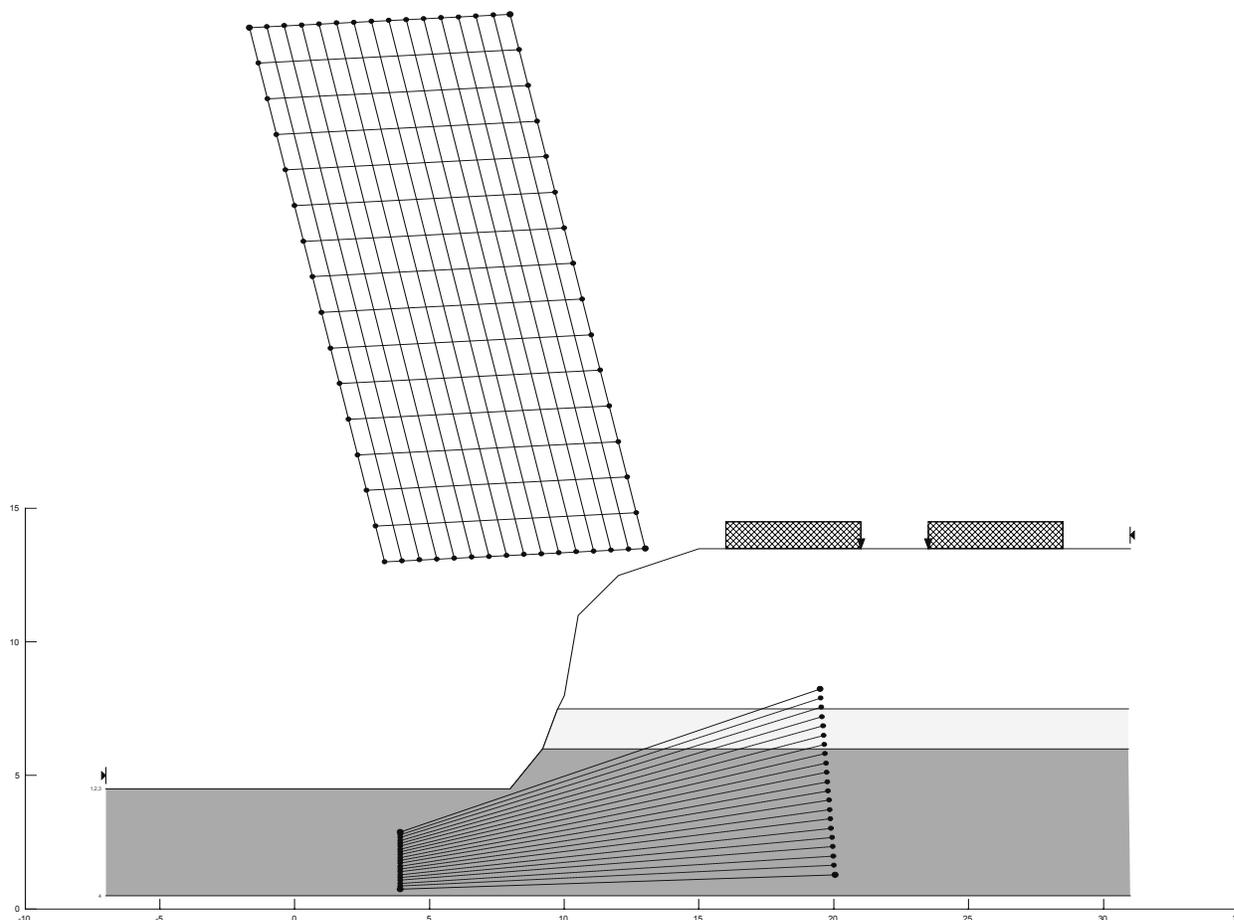


Figura 4.2: Superfícies e raios de escorregamento.

Foi calculada a estabilidade pelos métodos de Bishop e encontrado um Fator de Segurança de 1,0 para a superfície crítica de ruptura, mostrada na Figura 4.3. Esse fator de segurança menor que 1,5 mostra que o talude está instável e necessita de uma estrutura de contenção. O programa GeoSlope nos fornece três fatores de segurança, que são listados na Tabela 4.1 abaixo. Todos podem ser considerados aproximadamente 1,0.

Método	Fator de Segurança
Ordinário	1,021
Bishop	1,036
Janbu	1,028

Tabela 4.1: Fatores de segurança para cada método calculados pelo GeoSlope.

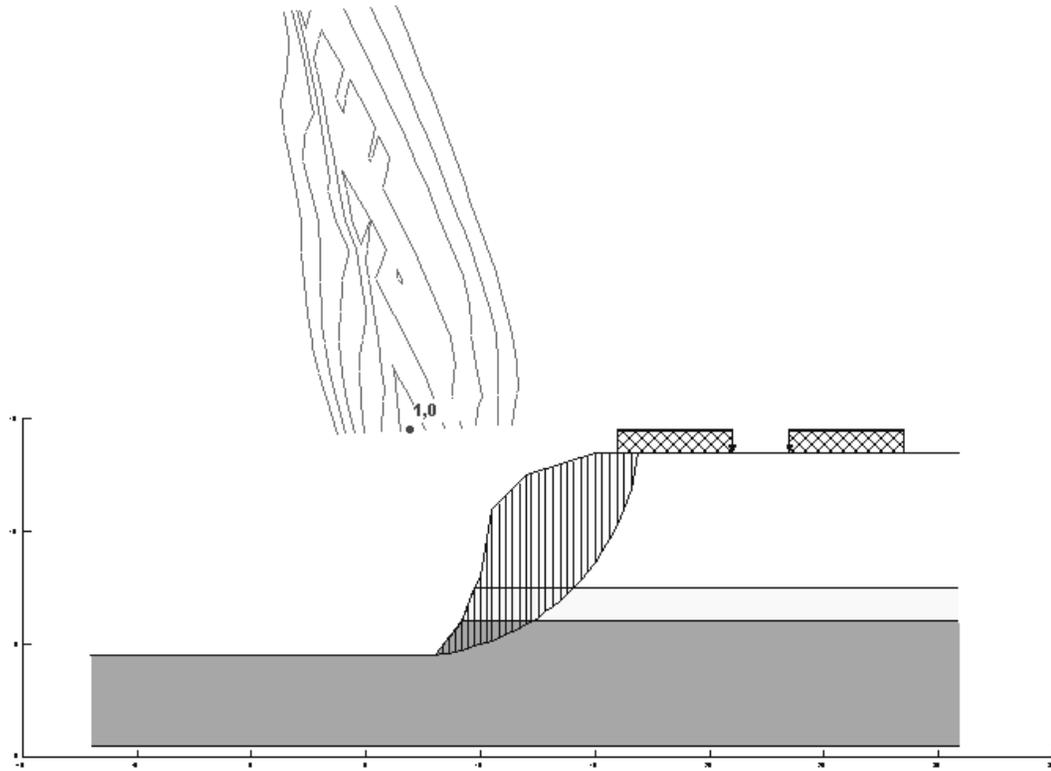


Figura 4.3: Superfície crítica de ruptura pelo método de Bishop.

## CAPÍTULO V – CÁLCULO DO MURO EM SOLO REFORÇADO

### 5.1 - Regularização do talude

Para a construção do muro, é necessário regularizar o talude a uma inclinação que forneça um fator de segurança igual ou maior que 1,3. A obra deverá ser realizada durante o período de seca para considerarmos o solo não-saturado, o que nos fornece um valor de coesão maior, e conseqüentemente, um fator de segurança maior. Será necessário também, durante a construção, interditar o tráfego da estrada para o alívio da sobrecarga.

As seções regularizadas com suas respectivas inclinações estão definidas abaixo.

#### Seção de 9m

Inclinação =  $66^\circ$

Fator de segurança = 2,5

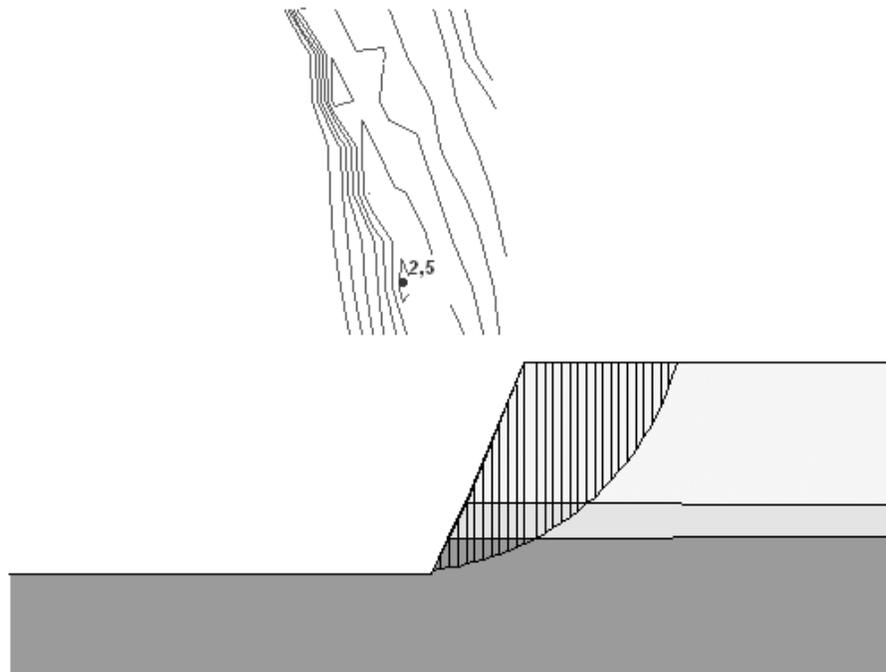


Figura 5.1: Superfície de ruptura para o talude de 9m regularizado.

**Seção de 8m**  
Inclinação =  $83^\circ$   
FS = 2,5

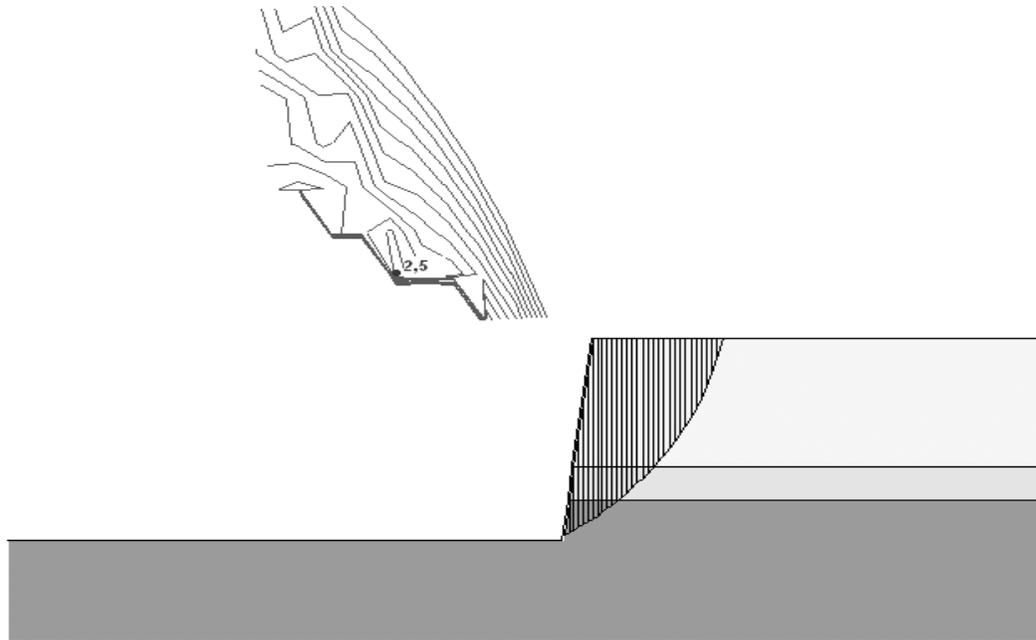


Figura 5.2: Superfície de ruptura para o talude de 8m regularizado.

**Seção de 6m**  
Inclinação =  $83^\circ$   
FS = 2,7

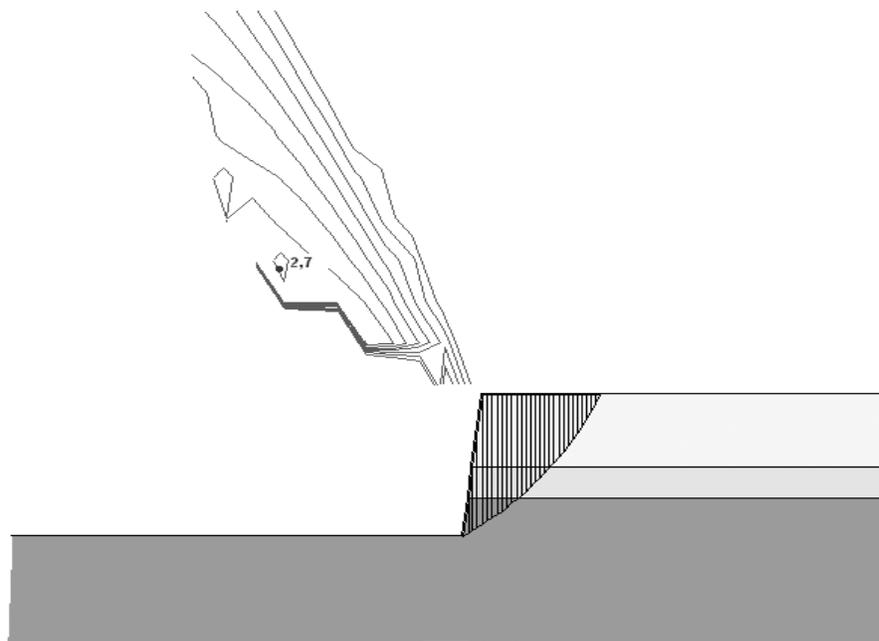


Figura 5.3: Superfície de ruptura para o talude de 6m regularizado.

**Seção de 4m**  
Inclinação =  $85^\circ$   
FS = 3,5

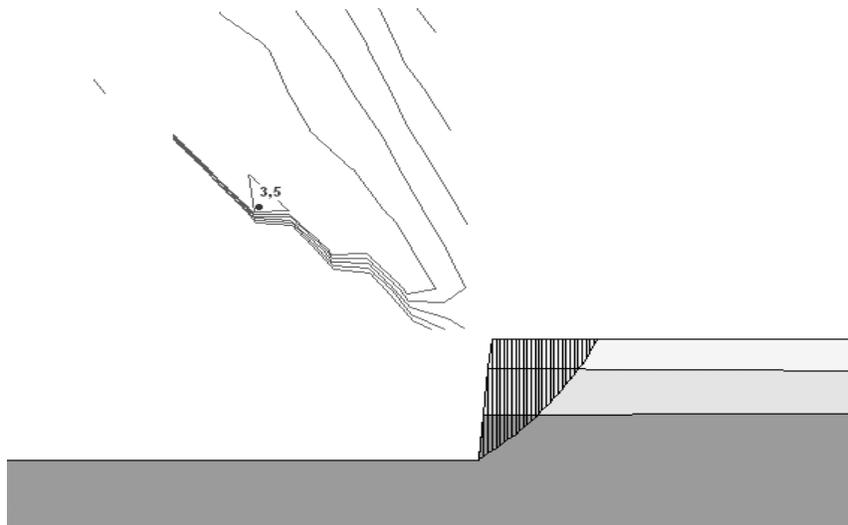


Figura 5.4: Superfície de ruptura para o talude de 4m regularizado.

**Seção de 2m**  
Inclinação = vertical  
FS = 8,7

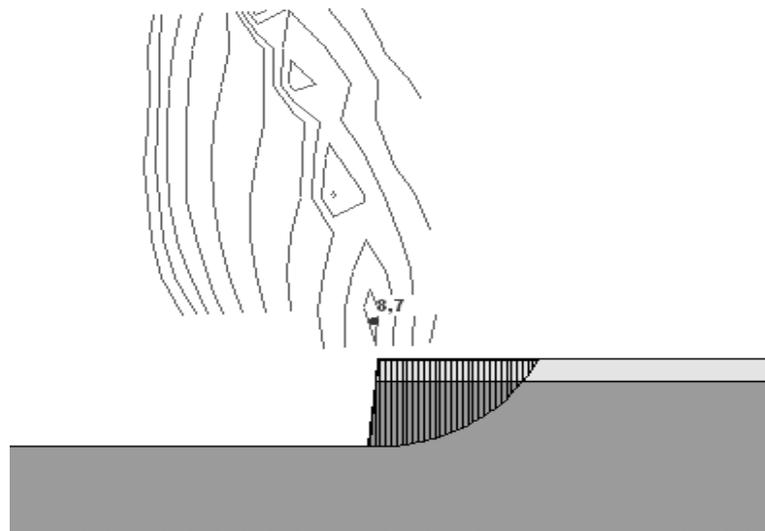


Figura 5.5: Superfície de ruptura para o talude de 2m regularizado.

## 5.2 - Características do solo e do muro (seção mais crítica do talude)

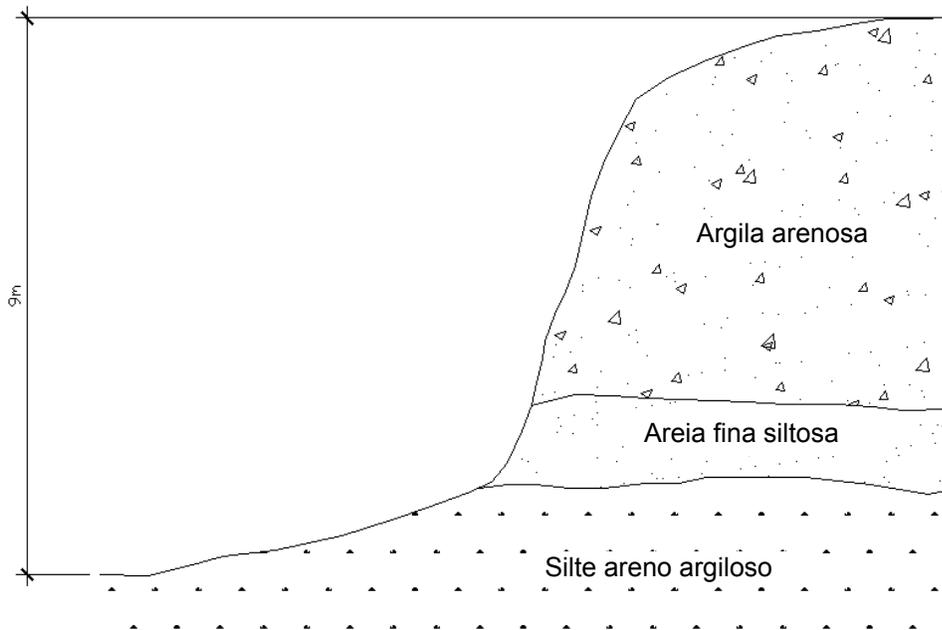


Figura 5.6: Seção crítica do talude.

A estrutura calculada nesta seção se refere à seção mais crítica do talude, mostrada na Figura 5.5. As demais seções foram calculadas da mesma maneira.

### 5.2.1 - Geometria do muro

- Altura do muro:  $H = 9\text{m}$
- Espaçamento dos reforços:  $S_v = 0,80\text{m}$  (constante)
- Inclinação da face:  $\omega = 89$

### 5.2.2 - Parâmetros do solo

- Peso específico:  $\gamma_{\text{nat}} = 24,3 \text{ kN/m}^2$
- Atividade química do solo:  $\text{pH} = 5$
- Ângulo de atrito:  $\phi' = 36,49$
- Módulo tangente inicial:  $k = 70$
- Módulo expoente:  $n = 0,45$
- Fator de segurança à ruptura mecânica individual das camadas de reforço:  $\text{FS} = 1,5$

### 5.2.3 - Parâmetros do geossintético

Os fatores de redução foram cedidos pelo fabricante.

- Tipo de reforço: geogrelha Fortrac®
- Fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação:  $f_{mr} = 1,06$
- Fator de redução parcial por degradação ambiental:  $f_a = 1,03$
- Fator de redução para fluência em tração:  $f_{cr} = 1,67$  (120 anos)
- Fator de redução parcial para certezas estatísticas do geossintético:  $f_m = 1,1$  (120 anos)

### 5.2.4 - Características do rolo compactador (sem aceleração vertical)

O rolo autopropelido foi o escolhido por ser comum a sua utilização nesse tipo de obra e por este ser um item da tabela EMOPI e SINAPI que possuíamos.

- Tipo de equipamento: rolo autopropelido
- Peso:  $Q = 120$  kN
- Comprimento do tambor:  $L = 2,1$ m

## 5.3 - Análise da estabilidade externa

### 5.3.1 - Determinação do comprimento do reforço

O comprimento do reforço,  $L_r$ , deve ser definido de forma a garantir a estabilidade externa. Para simplicidade dos cálculos, o muro será considerado com face vertical.

a) Cálculo do empuxo da zona não reforçada

O coeficiente de empuxo de terras no estado ativo  $K_a$ , considerado o terrapleno horizontal e o atrito entre o solo e o muro, pode ser calculado pela formulação de Rankine:

$$Ka = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \rightarrow Ka = 0,249$$

Segundo a Equação [3],  $E = 181,5 \text{ kN/m}$

b) Verificação do deslizamento

Considerando o fator de segurança mínimo de 1,5 o comprimento de reforço ( $L_r$ ) pode ser calculado pela equação [2]:

$$L_r = \frac{1,5 \cdot 181,5}{(24,3 \cdot 9) \cdot \tan 36,49} \rightarrow L_r = 1,68 \text{ m}$$

c) Verificação de tombamento

Considerando o fator de segurança mínimo de 1,5, o comprimento do reforço será, segundo a Equação [5]:

$$L_r = \frac{2 \cdot FS_t \cdot E \cdot y_E}{W} \rightarrow L_r = 4,4 \text{ m}$$

d) Verificação das tensões na base

Para que a condição de base totalmente comprimida seja atendida, temos:

$$e = \frac{Ka \cdot H^2}{6 \cdot L_r} \leq \frac{L_r}{6} \Rightarrow L_r \geq H \cdot \sqrt{Ka} \Rightarrow L_r = 9 \sqrt{0,249} \rightarrow L_r = 4,49 \text{ m}$$

Dessa forma, o comprimento mínimo necessário dos reforços  $L_r$ , para evitar simultaneamente o deslizamento, tombamento e ainda manter a base do muro comprimida será de 4,49m.

e) Capacidade de carga do terreno de fundação

Considerando a formulação de Meyerhof (1955) para a distribuição das tensões atuantes na base do muro, temos:

$$\sigma_{z,b} = \frac{\gamma' H}{1 - \left(\frac{K_a}{3}\right) \left(\frac{H}{L_r}\right)^2}$$

Tomou-se para os reforços o comprimento de 7,2m (0,8.H) de forma a se evitar o arrancamento dos reforços da zona resistente. Com esta largura de reforço, a tensão na base fica:

$$\sigma_{z,b} = \frac{18,9}{1 - \frac{0,249}{3} \left(\frac{9}{7,2}\right)^2} = 186,1 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Considerando o fator de segurança 3 para a capacidade de carga da fundação, o terreno deve apresentar uma tensão última superior a 558,3 kN/m<sup>2</sup>. Admitindo o terreno da fundação semelhante ao solo de enchimento do muro, a formulação de Meyerhof fornece:

$$q_{\max} = c' N_c + q_s N_q + 0,5 \gamma_f B' N_\gamma$$

$$N_q = e^{(\pi \cdot \tan \phi')} \cdot \tan^2(45^\circ + \phi' / 2) = e^{(\pi \cdot \tan 37)} \cdot \tan^2(45^\circ + 37 / 2) = 43$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' = (43 - 1) \cot 37 = 55,7$$

$$N_\gamma = 1,80 \cdot (43 - 1) \cdot \tan 37 = 56,9$$

Para que as tensões na base sejam aceitáveis, devemos calcular qual o embutimento necessário para o muro, que é expresso por D. A parcela da coesão será desprezada.

$$q_{\max} = 16,4.D.43 + 0,5.16,4.7,2.56,9 \geq 424,14$$

$$705,2.D + 3359,4 \geq 424,14$$

$$D \geq -4,2m$$

Não é necessário embutimento.

## 5.4 - Análise da estabilidade interna

Os esforços devem ser calculados para evitar a ruptura por tração ou arrancamento da zona resistente. O comprimento, resistência e a quantidade de reforços são determinados com base na tensão máxima nos reforços  $T_{\max}$ .

Para determinação de  $A_r$ , é necessário conhecer  $T_{\max}$ , que por sua vez, também é função de  $A_r$ , pois as tensões são dependentes da rigidez relativa solo-reforço. Assim, é necessário um cálculo iterativo.

a) Cálculo da tensão vertical induzida pela compactação

$$v_0 = \frac{K_0}{1 + K_0} = \frac{1 - \text{sen } \phi'}{2 - \text{sen } \phi'} \Rightarrow v_0 = 0,28$$

$$N_\gamma = \tan\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) \left[ \tan^4\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) - 1 \right] \Rightarrow N_\gamma = 30,4$$

Desta forma, o valor da tensão vertical induzida pela compactação será:

$$\sigma'_{z_c,i} = (1 - v_o) \cdot (1 + K_a) \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot \frac{Q \cdot N_\gamma}{L}} \Rightarrow \sigma'_{z_c,i} = 111,8 kN / m^3$$

b) Cálculo da tensão geostática no nível do reforço

Cada reforço está situado a uma profundidade genérica  $z$ . Pela formulação de Meyerhof (1995), temos:

$$\sigma' = \frac{\gamma' \cdot z}{1 - \left(\frac{K_a}{3}\right) \left(\frac{z}{L_r}\right)^2} = \frac{18 \cdot z}{1 - 0,0016 \cdot z^2}$$

c) Cálculo da tensão  $\sigma'_{zc}$

Para profundidades nas quais  $\sigma'_z < \sigma'_{zc,i}$ , ou seja nas quais  $\sigma'_{zc} < 111,8$  kPa, tem-se  $\sigma'_{zc} = 111,8$  kPa. Para maiores profundidades, nas quais  $\sigma'_z > 111,8$  kPa, tem-se  $\sigma'_{zc} = \sigma'_z$ .

d) Cálculo de  $\beta$

Para a primeira iteração adota-se o valor adequado de  $S_i$ , de acordo com o tipo de reforço. Neste exemplo, para a geogrelha adotada, considera-se 0,03:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma'_{zc}}{P_a}\right)^n}{S_i}$$

Primeira iteração:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma'_{zc}}{100}\right)^{0,45}}{0,03} = 4,2 \cdot \sigma'_{zc}{}^{0,45}$$

Demais iterações:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sigma'_{zc}}{100}\right)^{0,45}}{S_i}$$

onde:

$$S_i = \frac{E_r \cdot A_r}{k \cdot P_a \cdot S_v \cdot S_h} = \frac{E_r \cdot A_r}{70 \cdot 100 \cdot 0,8 \cdot 1} = \frac{E_r \cdot A_r}{5600}$$

e) Cálculo da tensão máxima  $T_{max}$

O valor de  $T_{max}$  é determinado para cada nível de reforço, considerando os valores de  $\beta$ ,  $\sigma'_z$  e  $\sigma'_{zc}$  a partir dos ábacos da Figura 2.6.

f) Refinamento de cálculo

A partir do reforço escolhido na primeira iteração (geogrelha Forrac®) é possível calcular o valor de  $S_i$ . Como possivelmente os valores de  $S_i$  serão diferentes do valor atribuído na primeira iteração, deve-se repetir os cálculos. O processo segue até que os valores calculados e assumidos para  $S_i$  sejam coerentes e conduzam a valores de  $T_{max}$  semelhantes.

No nosso caso estudado, foram necessárias apenas duas iterações porque para a geogrelha escolhida os valores de  $\beta$  na segunda iteração foram maiores que 16 assim como na primeira, levando ao mesmo valor de  $\chi$  para a Equação [21].

Os cálculos iterativos são mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2 para a primeira iteração e nas Tabelas 5.3 e 5.4 para a segunda.

Camada de reforço	Prof (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	35,1	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	35,1	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	35,1	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	35,1	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	35,1	0,6	10,7
6	4,4	81,7	111,8	111,8	35,1	0,7	10,7
7	5,2	97,8	111,8	111,8	35,1	0,9	10,7
8	6,0	114,6	111,8	114,6	35,5	1,0	11,0
9	6,8	132,2	111,8	132,2	37,8	1,0	12,7
10	7,6	150,7	111,8	150,7	40,1	1,0	14,5
11	8,4	170,4	111,8	170,4	42,4	1,0	16,4

Tabela 5.1: Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 9m.

camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	3,1	26,5	10,7	2,5
2	1,2	3,5	89,6	10,7	8,4
3	2,0	3,8	165,9	10,7	15,5
4	2,8	4,2	255,5	10,7	23,8
5	3,6	4,6	358,3	10,7	33,4
6	4,4	5,0	474,4	10,7	44,2
7	5,2	5,4	603,8	10,7	56,3
8	6,0	5,8	746,5	11,0	67,9
9	6,8	6,1	902,4	12,7	71,1
10	7,6	6,5	1071,6	14,5	74,1
11	8,4	6,9	1254,1	16,4	76,6

Tabela 5.2: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 9m.

Camada de reforço	Prof (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	706,5	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	706,5	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	706,5	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	706,5	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	706,5	0,6	10,7
6	4,4	81,7	111,8	111,8	706,5	0,7	10,7
7	5,2	97,8	111,8	111,8	706,5	0,9	10,7
8	6,0	114,6	111,8	114,6	714,5	1,0	11,0
9	6,8	132,2	111,8	132,2	761,9	1,0	12,7
10	7,6	150,7	111,8	150,7	808,3	1,0	14,5
11	8,4	170,4	111,8	170,4	854,2	1,0	16,4

Tabela 5.3: Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 9m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	3,1	26,5	10,7	2,5
2	1,2	3,5	89,6	10,7	8,4
3	2,0	3,8	165,9	10,7	15,5
4	2,8	4,2	255,5	10,7	23,8
5	3,6	4,6	358,3	10,7	33,4
6	4,4	5,0	474,4	10,7	44,2
7	5,2	5,4	603,8	10,7	56,3
8	6,0	5,8	746,5	10,7	69,6
9	6,8	6,1	902,4	11,0	82,0
10	7,6	6,5	1071,6	12,7	84,5
11	8,4	6,9	1254,1	14,5	86,7

Tabela 5.4: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 9m.

O fator de segurança 1,5 foi atingido em todos os reforços.

g) Resistência à tração admissível no reforço

Considerando  $FS = 1,5$ , com respeito à ruptura dos reforços, deve-se contar com uma geogrelha com resistência de cálculo  $T_d = 16,4 \cdot 1,5 = 24,6$  kN/m.

h) Estabilidade ao arrancamento

Determina-se o comprimento de ancoragem disponível além da cunha ativa  $L_e$ , o qual é dependente da profundidade de cada reforço.

$$L_e = L_r - (H - z) \cdot \left[ \tan\left(45^\circ - \frac{\phi'}{2}\right) - \frac{1}{\tan \omega} \right] = 7,2 - 0,48 \cdot (9 - z)$$

A resistência ao arrancamento  $P_r$  pode ser determinada a partir das características do contato solo-reforço e das tensões geostáticas verticais atuantes em cada reforço:

$$Pr = 2F^* \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot L_e \geq FS \cdot T_{\max}$$

O fator de escala ( $\alpha$ ) será admitido como 1,00 e o fator de resistência ao arrancamento ( $F^*$ ) pode ser determinado por:

$$F^* = f_a \cdot \tan \phi = 0,8 \cdot \tan 37 = 0,6$$

Assim temos:

$$Pr = 2F^* \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot L_e = 21,6 \cdot L_e$$

## 5.5 - Especificação do geossintético

Levando-se em conta os fatores parciais de redução, pode-se determinar as resistências nominais  $T_r$  dos geossintéticos:

Assim, o fator de redução total tem o valor:

$$FR = f_{mr} \cdot f_a \cdot f_{cr} \cdot f_m = 1,06 \cdot 1,03 \cdot 1,67 \cdot 1,05 = 1,91$$

Especificação para a solução:

$$T_r = T_d \cdot FR = 1,91 \cdot 24,6 = 47,1 \text{ kN/m}$$

O geossintético escolhido foi a geogrelha Fortrac<sup>®</sup> 55/30-20 da Huesker. As demais seções são calculadas como mostrado nas Tabelas 5.5 a 5.20 abaixo.

### Seção de 8m

1ª Iteração

Camada de reforço	Prof (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	35,1	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	35,1	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	35,1	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	35,1	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	35,1	0,6	10,7
6	4,4	81,7	111,8	111,8	35,1	0,7	10,7
7	5,2	97,8	111,8	111,8	35,1	0,9	10,7
8	6,0	114,6	111,8	114,6	35,5	1,0	11,0
9	6,8	132,2	111,8	132,2	37,8	1,0	12,7
10	7,6	150,7	111,8	150,7	40,1	1,0	14,5
11	8,0	160,4	111,8	160,4	41,3	1,0	15,4

Tabela 5.5: Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 8m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	3,6	30,7	10,7	2,9
2	1,2	3,9	102,0	10,7	9,5
3	2,0	4,3	186,6	10,7	17,4
4	2,8	4,7	284,5	10,7	26,5
5	3,6	5,1	395,6	10,7	36,9
6	4,4	5,5	520,1	10,7	48,5
7	5,2	5,9	657,7	10,7	61,3
8	6,0	6,2	808,7	11,0	73,5
9	6,8	6,6	972,9	12,7	76,7
10	7,6	7,0	1150,4	14,5	79,5
11	8,0	7,2	1244,2	15,4	80,8

Tabela 5.6: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 8m.

## 2ª Iteração

Camada de reforço	Prof. (m)	$\sigma'_z$	$\Sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z/\sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	706,5	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	706,5	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	706,5	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	706,5	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	706,5	0,6	10,7
6	4,4	81,7	111,8	111,8	706,5	0,7	10,7
7	5,2	97,8	111,8	111,8	706,5	0,9	10,7
8	6,0	114,6	111,8	114,6	714,5	1,0	11,0
9	6,8	132,2	111,8	132,2	761,9	1,0	12,7
10	7,6	150,7	111,8	150,7	808,3	1,0	14,5
11	8,0	160,4	111,8	160,4	831,3	1,0	15,4

Tabela 5.7: Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 8m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	3,6	30,7	10,7	2,9
2	1,2	3,9	102,0	10,7	9,5
3	2,0	4,3	186,6	10,7	17,4
4	2,8	4,7	284,5	10,7	26,5
5	3,6	5,1	395,6	10,7	36,9
6	4,4	5,5	520,1	10,7	48,5
7	5,2	5,9	657,7	10,7	61,3
8	6,0	6,2	808,7	10,7	75,4
9	6,8	6,6	972,9	11,0	88,4
10	7,6	7,0	1150,4	12,7	90,7
11	8,0	7,2	1244,2	14,5	86,0

Tabela 5.8: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 8m.

## Seção de 6m

### 1ª Iteração

Camada de reforço	Prof. (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z/\sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	35,1	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	35,1	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	35,1	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	35,1	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	35,1	0,6	10,7
6	4,4	81,7	111,8	111,8	35,1	0,7	10,7
7	5,2	97,8	111,8	111,8	35,1	0,9	10,7
8	6,0	114,6	111,8	114,6	35,5	1,0	11,0

Tabela 5.9: Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 6m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	4,5	39,0	10,7	3,6
2	1,2	4,9	126,9	10,7	11,8
3	2,0	5,3	228,1	10,7	21,3
4	2,8	5,7	342,6	10,7	31,9
5	3,6	6,0	470,3	10,7	43,8
6	4,4	6,4	611,3	10,7	57,0
7	5,2	6,8	765,6	10,7	71,4
8	6,0	7,2	933,1	11,0	84,8

Tabela 5.10: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 6m.

## 2ª iteração

Camada de reforço	Prof. (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	706,5	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	706,5	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	706,5	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	706,5	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	706,5	0,6	10,7
6	4,4	81,7	111,8	111,8	706,5	0,7	10,7
7	5,2	97,8	111,8	111,8	706,5	0,9	10,7
8	6,0	114,6	111,8	114,6	714,5	1,0	11,0

Tabela 5.11: Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 6m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	4,5	39,0	10,7	3,6
2	1,2	4,9	126,9	10,7	11,8
3	2,0	5,3	228,1	10,7	21,3
4	2,8	5,7	342,6	10,7	31,9
5	3,6	6,0	470,3	10,7	43,8
6	4,4	6,4	611,3	10,7	57,0
7	5,2	6,8	765,6	10,7	71,4
8	6,0	7,2	933,1	10,7	87,0

Tabela 5.12: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 6m.

## Muro de 4m

1ª Iteração

Camada de reforço	Prof. (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	35,1	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	35,1	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	35,1	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	35,1	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	35,1	0,6	10,7
6	4,0	73,9	111,8	111,8	35,1	0,7	10,7

Tabela 5.13: Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 4m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1	0,4	5,5	47,3	10,7	4,4
2	1,2	5,9	151,8	10,7	14,1
3	2,0	6,2	269,6	10,7	25,1
4	2,8	6,6	400,6	10,7	37,3
5	3,6	7,0	544,9	10,7	50,8
6	4,0	7,2	622,1	10,7	58,0

Tabela 5.14: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 4m.

2ª Iteração

Camada de reforço	Prof (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1	0,4	7,2	111,8	111,8	706,5	0,1	10,7
2	1,2	21,6	111,8	111,8	706,5	0,2	10,7
3	2,0	36,2	111,8	111,8	706,5	0,3	10,7
4	2,8	51,0	111,8	111,8	706,5	0,5	10,7
5	3,6	66,2	111,8	111,8	706,5	0,6	10,7
6	4,0	73,9	111,8	111,8	706,5	0,7	10,7

Tabela 5.15: Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 4m.

Camada de reforço	Prof. (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1,0	0,4	5,5	47,3	10,7	4,4
2,0	1,2	5,9	151,8	10,7	14,1
3,0	2,0	6,2	269,6	10,7	25,1
4,0	2,8	6,6	400,6	10,7	37,3
5,0	3,6	7,0	544,9	10,7	50,8
6,0	4,0	7,2	622,1	10,7	58,0

Tabela 5.16: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 4m.

## Muro de 2m

### 1ª Iteração

Camada de reforço	Prof (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1,0	0,4	7,2	111,8	111,8	35,1	0,1	10,7
2,0	1,2	21,6	111,8	111,8	35,1	0,2	10,7
3,0	2,0	36,2	111,8	111,8	35,1	0,3	10,7

Tabela 5.17: Determinação da tensão máxima em cada reforço na primeira iteração para a seção de 2m.

Camada de reforço	Prof (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1,0	0,4	5,5	47,3	10,7	4,4
2,0	1,2	5,9	151,8	10,7	14,1
3,0	2,0	6,2	269,6	10,7	25,1

Tabela 5.18: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na primeira iteração para a seção de 2m.

### 2ª Iteração

Camada de reforço	Prof (m)	$\sigma'_z$	$\sigma'_{zci}$	$\sigma'_{zc}$	$\beta$	$\sigma'_z / \sigma'_{zc}$	$T_{max}$
1,0	0,4	7,2	111,8	111,8	706,5	0,1	10,7
2,0	1,2	21,6	111,8	111,8	706,5	0,2	10,7
3,0	2,0	36,2	111,8	111,8	706,5	0,3	10,7

Tabela 5.19: Determinação da tensão máxima em cada reforço na segunda iteração para a seção de 2m.

Camada de reforço	Prof (m)	$L_e$	$P_r$ (kN/m)	$T_{max}$ (kN/m)	FS
1,0	0,4	5,5	47,3	10,7	4,4
2,0	1,2	5,9	151,8	10,7	14,1
3,0	2,0	6,2	269,6	10,7	25,1

Tabela 5.20: Determinação dos fatores de segurança dos reforços na segunda iteração para a seção de 2m.

## 5.6 - Estabilidade Global

A estabilidade global dos muros foi calculada considerando um fator de segurança maior ou igual a 1,5. O solo que constitui o muro e o aterro tem as propriedades definidas na seção 3.2. As Figuras 5.6 a 5.10 mostram as superfícies de ruptura e os fatores de segurança para cada seção.

**Seção de 9m**

Fator de segurança = 1,8

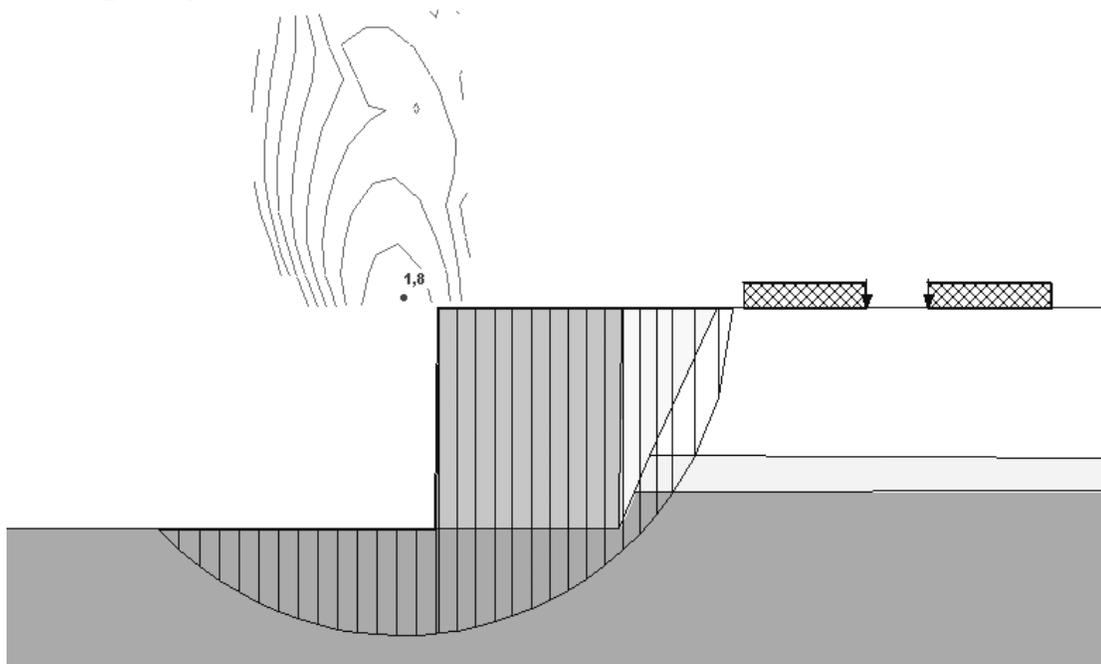


Figura 5.7: Superfície de ruptura global para a seção de 9m e fator de segurança segundo o método de Bishop.

**Seção de 8m**

Fator de segurança = 1,6

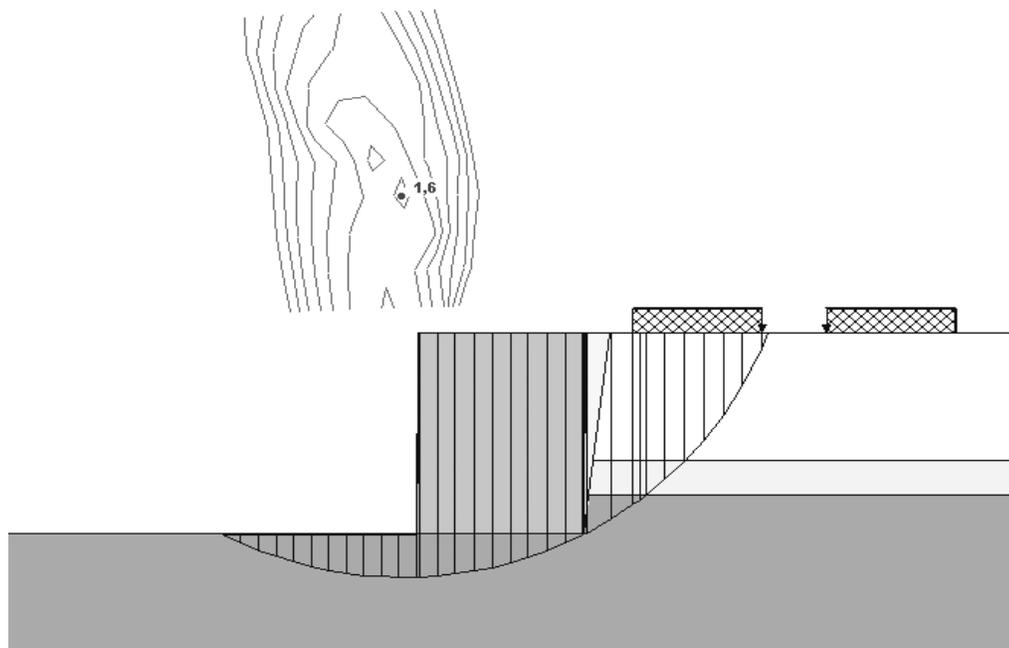


Figura 5.8: Superfície de ruptura global para a seção de 8m e fator de segurança segundo o método de Bishop.

**Seção de 6m**

Fator de segurança = 1,6

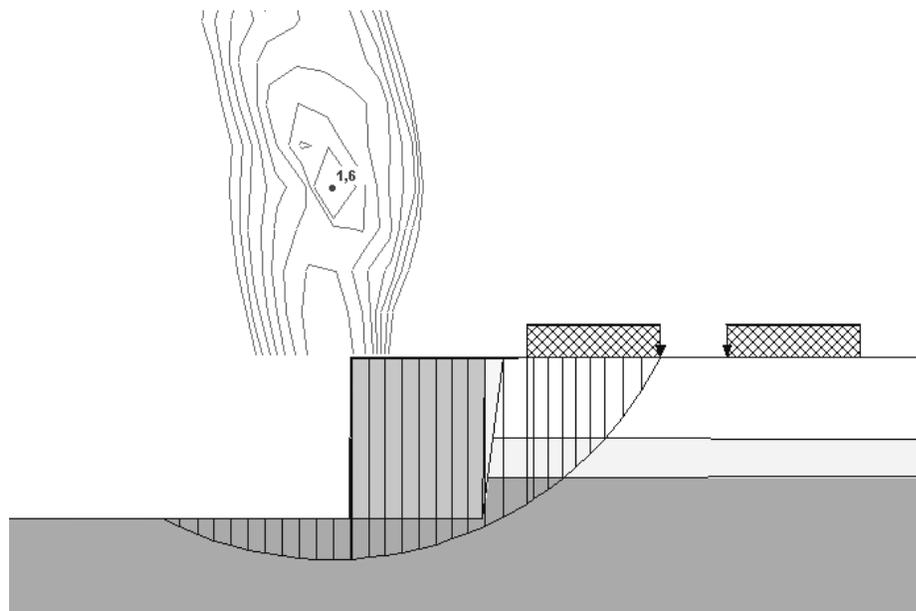


Figura 5.9: Superfície de ruptura global para a seção de 6m e fator de segurança segundo o método de Bishop.

**Seção de 4m**

Fator de segurança = 2,1

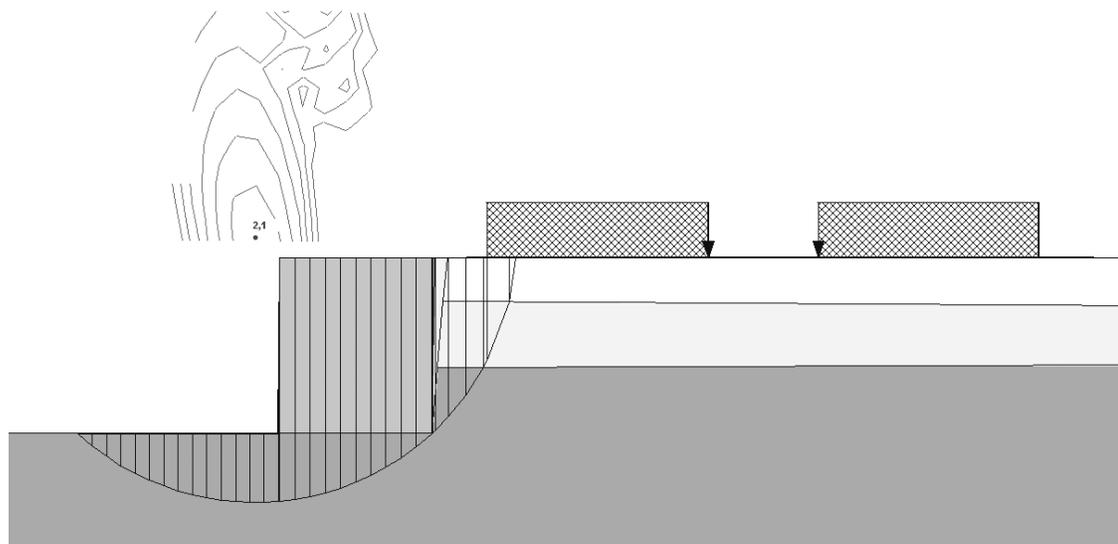


Figura 5.10: Superfície de ruptura global para a seção de 4m e fator de segurança segundo o método de Bishop.

## Seção de 2m

Fator de segurança = 2,1

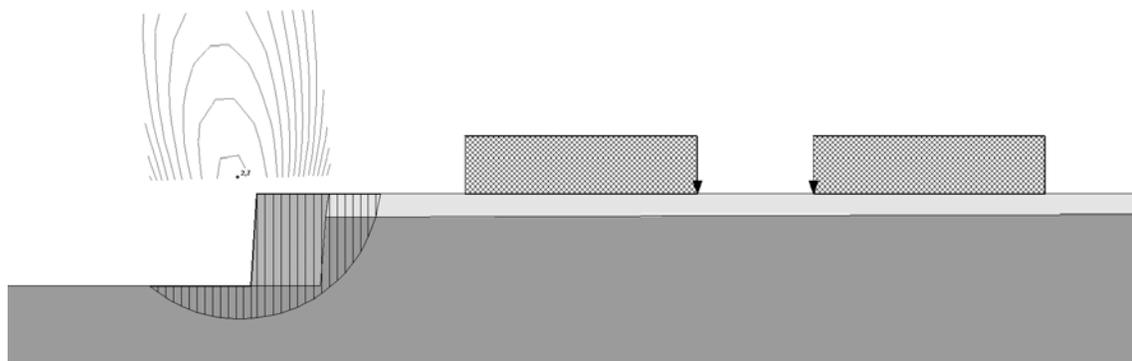


Figura 5.11: Superfície de ruptura global para a seção de 2m e fator de segurança segundo o método de Bishop.

## 5.7 - Orçamento

### *Serviços Preliminares*

Serviço	unid.	Quant.	Preço unit.	Total
Placa de Identificação de obra públic. E suporte de madeira.	m2	12	154,61	1855,32
Placa de sinalização preventiva	um	1	30,94	30,94
Locação topográfica	h	8	197,93	1583,44
Barracão de obra em chapa compensada	m <sup>2</sup>	10	165,79	1657,9

Tabela 5.21: Custos para serviços preliminares

Total = R\$ 5 127,6

### *Raspagem e limpeza manual do terreno (443,5m<sup>2</sup>)*

Componente	Unidade	Consumo	Consumo total	Custo unit.	Custo total
Servente	h	0,0774	34,32	6,00	205,96

Tabela 5.22: Custos para raspagem e limpeza manual do terreno

### *Escavação mecanizada (4316,1m<sup>3</sup>)*

<b>Componente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo</b>	<b>Consumo total</b>	<b>Custo unit.</b>	<b>Custo total</b>
servente	h	0,055	237,3855	6	1424,313
Retroescavadeira	h prod	0,055	237,3855	34,15	8106,714825

Tabela 5.23: Custos para escavação mecanizada

Total = R\$ 9 531,02

### *Compactação de aterro (3239,28m<sup>3</sup>)*

<b>Componente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo</b>	<b>Consumo total</b>	<b>Custo unit.</b>	<b>Custo total</b>
Servente	h	0,015	48,5892	6	291,5352
Compact. placa vibr.	h prod	0,005	16,1964	11,17	180,913788

Tabela 5.24: Custos para compactação do terreno

Total = R\$ 472,44

### *Geogrelha*

Total = R\$ 91 258,36

### *Concreto projetado*

<b>Componente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo</b>	<b>Consumo Total</b>	<b>Cunsto Unit.</b>	<b>Custo total</b>
concreto projetado	m3	-	34,81	646,64	22509,5384

Tabela 5.25: Custo do concreto projetado

### *Geocomposto (302,5m<sup>2</sup>)*

<b>Componente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Consumo</b>	<b>Consumo total</b>	<b>custo unit.</b>	<b>custo total</b>
geocomposto	m2	-	302,5	24,12	7296,3
servente	h	0,02	6,05	6	36,3

Tabela 5.26: Custo do geocomposto

Total = 7 332,6

Custo final da estrutura = R\$ 136 463,78

## **5.8 – Projeto executivo**

### *Terraplenagem*

Serão realizadas a raspagem e limpeza manual do terreno para a remoção de vegetação e lixo.

Serão executados também, serviços de escavação mecânica não escorada. A encosta terá sua superfície regularizada a uma inclinação prescrita em projeto.

### *Contenção*

O muro será executado em solo reforçado com geogrelhas, conforme já descrito no projeto. A estrutura será executada camada por camada, sendo que os reforços serão espaçados de 0,8m e o solo compactado com rolo autopropelido. As dimensões de todas as camadas estão definidas no detalhamento. O geossintético será dobrado no fim de cada camada. Para essa dobra será utilizado um não-tecido Hate® ancorado no comprimento de ancoragem especificado no projeto. O processo de montagem também é especificado em projeto.

### *Drenagem*

O projeto de drenagem será constituído de um geocomposto para drenagem vertical MacDrain® 2L FP e um geotubo de 150 mm com a sua locação e a sua saída posicionados como mostrado no detalhamento. Os maiores detalhes estão descritos nos desenhos do projeto.

## **CAPÍTULO VI – CÁLCULO DO MURO EM SOLO GRAMPEADO**

### **6.1 - Introdução**

Para o dimensionamento do muro de solo grampeado, a disposição dos grampos e seus comprimentos na seção do talude foram obtidas utilizando-se o programa de cálculo GeoSlope, com fator de segurança segundo o método Bishop, sendo considerado adequado quando maior ou igual a 1,5.

Após o desenho do talude natural e o posicionamento da sobrecarga, foi posicionada a malha de raios e de planos paralelos às superfícies de ruptura, obtendo-se um total de 18.081 interações.

Os parâmetros dos solos utilizados nas seções estudadas foram obtidos a partir dos resultados dos ensaios apresentados no Capítulo 3.

Com o talude natural definido, são inseridos os grampos a partir da face do talude definido e as características do reforço como o tipo de grampo utilizado e sua carga de trabalho em kN, o ângulo de inclinação com o eixo vertical, o comprimento total e o comprimento de ancoragem do grampo.

Vale ressaltar que para o solo grampeado o comprimento de ancoragem do grampo é igual ao seu comprimento total, já que não existe bulbo de ancoragem como em tirantes, porém para o cálculo da resistência se considera apenas o comprimento dentro da cunha passiva.

Com essas características definidas são verificados o fator de segurança e a superfície de ruptura do talude reforçado.

### **6.2 - Escolha da melhor geometria**

Com base em obras já executadas com sucesso em São Paulo, descritas no livro *Solo Grampeado: Projeto, execução, Instrumentação e comportamento*, foram realizadas uma série de tentativas a fim de se obter uma configuração de grampos com o fator de segurança adequado, para uma menor composição total dos grampos.

Essas tentativas foram realizadas inicialmente para a seção mais crítica do talude, a de 9,0 metros de altura, e a melhor configuração encontrada foi utilizada como base e padronização para as demais seções, com o objetivo de facilitar sua execução.

Em todas as possibilidades adotadas, foram fixados o ângulo de inclinação do grampo com o eixo vertical em  $15^\circ$  e a carga de trabalho do grampo em 8 tf, especificada pelo fabricante. Variando-se a distância vertical entre os grampos e os comprimentos dos grampos, se chegou a uma configuração considerada ideal.

As combinações das distâncias verticais entre os grampos e seus comprimentos, que influem diretamente no número de grampos por seção, estão resumidas nas tabelas 6.1, 6.2 e 6.3.

Os comprimentos estão indicados de cima para baixo, na vertical, identificados da seguinte forma: como “a”, “b”, “c”, “d”, para um espaçamento de 2,0 metros entre os grampos; como “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, para um espaçamento de 1,5 metros entre os grampos; e, como “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g”, “h”, para um espaçamento de 1,0 metro entre os grampos, conforme indicado nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

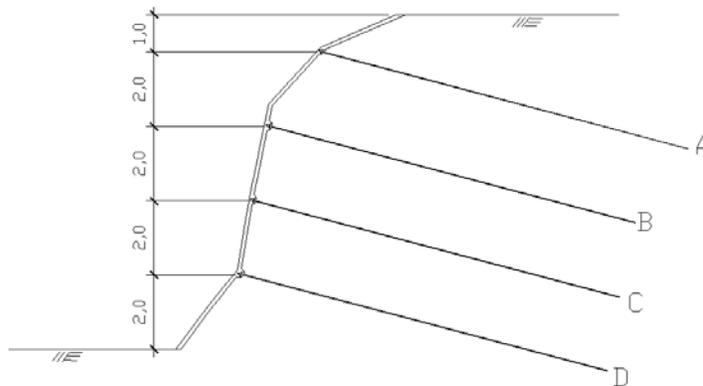


Figura 6.1: Geometria do talude com espaçamento entre os grampos de 2,0 m

Para um espaçamento vertical de 2,0 metros entre os grampos:					
Comprimento (m)				Comprimento Total (m)	Fator de Segurança
A	b	c	d		
18	18	18	18	72	1,551
18	18	18	12	66	1,521
18	18	12	12	60	1,489
12	12	12	12	48	1,433
16	16	16	16	64	1,520
16	16	16	12	60	1,498
<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>60</b>	<b>1,502</b>
15	15	15	12	57	1,485
14	14	14	14	56	1,482

Tabela 6.1: Cálculo do F.S. para os grampos com espaçamento vertical de 2,0m.

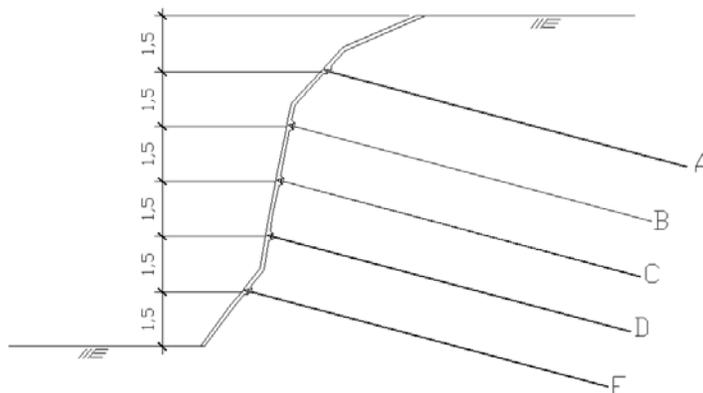


Figura 6.2: Geometria do talude com espaçamento entre os grampos de 1,5 m

Para um espaçamento vertical de 1,5 metros entre os grampos:						
Comprimento (m)					Comprimento Total (m)	Fator de Segurança
a	b	c	d	e		
12	12	12	12	12	60	1,541
12	12	12	12	10	58	1,523
<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>56</b>	<b>1,504</b>
12	12	10	10	10	54	1,485
12	10	10	10	10	52	1,465
10	10	10	10	10	50	1,450
12	12	12	10	8	54	1,480
12	12	12	8	8	52	1,447
12	12	12	12	8	56	1,498
12	12	12	12	9	57	1,512
12	12	12	9	9	54	1,481

Tabela 6.2: Cálculo do F.S. para os grampos com espaçamento vertical de 1,5m.

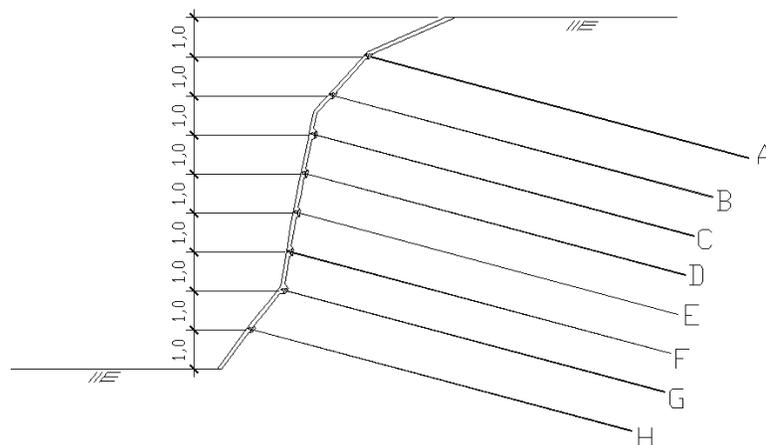


Figura 6.3: Geometria do talude com espaçamento entre os grampos de 1,0m

Para um espaçamento vertical de 1,0 metro entre os grampos:									
Comprimento (m)								Comprimento Total (m)	Fator de Segurança
a	B	c	d	e	f	g	h		
10	10	10	10	10	10	10	10	80	1,497
11	11	11	11	11	11	11	11	88	1,553
11	11	11	11	11	11	10	10	86	1,532
11	11	11	11	10	10	10	10	84	1,512
11	11	11	10	10	10	10	10	83	1,504
11	11	11	11	10	10	10	8	82	1,485
11	11	10	10	10	10	10	10	82	1,502
<b>11</b>	<b>10</b>	<b>81</b>	<b>1,500</b>						
12	12	12	12	12	12	12	12	96	1,619
12	12	12	10	10	10	10	10	86	1,523
12	12	12	10	10	10	10	9	85	1,511
12	12	12	10	10	10	9	9	84	1,499
12	12	10	10	10	10	10	10	84	1,514
12	10	10	10	10	10	10	10	82	1,506

Tabela 6.3: Cálculo do F.S. para os grampos com espaçamento vertical de 1,0m.

Para um espaçamento de 2,0m, a melhor configuração observada utiliza 4 grampos de 15,0m, totalizando 60,0m, e utilizando 4 luvas de emenda por seção.

Na configuração com espaçamento de 1,0m, a melhor distribuição foi com 1 grampo de 11,0m e 7 grampos de 10,0m, totalizando 81,0m por seção.

A configuração considera ideal para o talude com 9,0 m, foi com espaçamento vertical entre os grampos de 1,5m, totalizando 5 grampos na seção para cada seção de

1,0 metro de largura. E os comprimentos dos grampos, de cima para baixo, foram 12,0m, 12,0m, 12,0m, 10,0m e 10,0m, respectivamente, totalizando 56,0 metros para cada seção.

Essa geometria ideal do talude reforçado está indicada na Figura 6.4.

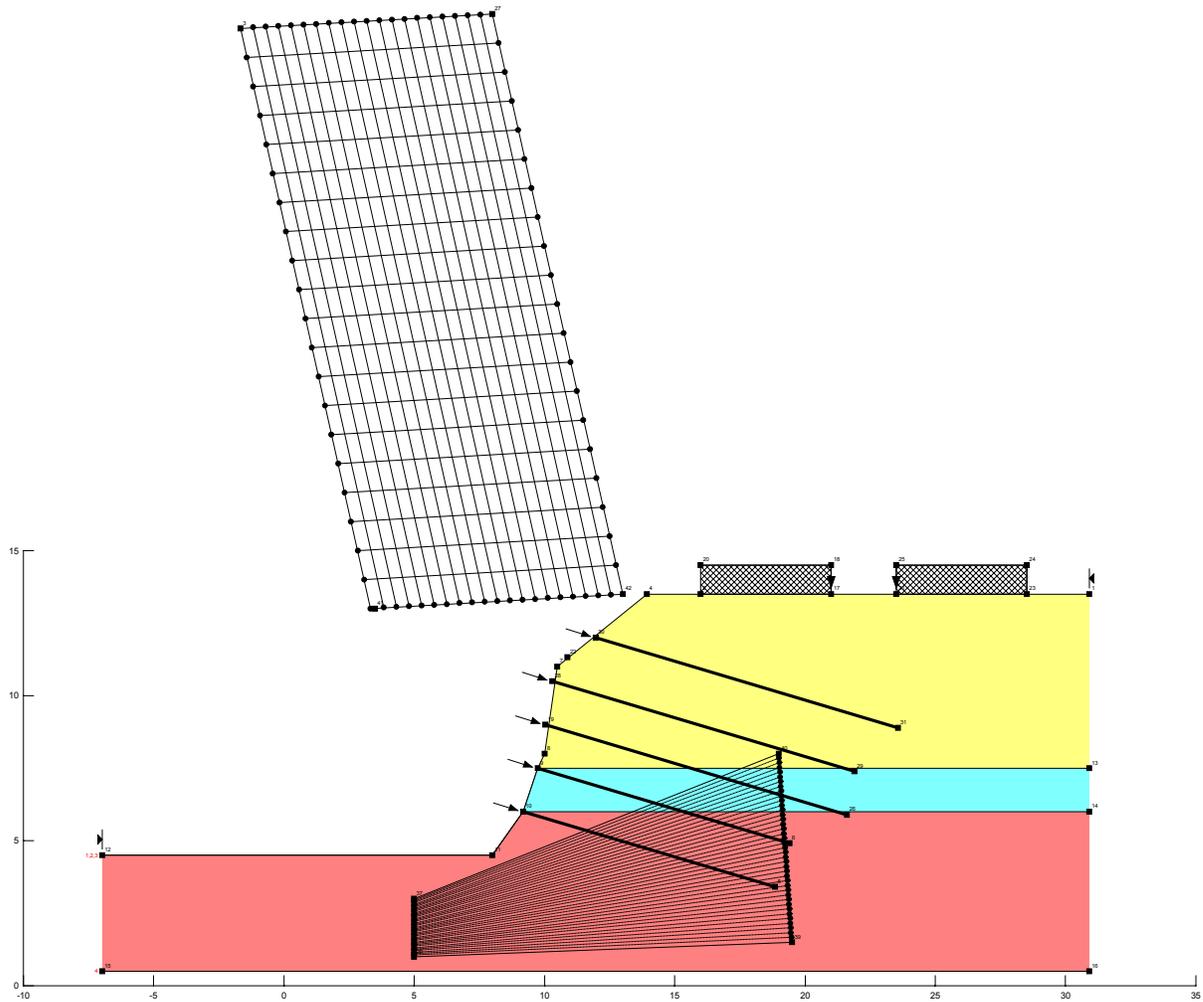


Figura 6.4: Configuração do talude de 9,0 metros com reforço.

Como indicado na Tabela 3.2 o fator de segurança para esta configuração foi de 1,5, e a superfície de ruptura está representada na Figura 6.5.

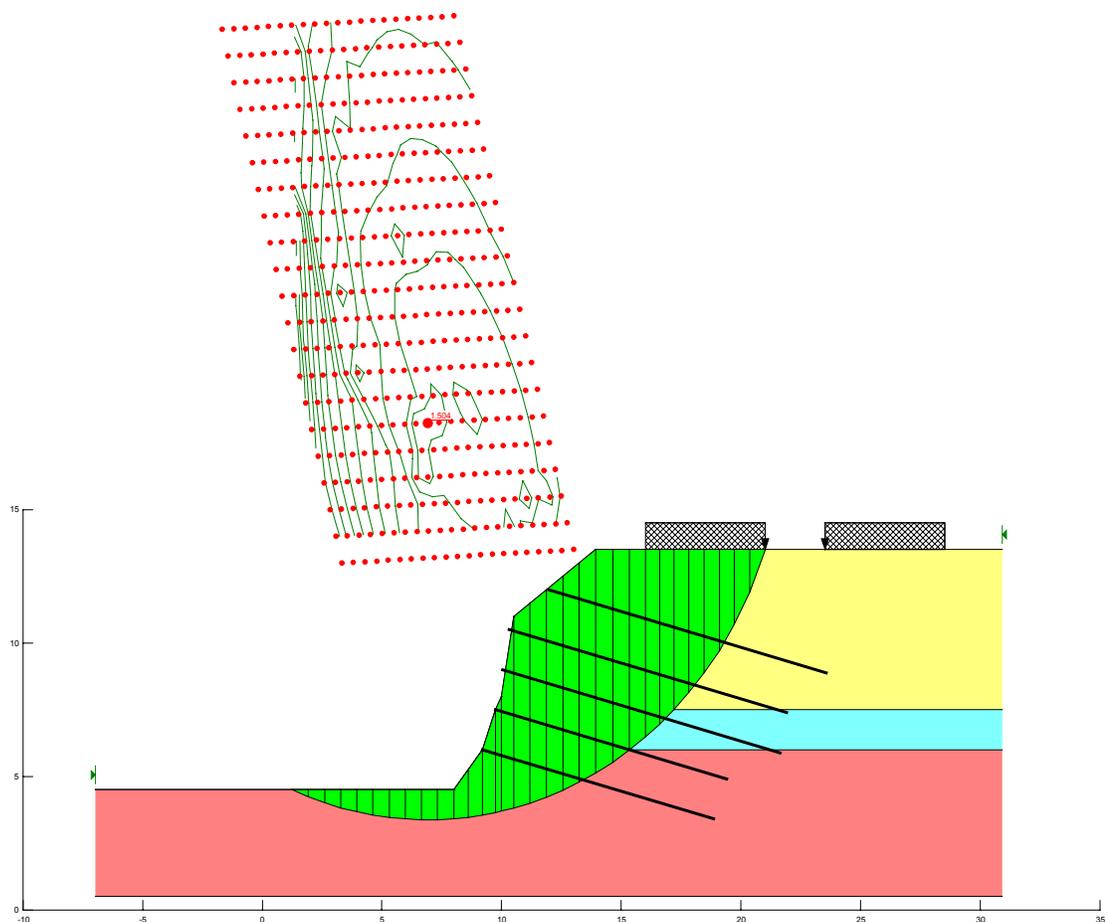


Figura 6.5: Superfície de ruptura crítica para seção de 9,0 metros com reforço.

A partir das curvas de nível que definem o talude e da planta de situação dos terrenos na região, se observa que parte do talude está localizado dentro destes terrenos.

Logo, para a execução dos reforços deverá ser feita a regularização do talude para que o muro não seja executado em áreas privadas.

Com estes cortes de regularização a superfície natural do talude se altera passando a ser plana, e seu ângulo de inclinação aumenta, tornando o talude mais íngreme que o natural.

O Fator de Segurança obtido com a regularização deve ser maior ou igual a 1,3.

O fator de segurança em todas as seções adotadas será calculadas segundo o método Bishop, para os taludes regularizados antes e depois da implantação do reforço.

## 6.3 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção com 9,0 m de altura

### 6.3.1 – Estabilidade global

Para o talude de 9,0 metros, a geometria dos grampos está identificada, de cima para baixo, na vertical, de “a” até “e”. Os grampos “a”, “b”, “c”, têm 12,0 metros de comprimento, e os grampos “d”, “e” têm 10,0 metros de comprimento, como descrito anteriormente.

Primeiramente deve-se regularizar a face do talude, para se executar o muro fora dos terrenos vizinhos. A face do talude se torna plana e com inclinação maior que a original, conforme observado na Figura 6.6.

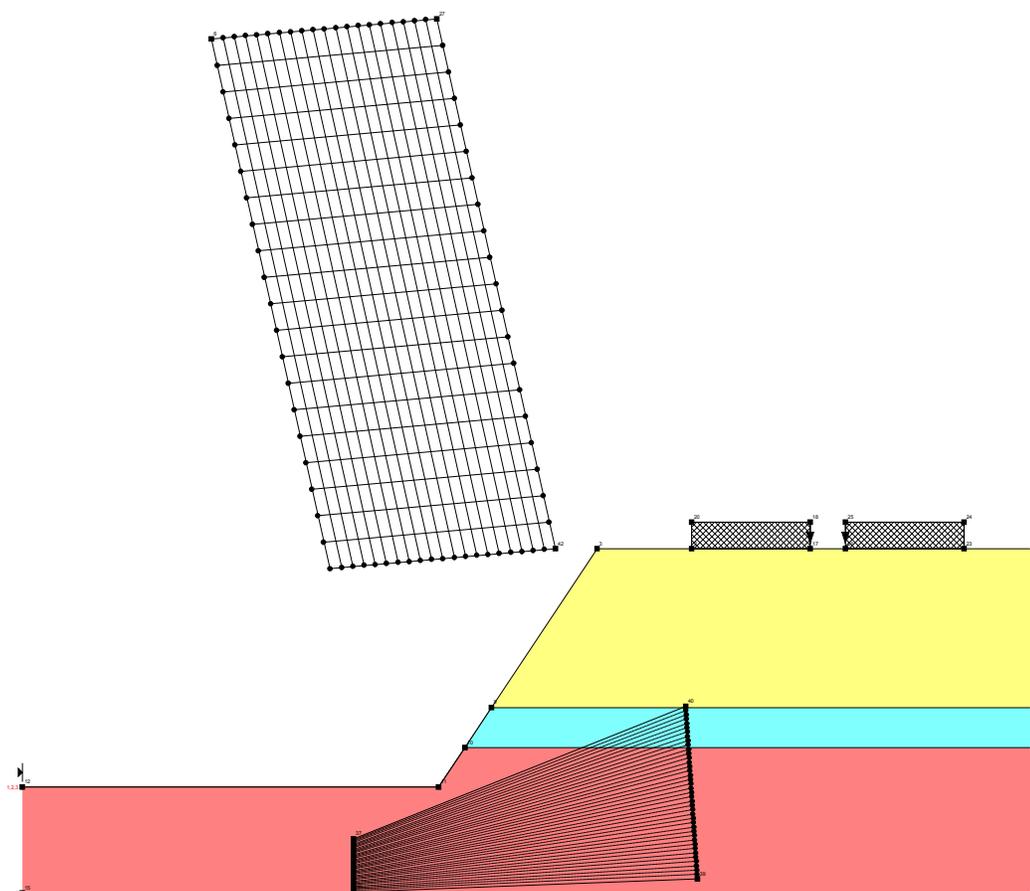


Figura 6.6: Configuração do talude com 9,0m regularizado sem reforço.

O fator de segurança segundo o método Bishop é 1,1, e a superfície de ruptura crítica está indicada na Figura 6.7.

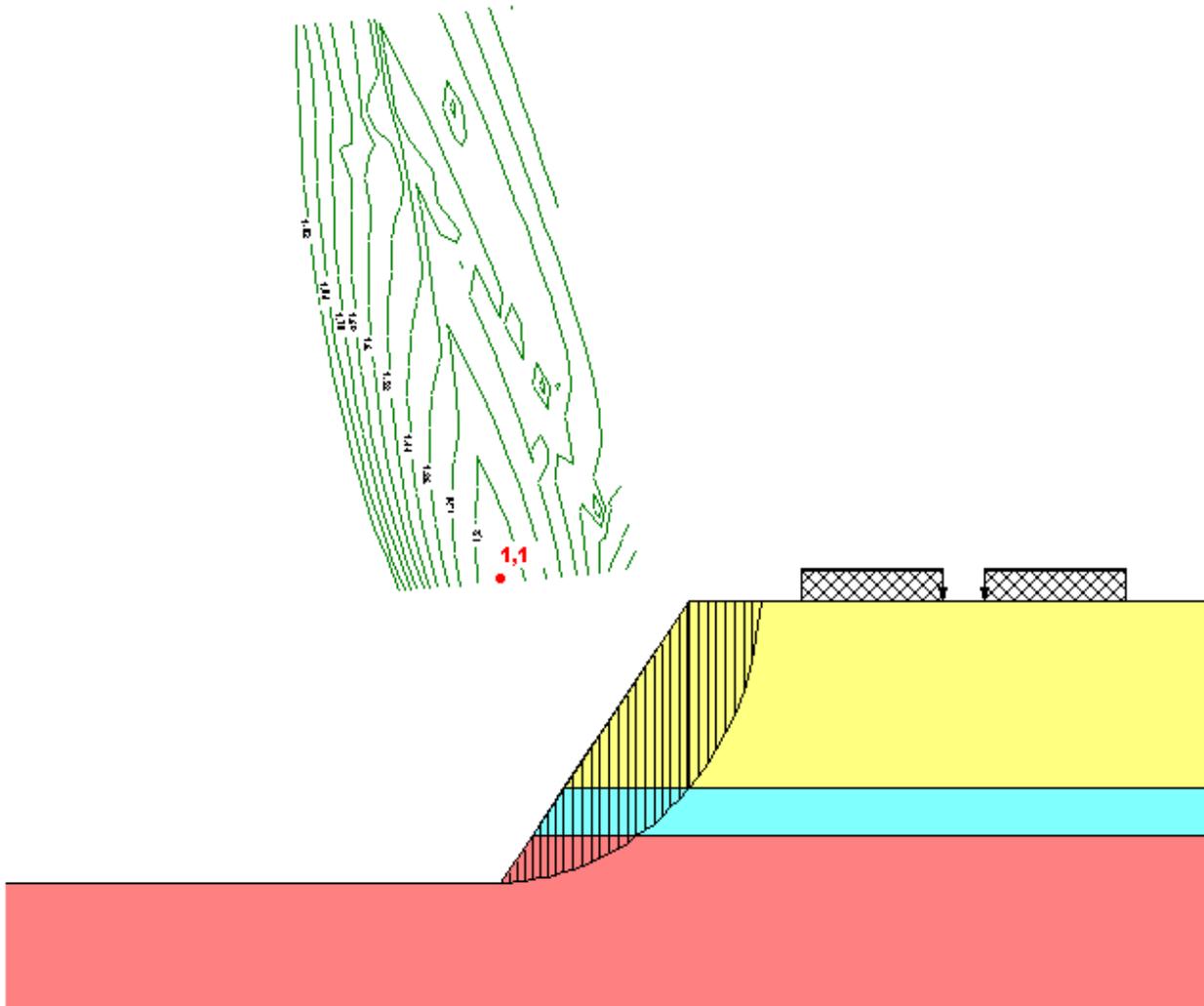


Figura 6.7: Superfície de ruptura crítica do talude com 9,0m regularizado sem reforço.

Com a face do talude regularizada, são inseridos os grampos com carga de trabalho igual a 80kN, espaçamento vertical de 1,5m, ângulo de inclinação de  $15^\circ$  com o eixo vertical, e comprimento conforme mencionado acima.

A configuração final dos reforços no talude está indicada na Figura 6.8.

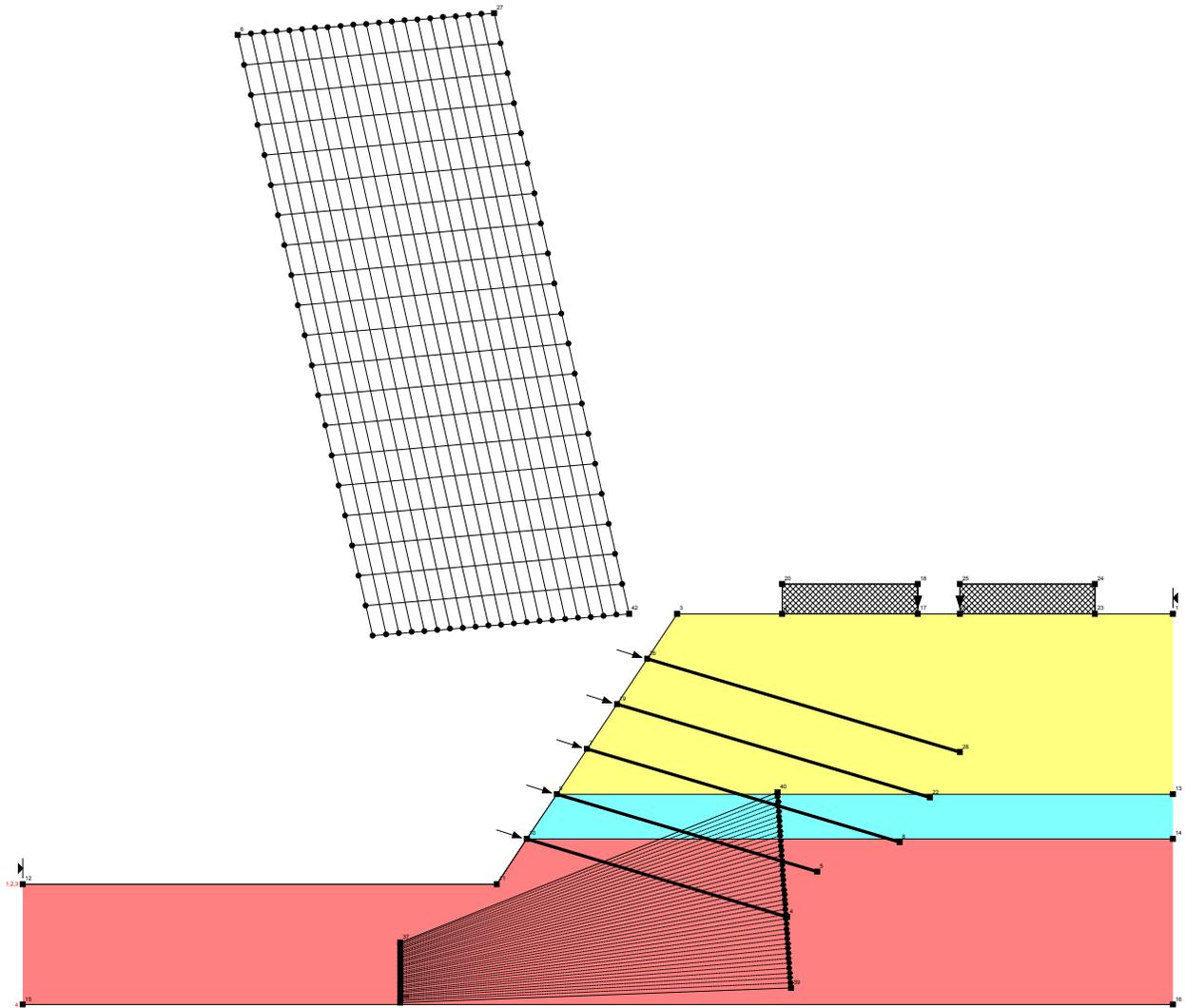


Figura 6.8: Configuração do talude regularizado de 9,0m com reforço.

Com a configuração do talude definida, é calculado o fator de segurança segundo o método Bishop, que mostra a superfície de ruptura crítica para a situação proposta.

O Fator de Segurança obtido com a aplicação do reforço foi de 1,5, e a verificação da superfície de ruptura está indicada na Figura 6.9.

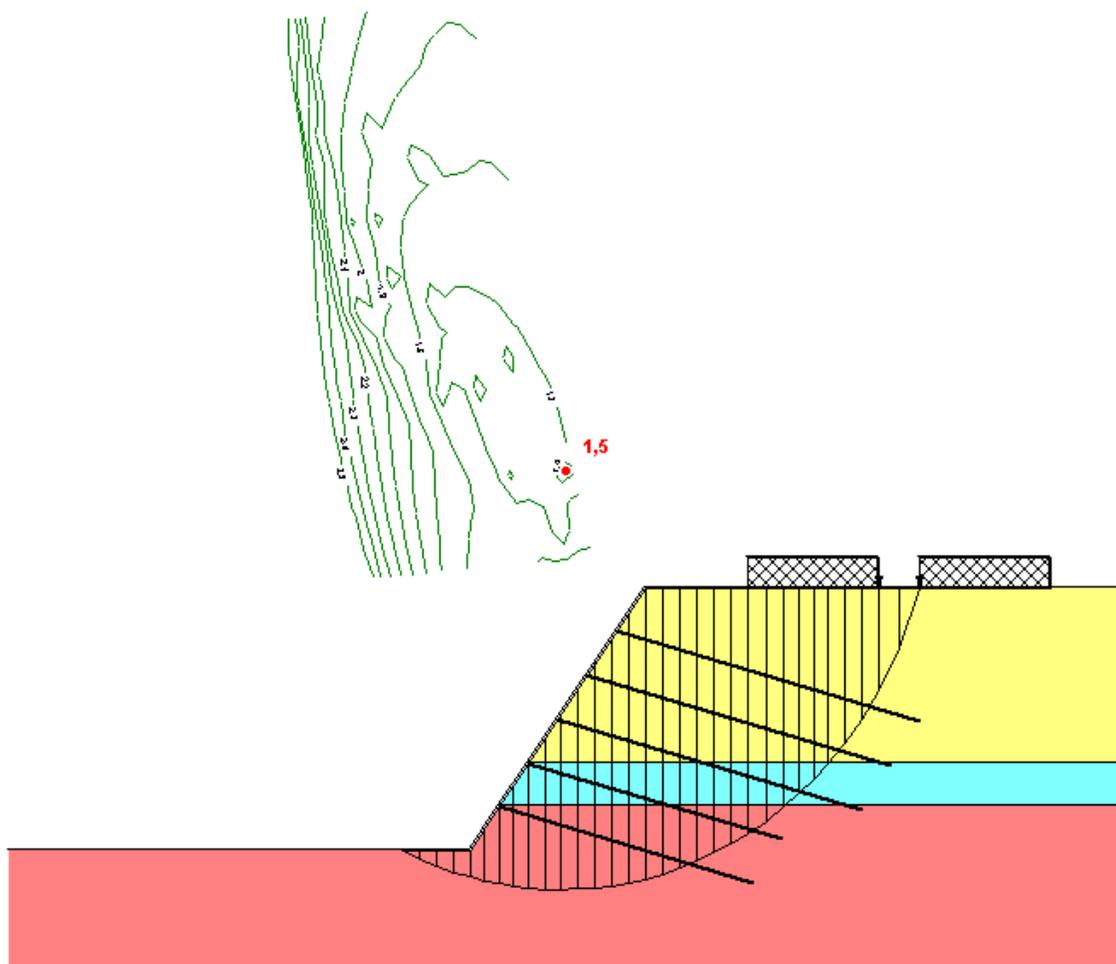


Figura 6.9: Superfície de ruptura crítica para seção de 9,0m, com reforço.

### 6.3.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural

O objetivo dessa verificação é se estimar a influência do reforço utilizado na superfície de ruptura crítica do talude natural. A superfície de ruptura que se deseja analisar é traçada na configuração do talude com o reforço, e calcula-se o fator de segurança pelo método Bishop considerando apenas esta superfície.

O Fator de Segurança para esta superfície no talude natural regularizado é igual a 1,1 e o esquema da superfície aproximadamente igual à crítica é mostrado na Figura 6.10 abaixo.

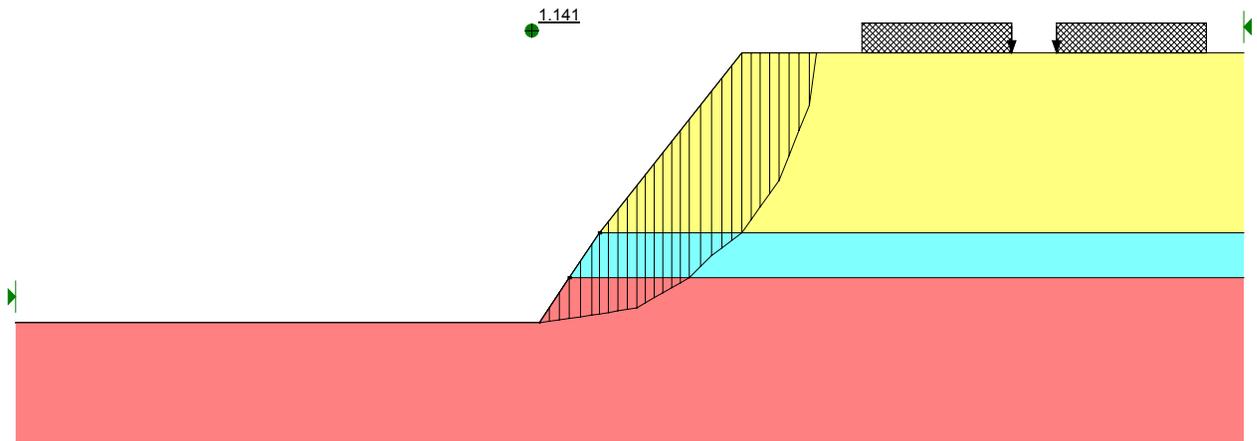


Figura 6.10: Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 9,0m, sem reforço.

A superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica é então traçada no talude com o reforço e está indicada na Figura 6.11.

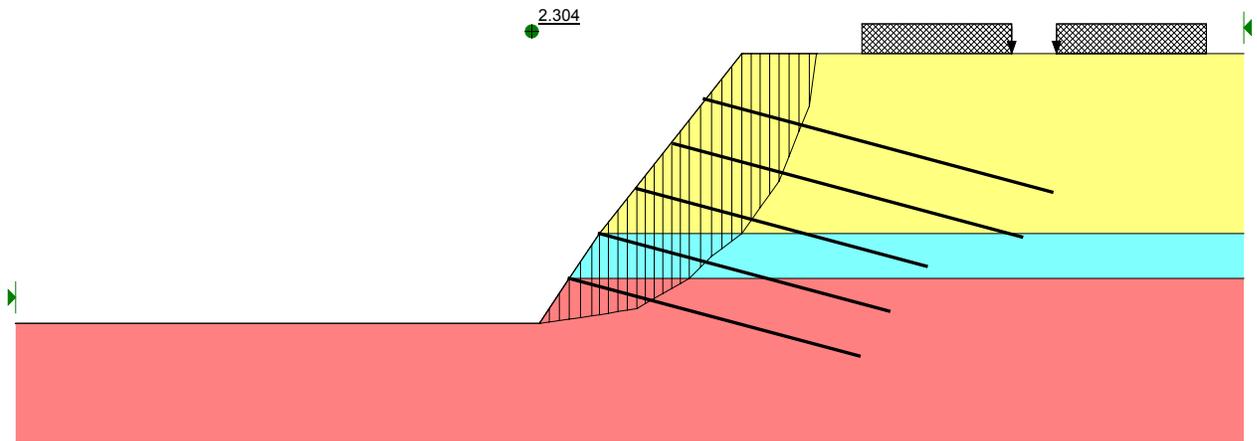


Figura 6.11: Configuração do talude de 9,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.

O Fator de segurança calculado para o esquema da Figura 6.11 foi de 2,3.

### 6.3.3 – Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 9,0m de altura

Para a verificação da estabilidade interna dos grampos, foi analisada a carga de solicitação e a resistência ao arrancamento para cada um dos grampos.

Logo, Resistência ao arrancamento > Carga de solicitação no grampo  
 $R_t > \text{Anchor Load (AL)}$

A resistência ao arrancamento ( $R_t$ ) do grampo foi calculada da seguinte forma:

$$R_t = A_{\text{cont}} \cdot \tau$$

Onde:

$R_t$  é a resistência ao arrancamento;

$A_{\text{cont}}$  é a área de contato entre o solo e a nata de concreto que recobre o grampo;

$\tau$  é a tensão de cisalhamento que atua no grampo na região de ancoragem à direita da superfície de ruptura.

A área de contato solo-concreto é dada por:

Perímetro do furo ( $U$ ) multiplicada pelo comprimento do grampo ( $l_e$ ) contado a partir da superfície de ruptura, até sua extremidade.

O diâmetro dos furos ( $d$ ) é o mesmo para todos os grampos, 4". Aproximadamente 10,0cm.

Calculo do perímetro do furo ( $U$ ):

$$U = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,3141\text{m}$$

A tensão de cisalhamento é igual à tensão vertical ( $\sigma_v$ ) média que atua no grampo, multiplicada pela tangente do ângulo de atrito do solo onde o grampo está ancorado.

$$\tau = \sigma_v \cdot \tan \phi$$

A tensão vertical ( $\sigma_v$ ) em cada grampo é calculada multiplicando-se a altura ( $z$ ) da camada de solo pelo peso específico ( $\gamma$ ).

Para o grampo “a” a carga de ancoragem é determinada através do diagrama de cargas na base da lamela de cada grampo como ilustra a Figura 6.12 para o grampo “a”.

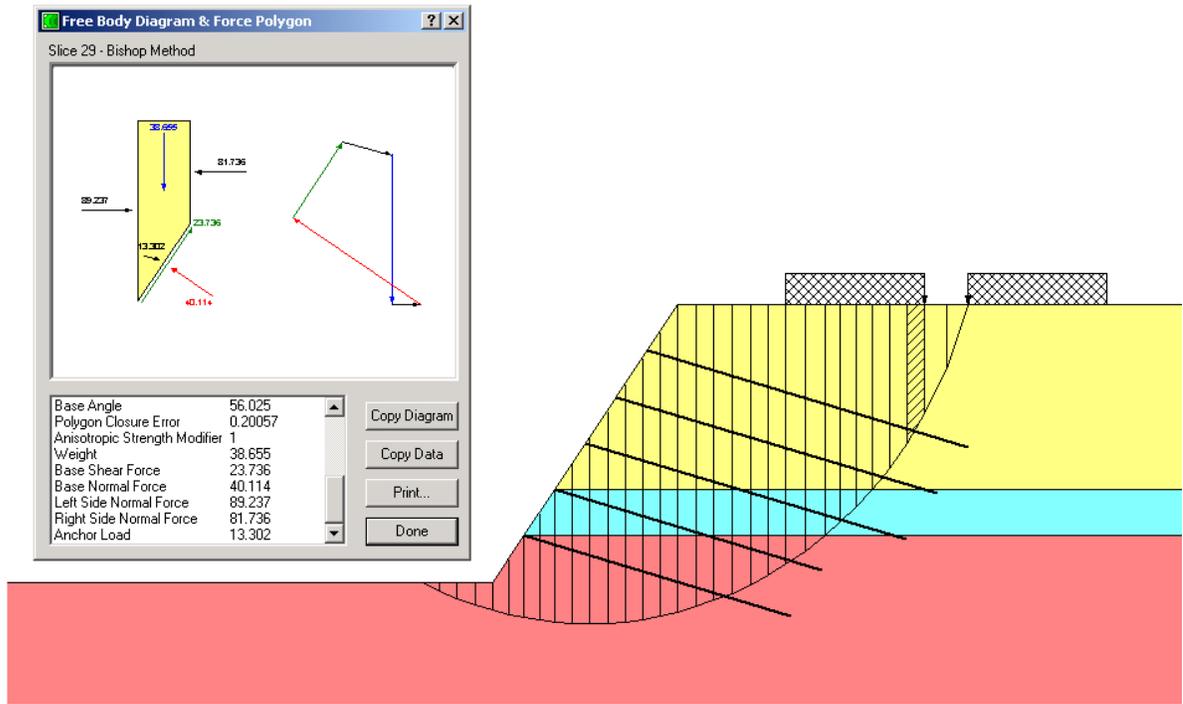


Figura 6.12: Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 9,0m.

Assim a Solicitação no grampo (AL) é igual a 13,302 kN.

O comprimento do grampo ( $l_e$ ), a partir da superfície de ruptura até sua extremidade, é calculado dividindo-se sua distância no eixo “x” pelo  $\cos 15^\circ$ , que é o ângulo de inclinação da barra. Para o grampo “a”, o comprimento será igual a 2,2m dividido por  $\cos 15^\circ$ . Logo,  $l_e = 2,30$  m.

O perímetro (U) é igual a 0,3141 m.

A tensão vertical ( $\sigma_v$ ) é igual a  $4,5 \cdot 15,68 = 70,56$  kN/m<sup>2</sup>

A Resistência ao arrancamento do grampo “a” será:

$$R_t = l_e \cdot U \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi = 2,30 \cdot 0,3141 \cdot 70,56 \cdot \tan 32,16 = 32,050 \text{ kN}$$

As Figuras 6.13 a 6.16 apresentam as configurações para os grampos “b”, “c”, “d” e “e”.

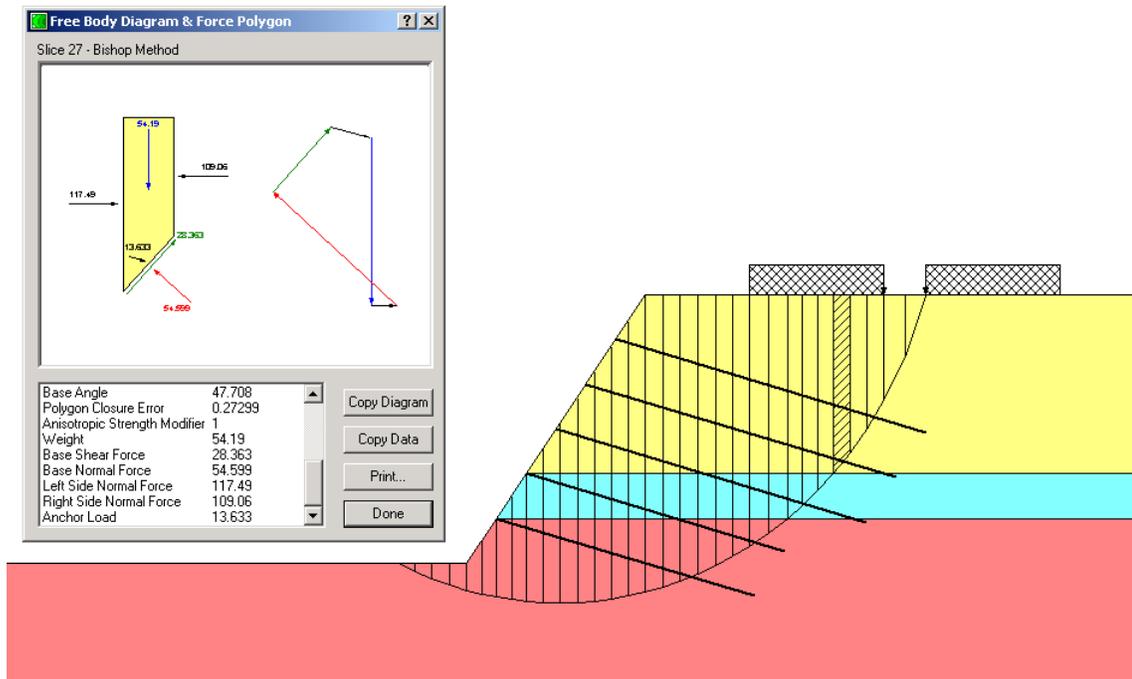


Figura 6.13: Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 9,0m.

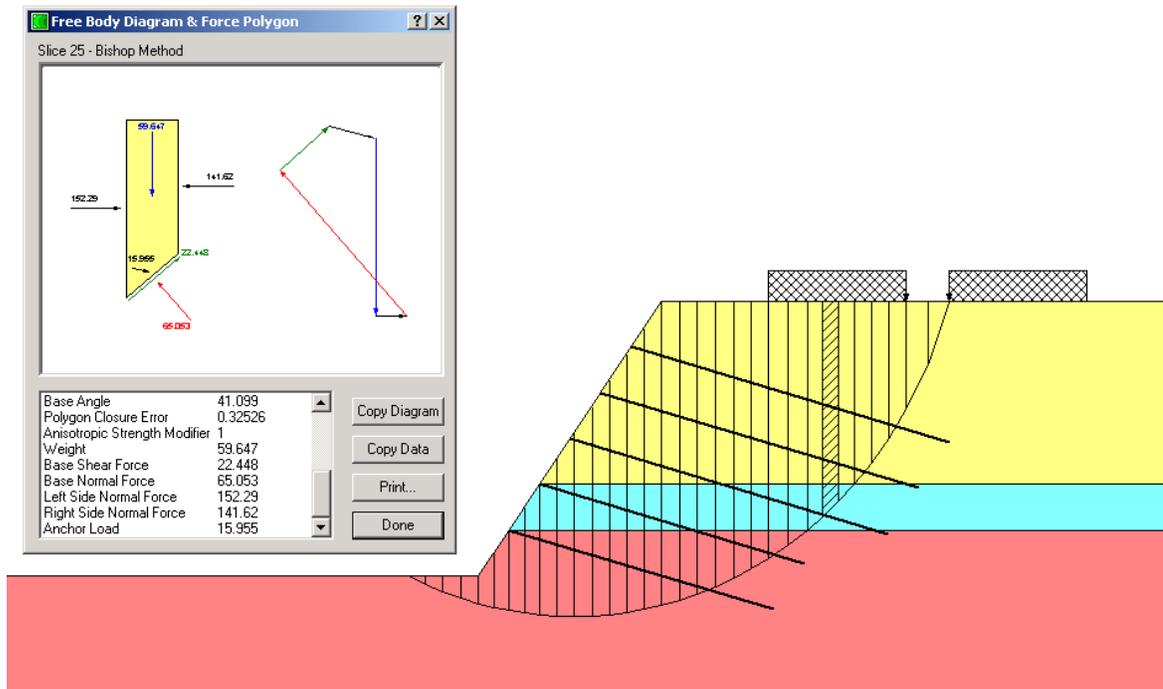


Figura 6.14: Indicação da carga de ancoragem do grampo “c”, para seção de 9,0m.

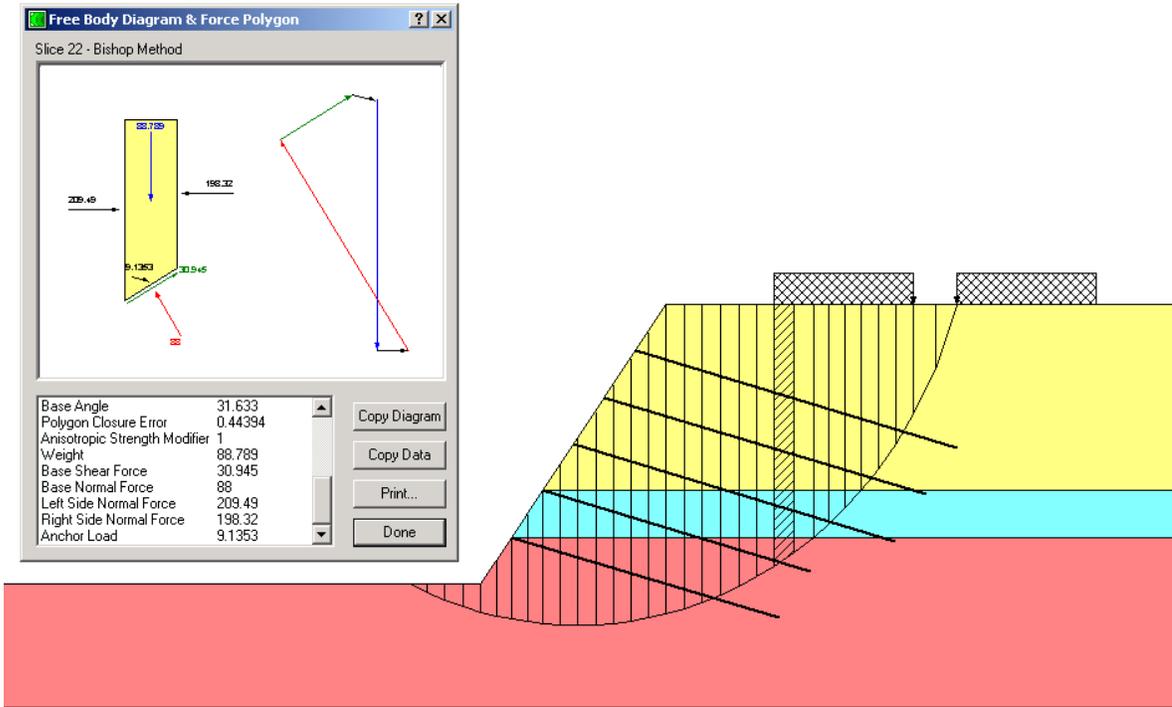


Figura 6.15: Indicação da carga de ancoragem do grampo “d”, para seção de 9,0m.

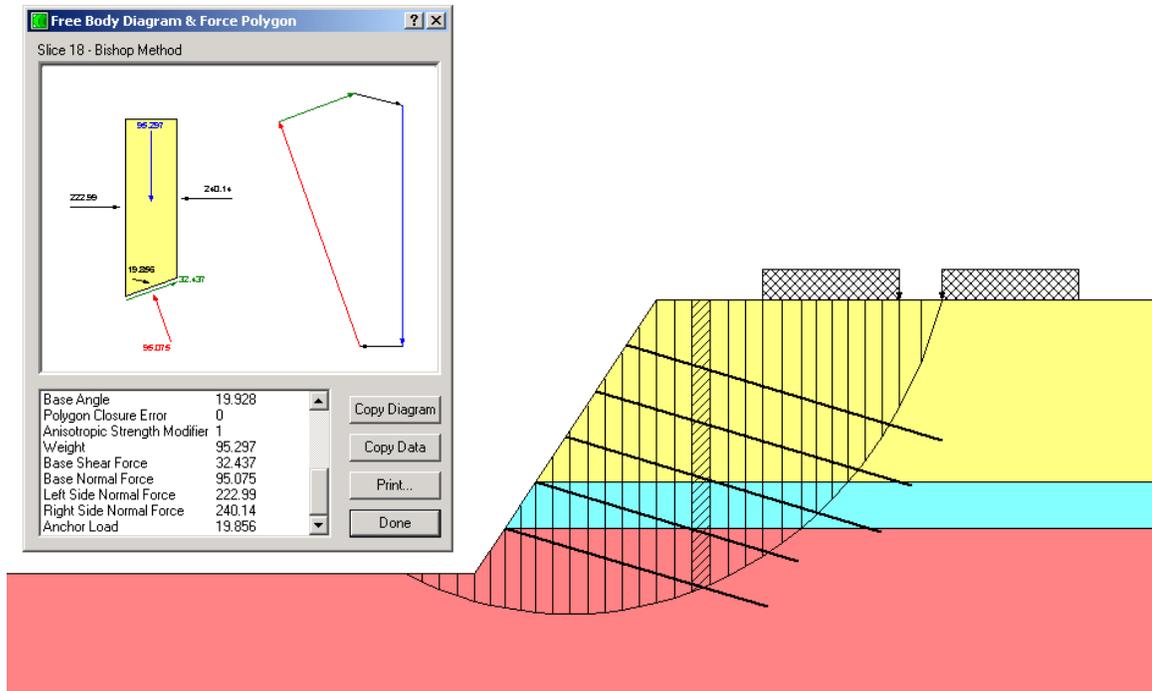


Figura 6.16: Indicação da carga de ancoragem do grampo “e”, para seção de 9,0m.

A tabela 6.4 apresenta o resumo do cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento de todos os grampos para a seção de 9,0 metros de altura.

Grupo	Solicitação (A.I.)	Resistência (Rt)	F. S.
a	13,30	32,05	2,4
b	13,63	40,41	3,0
c	15,96	28,09	1,8
d	9,135	21,61	2,4
e	19,86	51,10	2,6

Tabela 6.4: Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 9,0m.

## 6.4 - Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 8,0m de altura

### 6.4.1 - Estabilidade global

A configuração do talude com terreno natural para seção de 8,0m está indicada no Figura 6.17 abaixo.

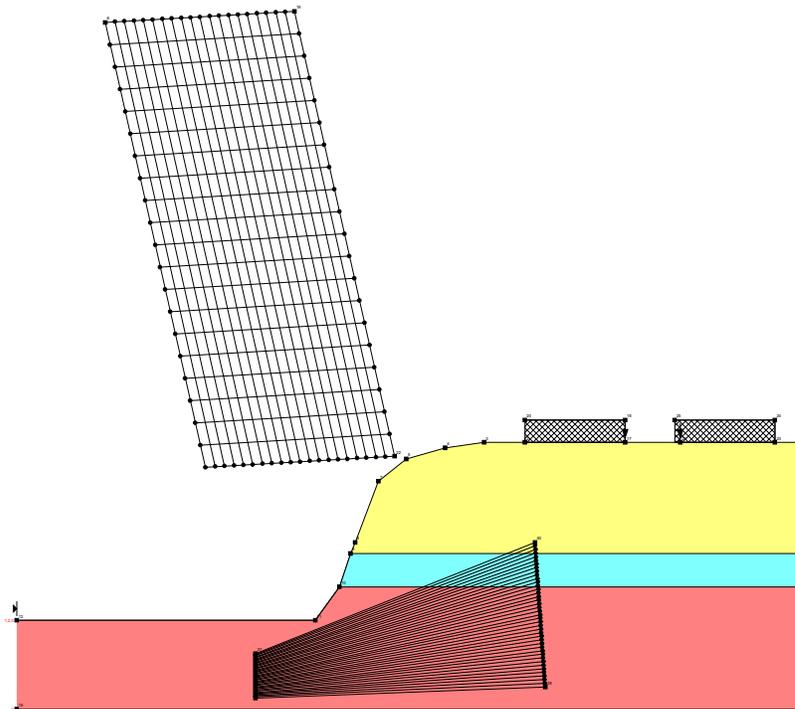


Figura 6.17: Configuração do talude de 8,0m natural, sem reforço.

A Figura 6.18 mostra a superfície de ruptura crítica para o talude em questão. O Fator de Segurança calculado é igual a 1,1.

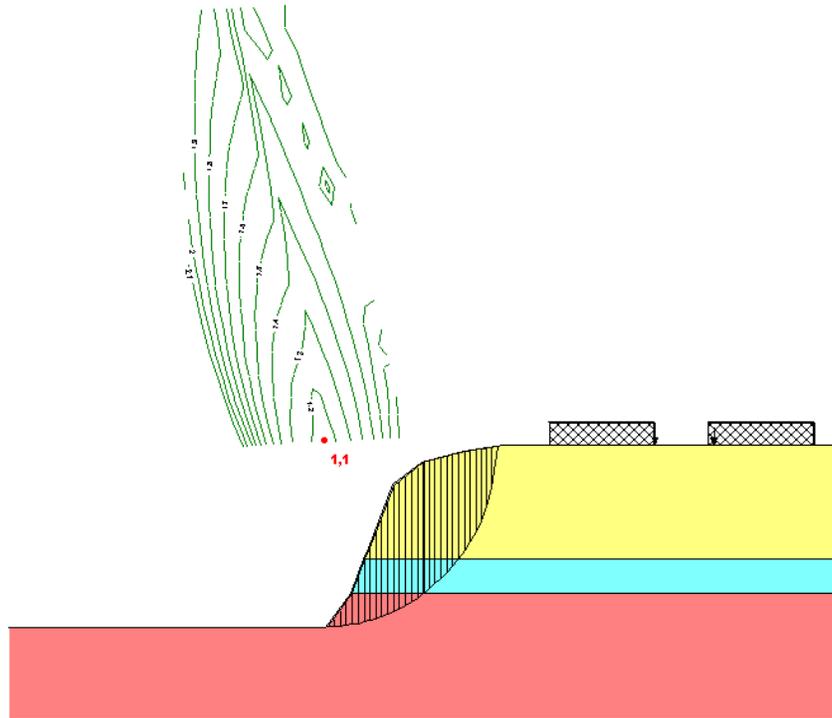


Figura 6.18: Superfície de ruptura crítica para seção de 8,0m natural.

A configuração do talude com a face regularizada está indicada na Figura 6.19.

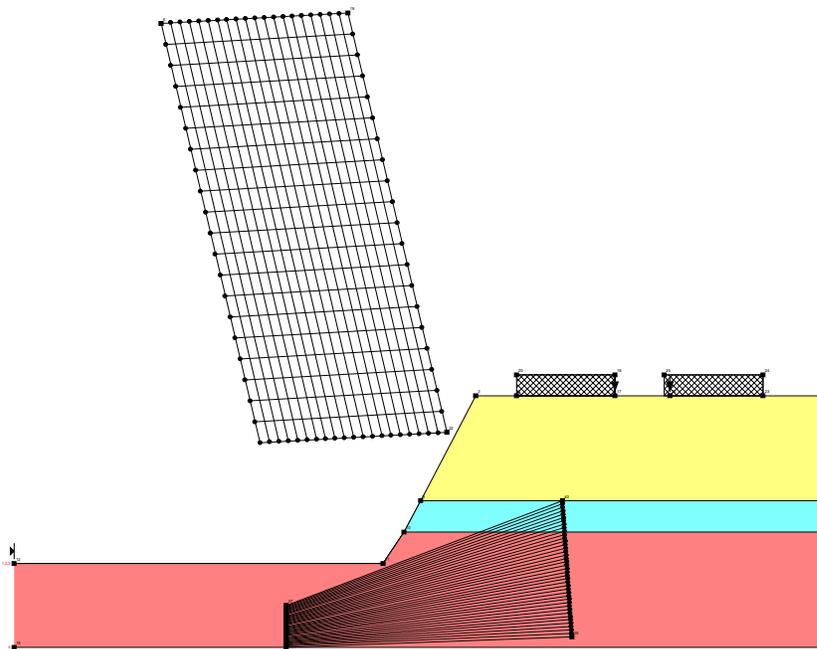


Figura 6.19: Configuração do talude com 8,0m regularizado sem reforço.

O fator de segurança para a superfície regularizada é de 1,0 , e a superfície de ruptura crítica está indicada na Figura 6.20.

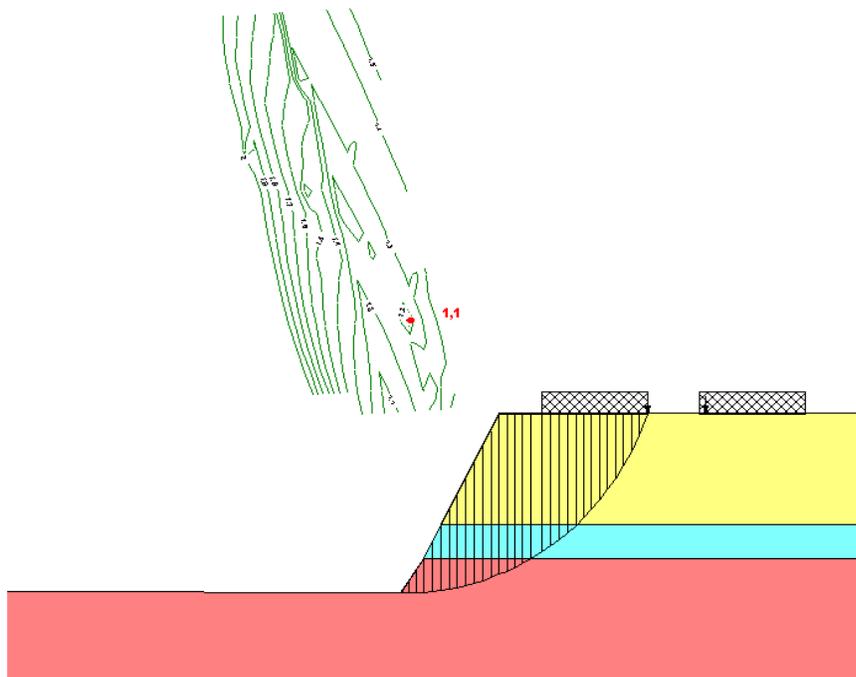


Figura 6.20: Superfície de ruptura crítica do talude com 8,0m regularizado sem reforço.

Para o reforço do talude com seção de 8,0m, a configuração dos grampos é a mesma utilizada para a seção de 9,0m, e está indicada na Figura 6.21 abaixo.

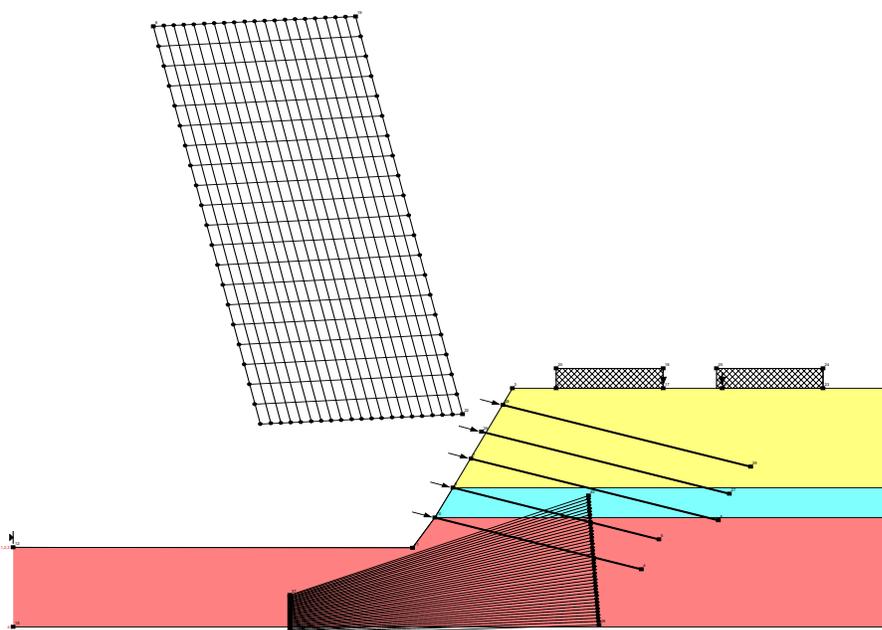


Figura 6.21: Configuração do talude regularizado de 8,0m com reforço.

O Fator de Segurança obtido com a aplicação do reforço foi de 1,6, e a verificação da superfície de ruptura está indicada na Figura 6.22.

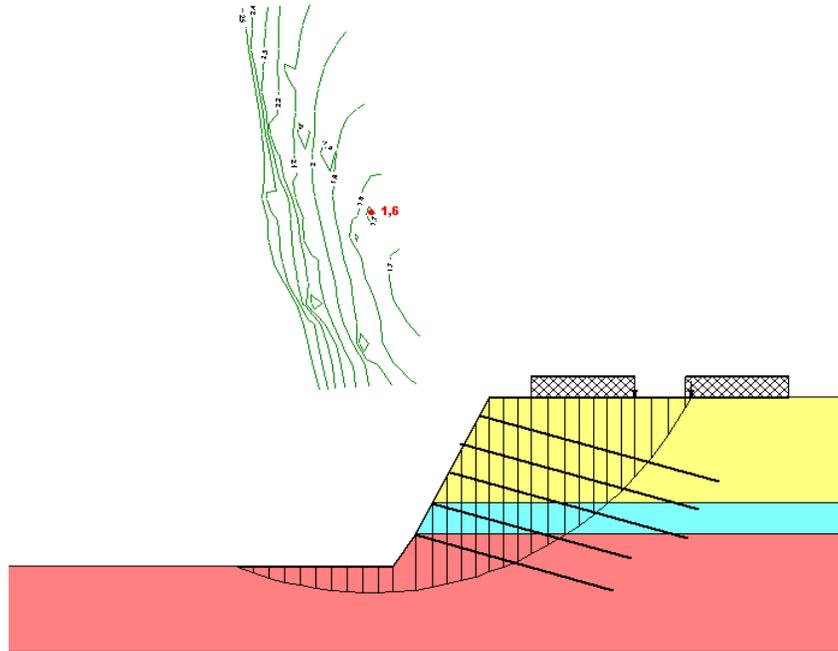


Figura 6.22: Superfície de ruptura crítica para seção de 8,0m, com reforço.

#### 6.4.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural

O Fator de Segurança para a superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica do talude natural regularizado é igual a 1,0, e o esquema dessa superfície crítica é mostrado na Figura 6.23 abaixo.

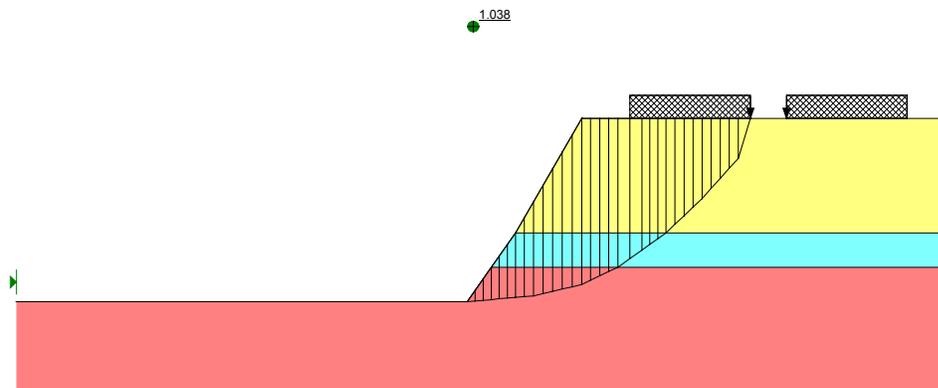


Figura 6.23: Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 8,0m, sem reforço.

A superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica é então traçada no talude com o reforço e está indicada na Figura 6.24.

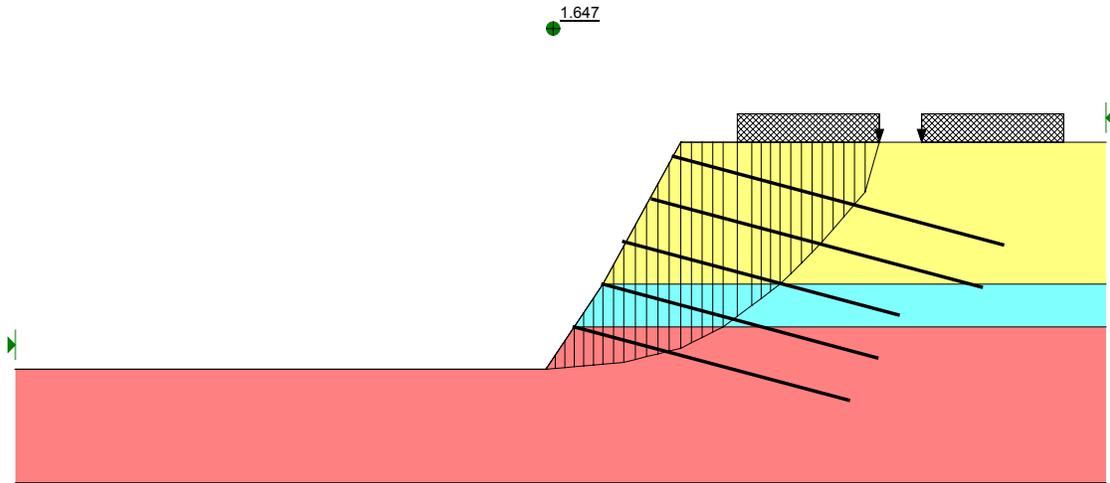


Figura 6.24: Configuração do talude de 8,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.

O Fator de segurança calculado para o esquema da Figura 6.24 foi de 1,6.

### 6.4.3 – Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 8,0m de altura

Para a verificação da estabilidade interna dos grampos, é analisada a carga de solicitação e a resistência ao arrancamento para cada um dos grampos.

Os cálculos para cada grampo foram feitos analogamente à seção de 9,0m.

Logo,  $\text{Resistência ao arrancamento} > \text{Carga de solicitação no grampo}$   
 $R_t > \text{Anchor Load (AL)}$

As Figuras 6.25 a 6.29 apresentam as configurações para os grampos “a”, “b”, “c”, “d” e “e”.

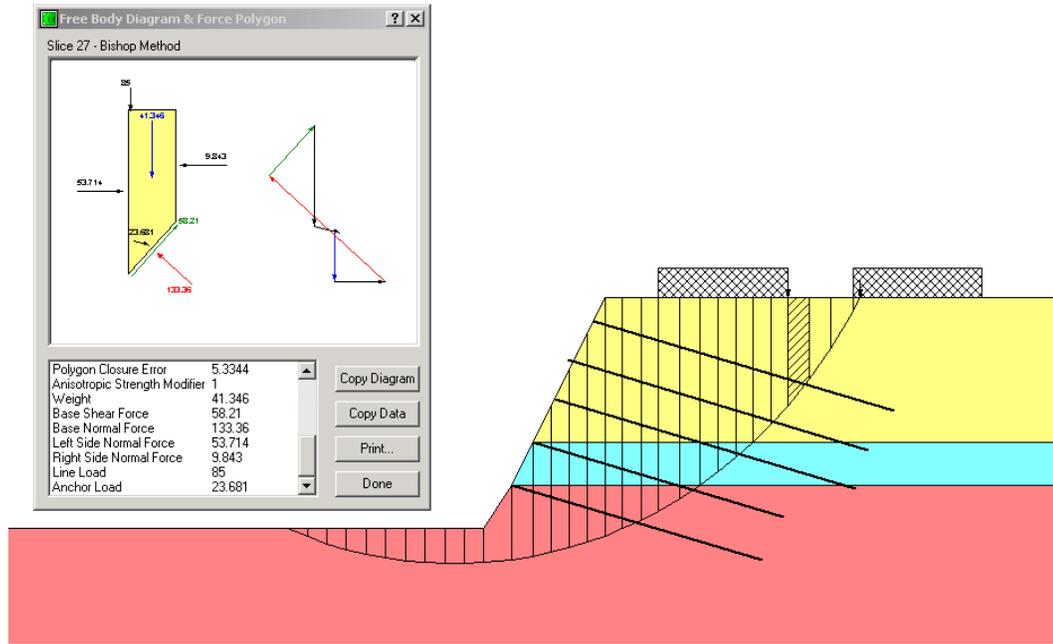


Figura 6.25: Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 8,0m.

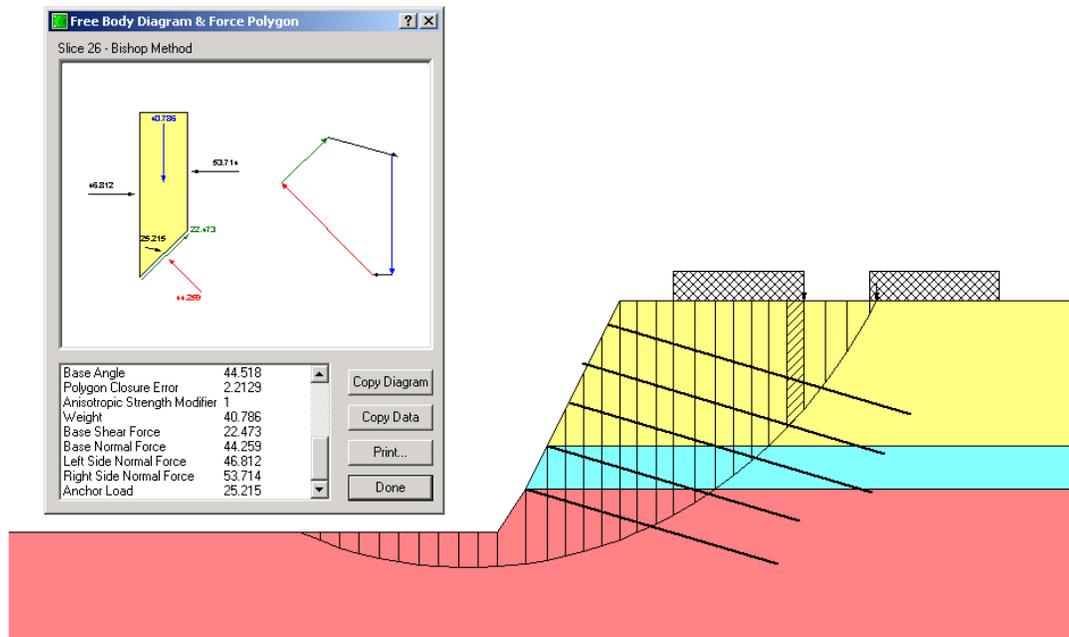


Figura 6.26: Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 8,0m.

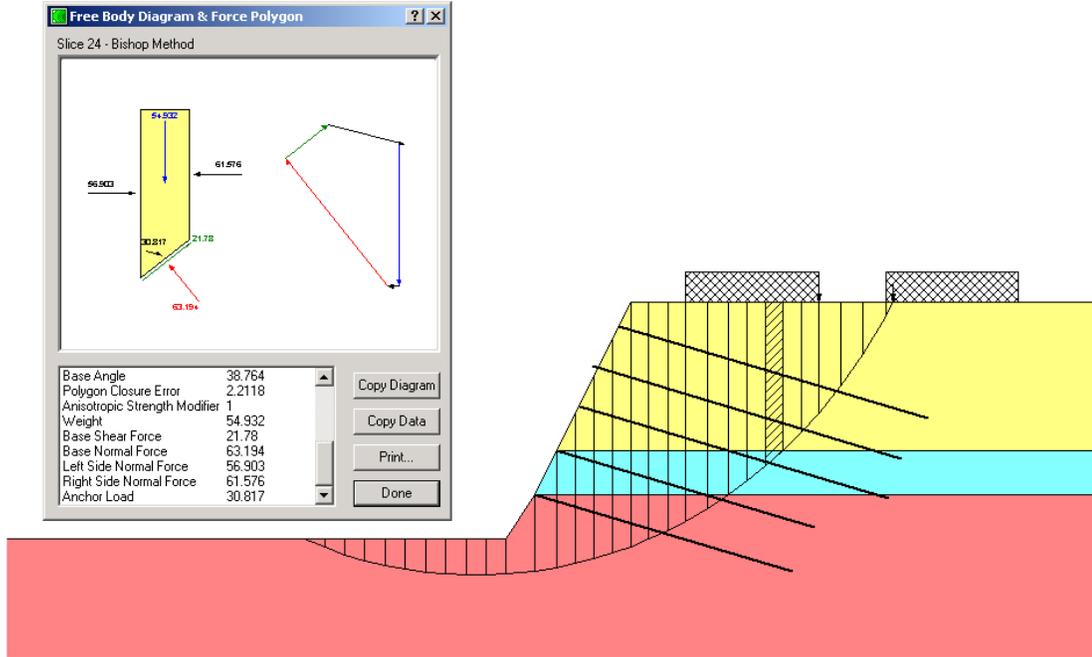


Figura 6.27: Indicação da carga de ancoragem do grampo “c”, para seção de 8,0m.

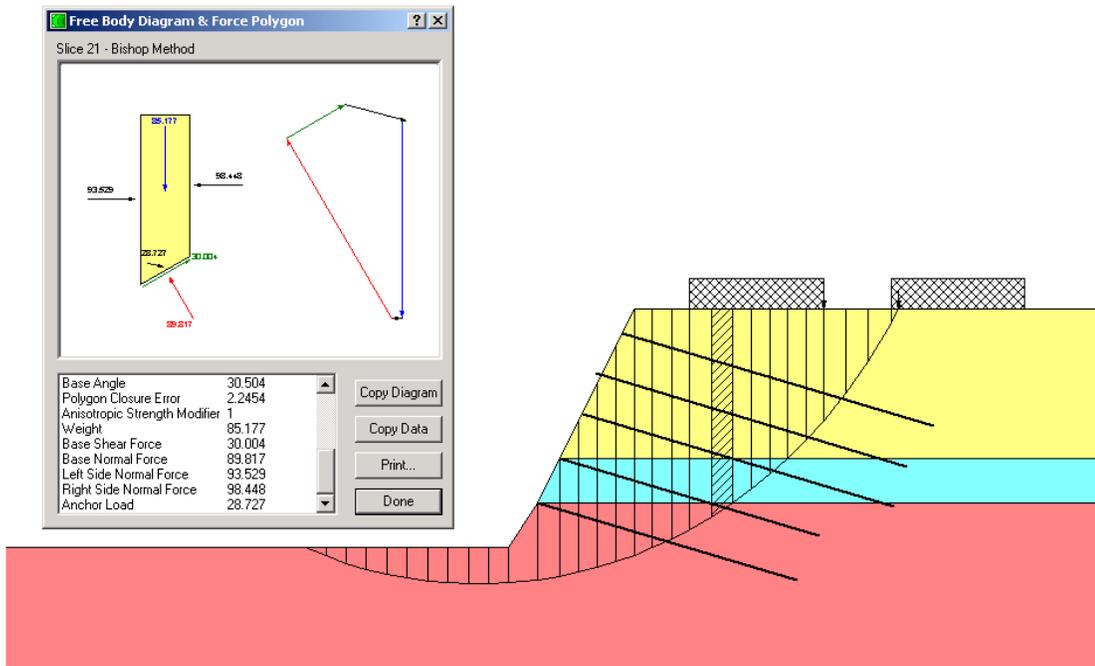


Figura 6.28: Indicação da carga de ancoragem do grampo “d”, para seção de 8,0m.

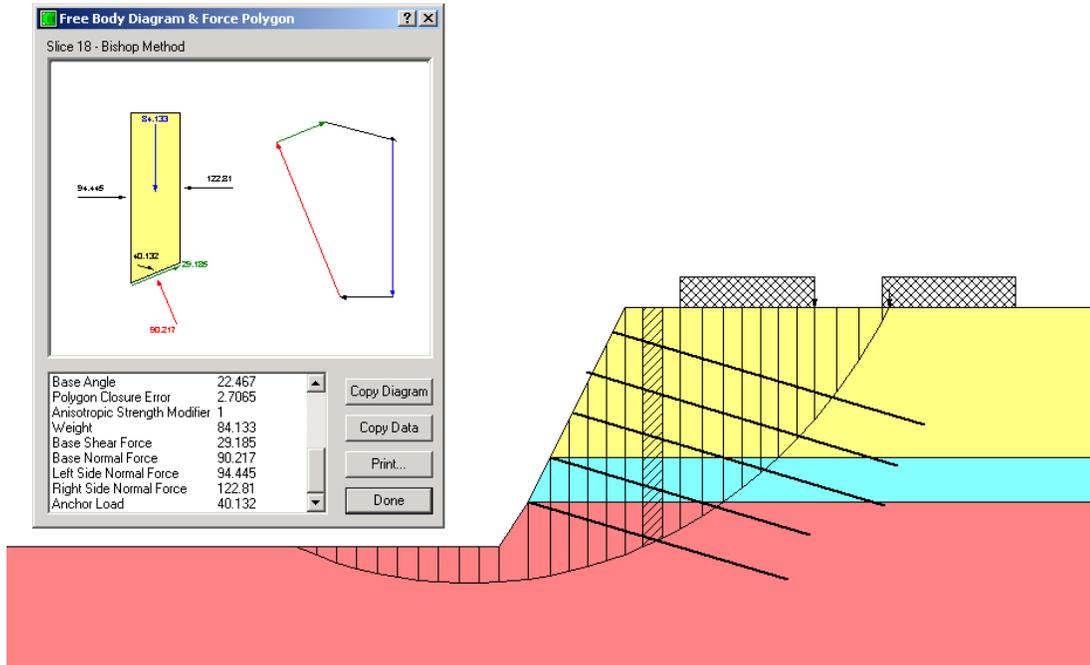


Figura 6.29: Indicação da carga de ancoragem do grampo “e”, para seção de 8,0m.

A tabela 6.5 apresenta o resumo do cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento de todos os grampos para a seção de 8,0 metros de altura.

Grampo	Solicitação (A.I.)	Resistência (Rt)	F. S.
a	23,68	39,24	1,7
b	25,22	57,07	2,3
c	30,82	47,62	1,5
d	28,73	60,82	2,1
e	40,13	96,33	2,4

Tabela 6.5: Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 8,0m.

## 6.5 – Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 6,0m de altura

### 6.5.1 - Estabilidade global

A configuração do talude com terreno natural para seção de 6,0m está indicada na Figura 6.30 abaixo.

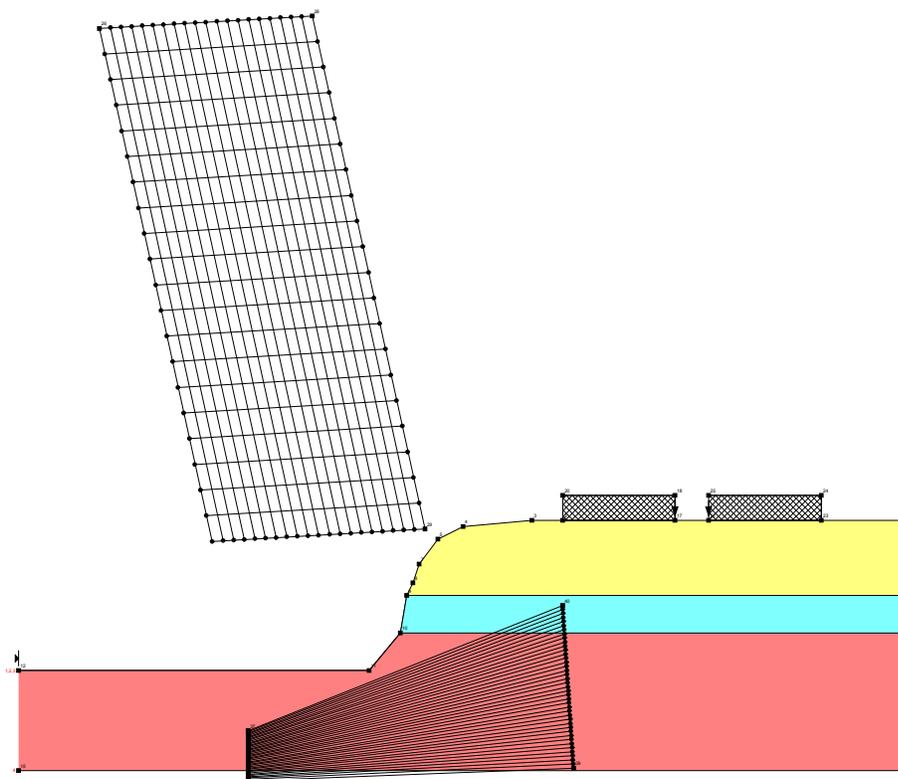


Figura 6.30: Configuração do talude de 6,0m natural, sem reforço.

A Figura 6.31 mostra a superfície de ruptura crítica para o talude em questão. O Fator de Segurança calculado é igual a 1,3.

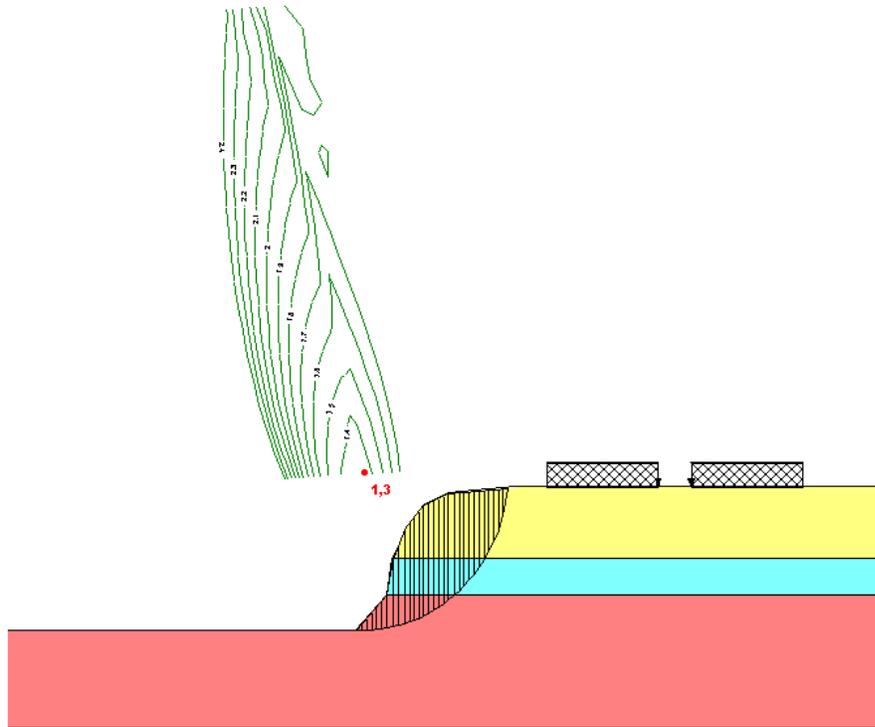


Figura 6.31: Superfície de ruptura crítica para seção de 6,0m natural.

A configuração do talude com a face regularizada está indicada na Figura 6.32.

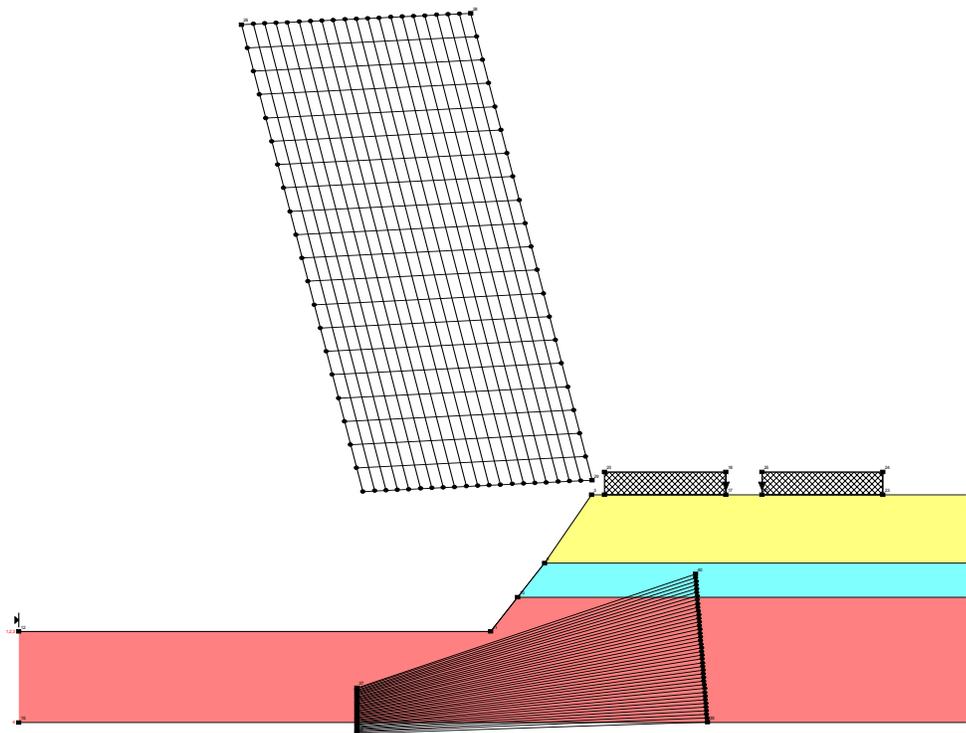


Figura 6.32: Configuração do talude com 6,0m regularizado sem reforço.

O fator de segurança para a superfície regularizada é de 1,3, e a superfície de ruptura crítica está indicada na Figura 6.33.

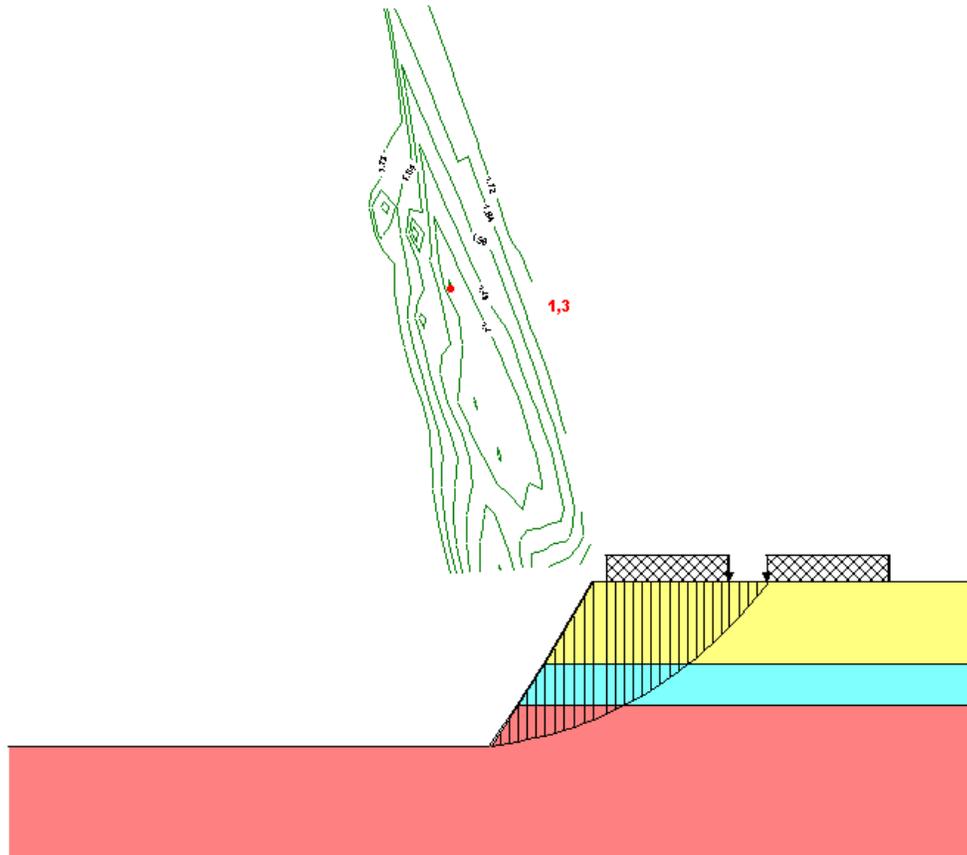


Figura 6.33: Superfície de ruptura crítica do talude com 6,0m regularizado sem reforço.

Para o reforço do talude com seção de 6,0m, a configuração dos grampos de cima para baixo, na vertical, terá o primeiro grampo com 12,0m de comprimento, e os dois grampos de baixo com 10,0 metros cada, conforme ilustrado na Figura 6.34.

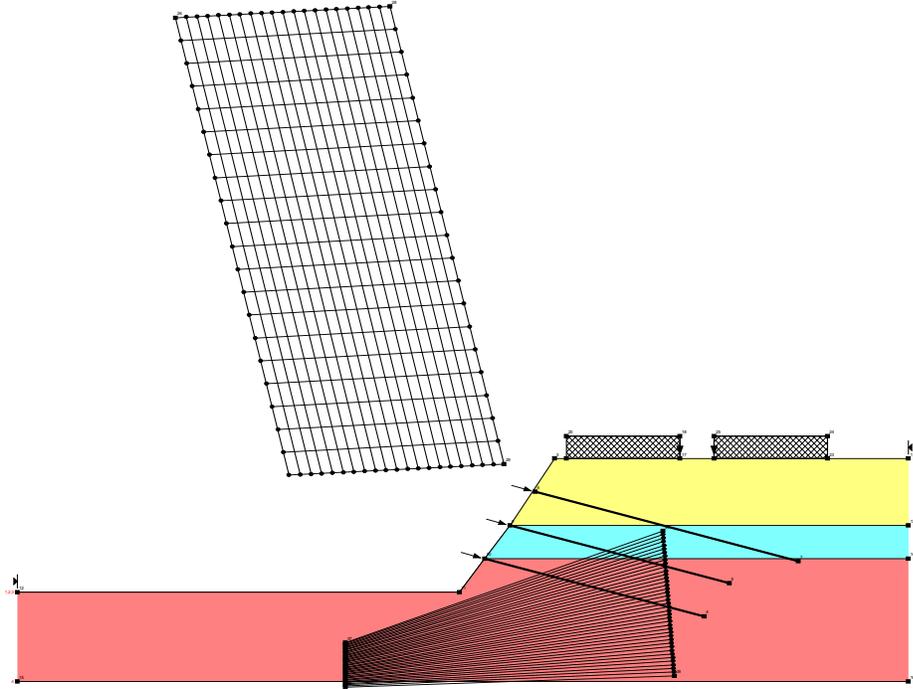


Figura 6.34: Configuração do talude regularizado de 6,0m com reforço.

O Fator de Segurança obtido com a aplicação do reforço foi de 1,7, e a verificação da superfície de ruptura está indicada na Figura 6.35.

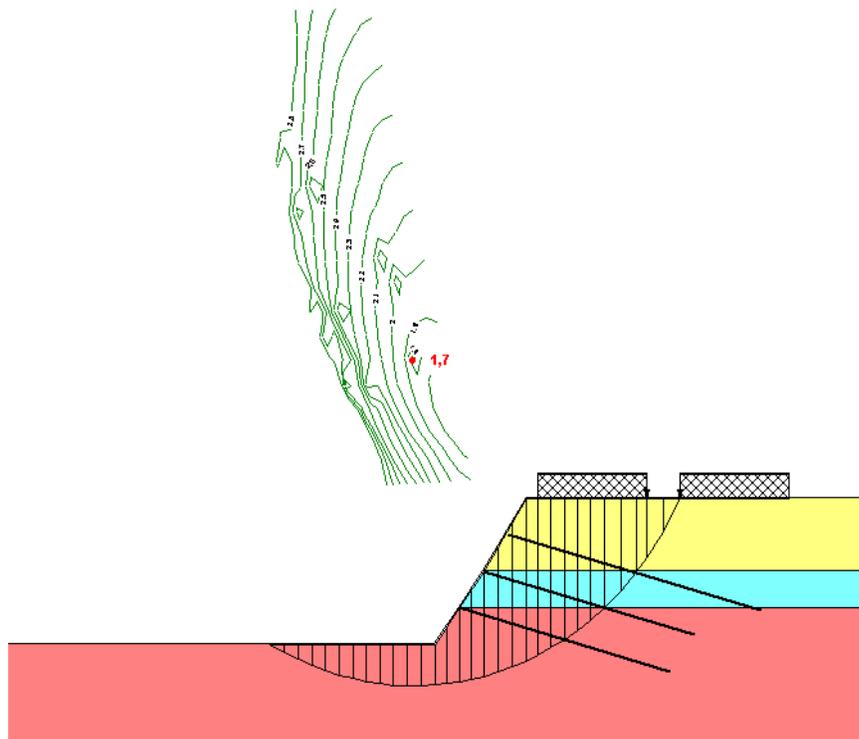


Figura 6.35: Superfície de ruptura crítica para seção de 6,0m, com reforço.

### 6.5.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural

O Fator de Segurança para a superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica do talude natural regularizado é igual a 1,5, e o esquema dessa superfície crítica é mostrado na Figura 6.36 abaixo.

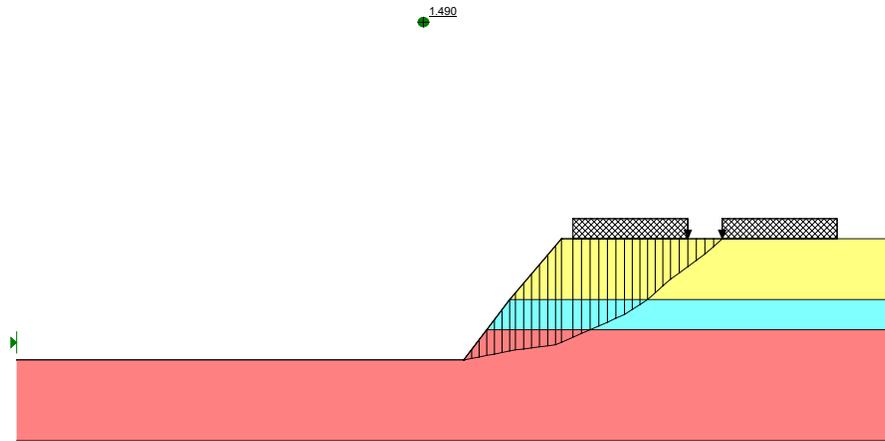


Figura 6.36: Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 6,0m, sem reforço.

A superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica é então traçada no talude com o reforço e está indicada na Figura 6.37.

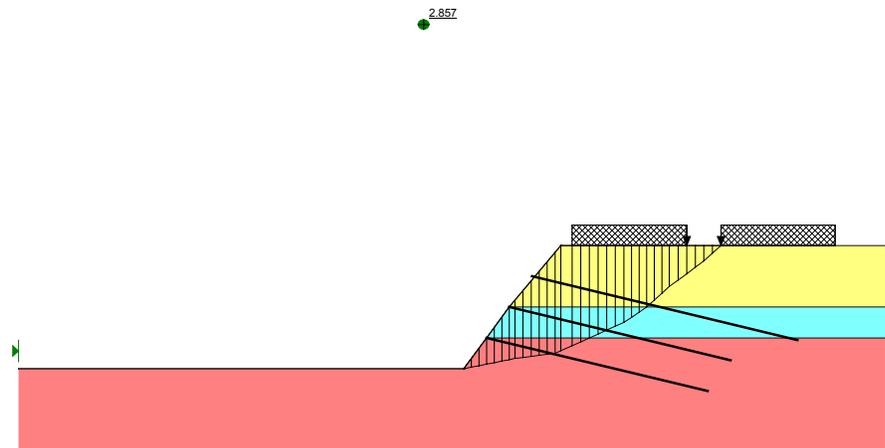


Figura 6.37: Configuração do talude de 6,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.

O Fator de segurança calculado para o esquema da Figura 6.37 foi de 2,9.

### 6.5.3 – Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 6,0m de altura

Para a verificação da estabilidade interna dos grampos, é analisada a carga de solicitação e a resistência ao arrancamento para cada um dos grampos.

Os cálculos para cada grampo foram feitos analogamente à seção de 9,0m.

Logo, Resistência ao arrancamento > Carga de solicitação no grampo  
 $R_t > \text{Anchor Load (AL)}$

As Figuras 6.38 a 6.40 apresentam as configurações para os grampos “a”, “b”, e “c”.

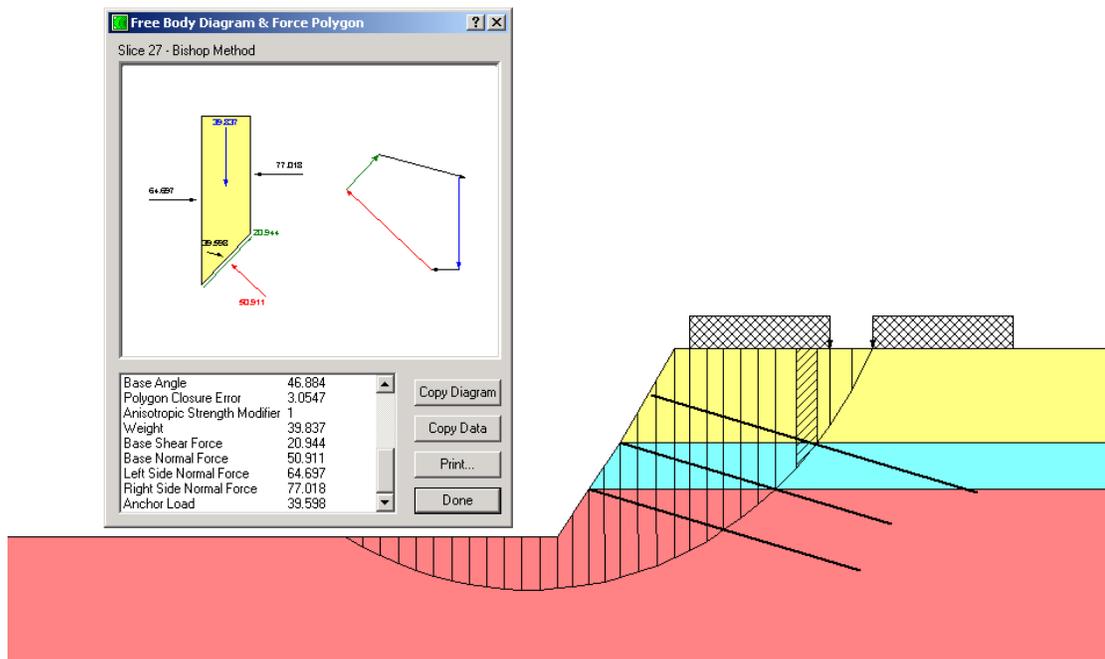


Figura 6.38: Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 6,0m.

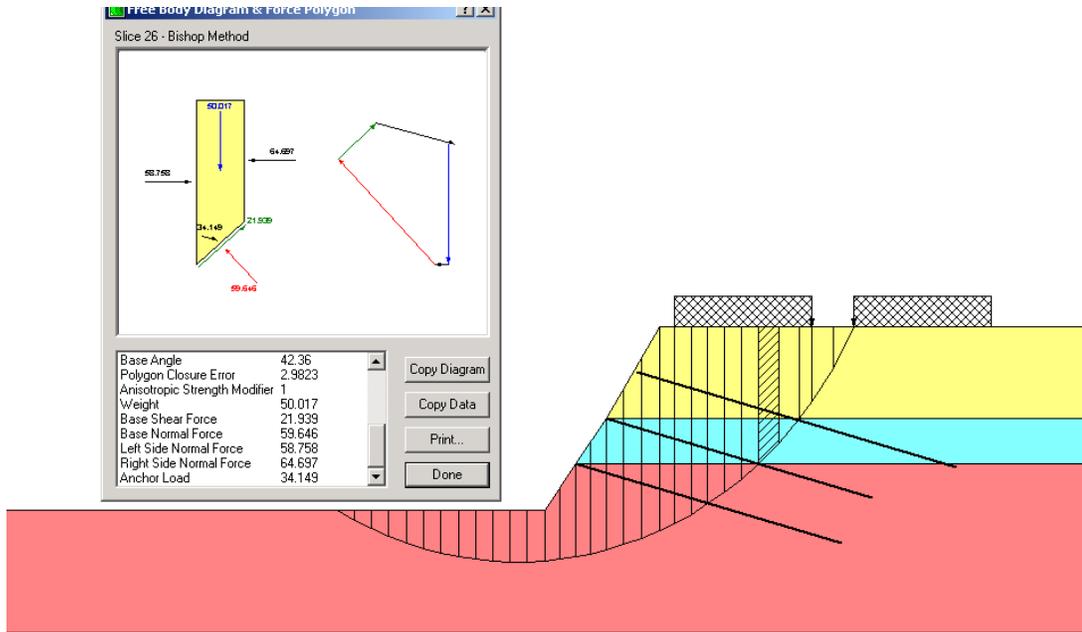


Figura 6.39: Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 6,0m.

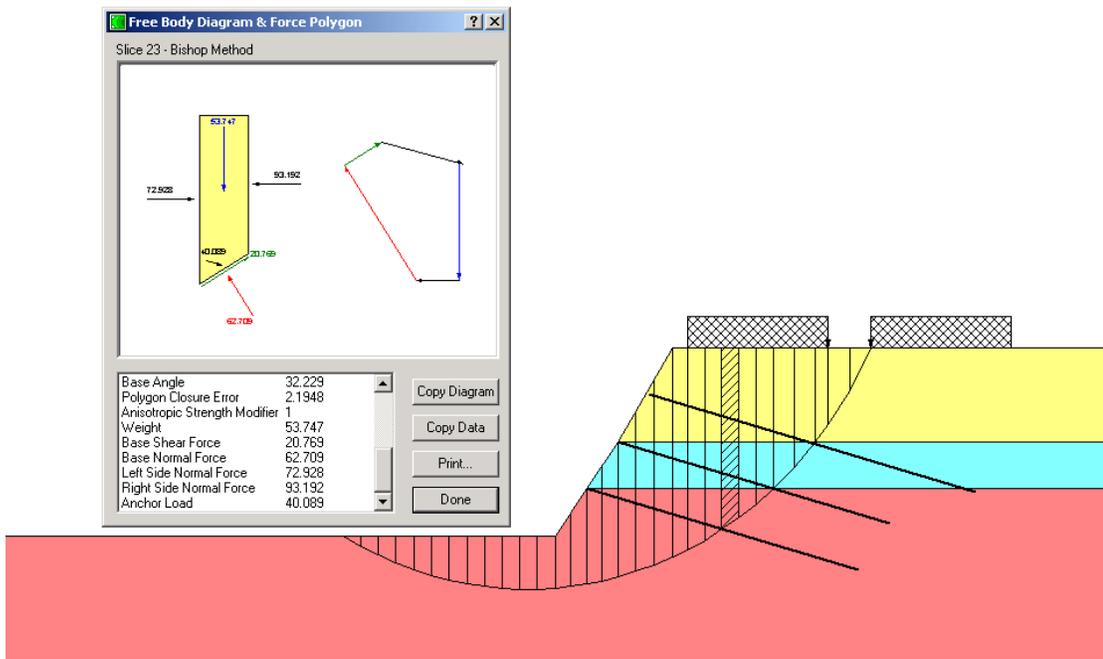


Figura 6.40: Indicação da carga de ancoragem do grampo “c”, para seção de 6,0m.

A tabela 6.6 apresenta o resumo do cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento de todos os grampos para a seção de 6,0 metros de altura.

Grupo	Solicitação (A.I.)	Resistência (Rt)	F. S.
a	39,59	40,61	1,0
b	34,15	50,97	1,5
c	40,01	73,49	1,8

Tabela 6.6: Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 6,0m.

## 6.6 – Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 4,0m de altura

### 6.6.1 - Estabilidade global

A configuração do talude com terreno natural para seção de 4,0m está indicada no Figura 6.41 abaixo.

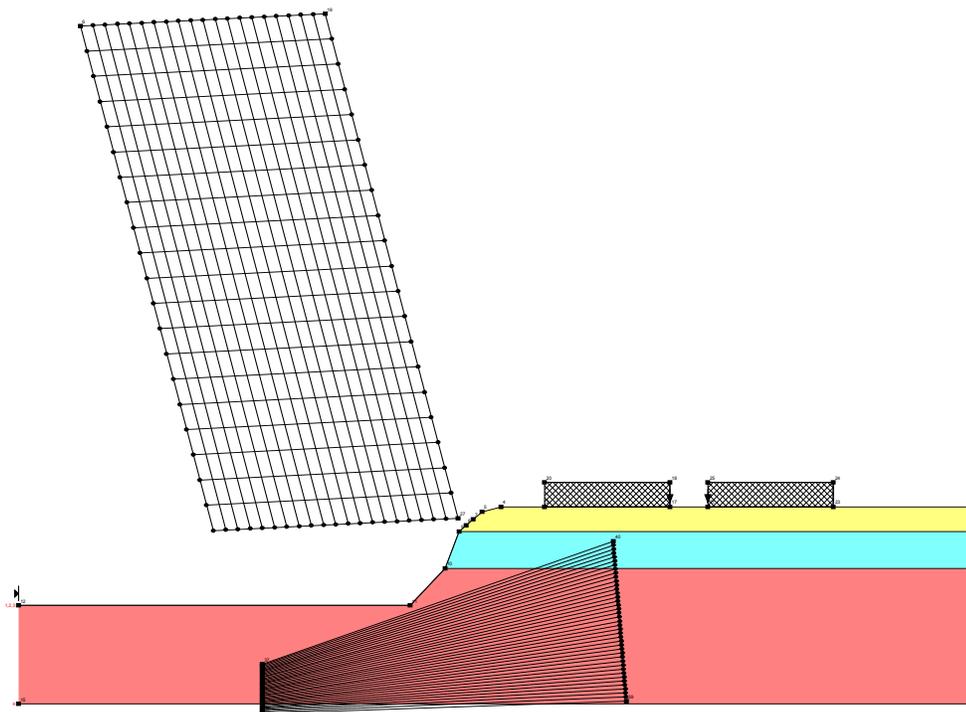


Figura 6.41: Configuração do talude de 4,0m natural, sem reforço.

A Figura 6.42 mostra a superfície de ruptura crítica para o talude em questão. O Fator de Segurança calculado é igual a 1,6.

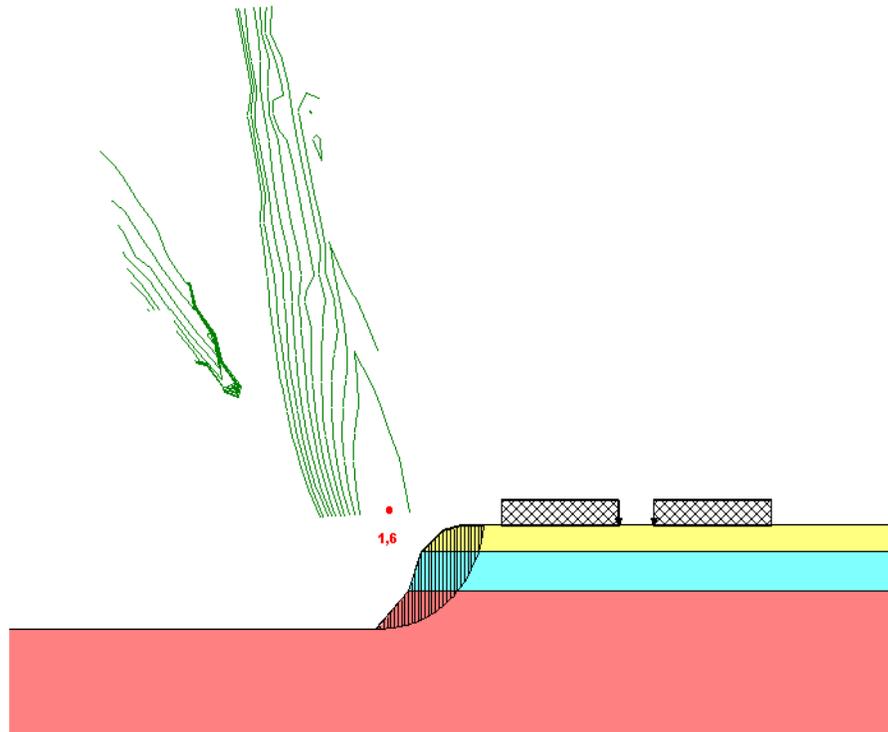


Figura 6.42: Superfície de ruptura crítica para seção de 4,0m natural.

A configuração do talude com a face regularizada está indicada na Figura 6.43.

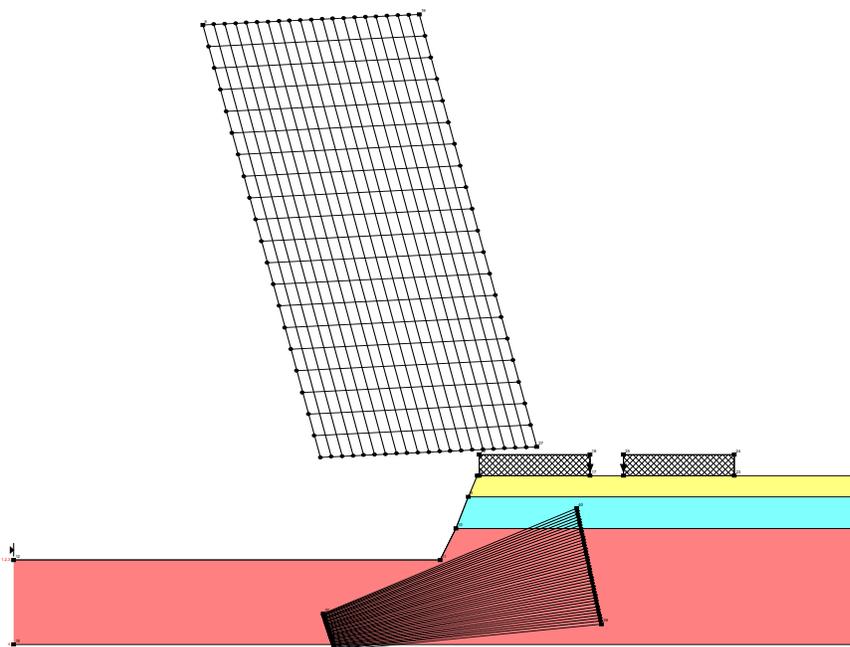


Figura 6.43 Configuração do talude com 4,0m regularizado sem reforço.

O fator de segurança para a superfície regularizada é de 1,3, e a superfície de ruptura crítica está indicada na Figura 6.44.

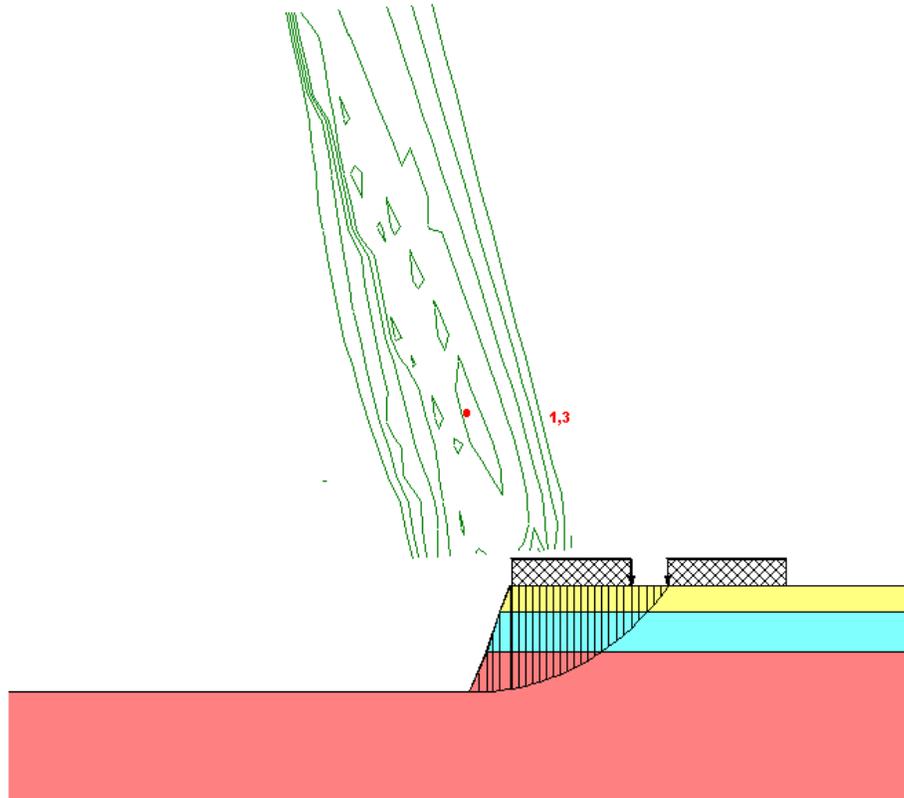


Figura 6.44: Superfície de ruptura crítica do talude com 4,0m regularizado sem reforço.

Primeiramente, para o reforço do talude com seção de 4,0m, a configuração dos grampos de cima para baixo, na vertical, era com o primeiro e o segundo grampo com 10,0m de comprimento, conforme ilustrado na Figura 6.45. Porém no cálculo de resistência ao arrancamento, essa configuração se mostrou insuficiente e será alterada como será demonstrado posteriormente.

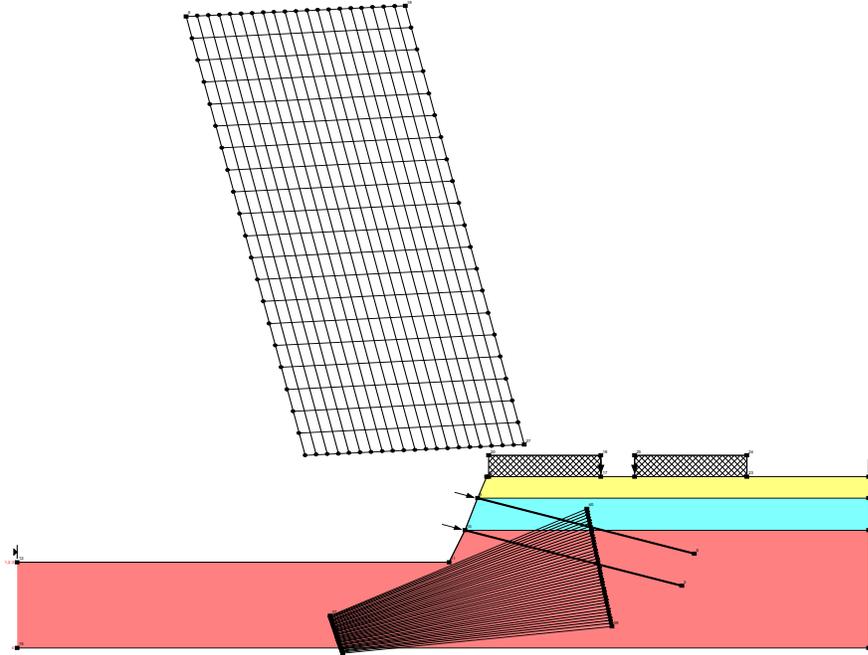


Figura 6.45: Configuração do talude regularizado de 4,0m com reforço insuficiente.

O Fator de Segurança obtido com a aplicação do reforço foi de 1,6, e a verificação da superfície de ruptura está indicada na Figura 6.46.

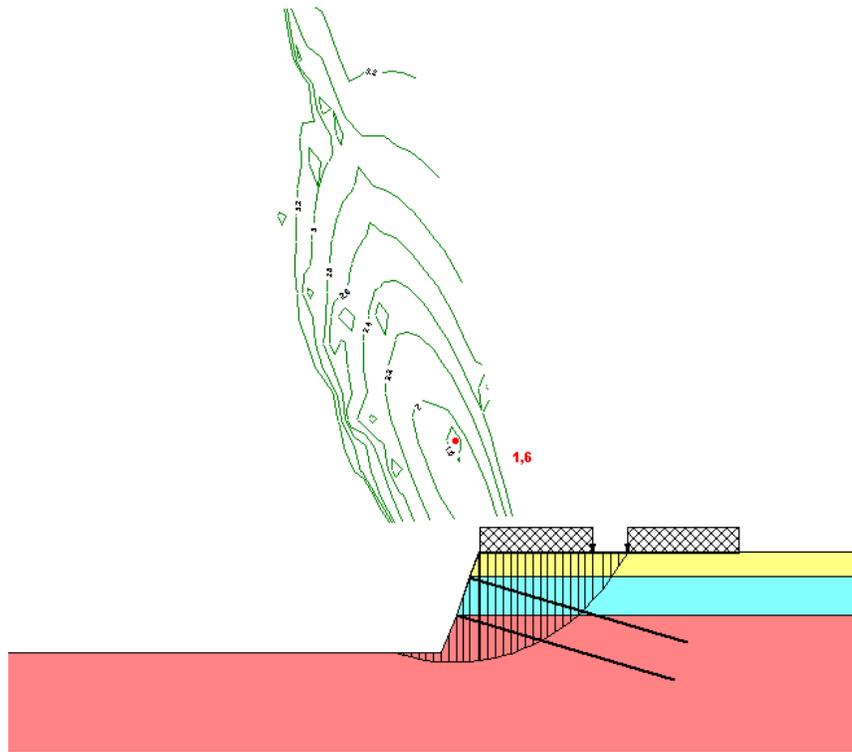


Figura 6.46: Superfície de ruptura crítica para seção de 4,0m, com reforço.

### 6.6.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural

O Fator de Segurança para a superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica do talude natural regularizado é igual a 1,6, e o esquema dessa superfície crítica é mostrado na Figura 6.47 abaixo.

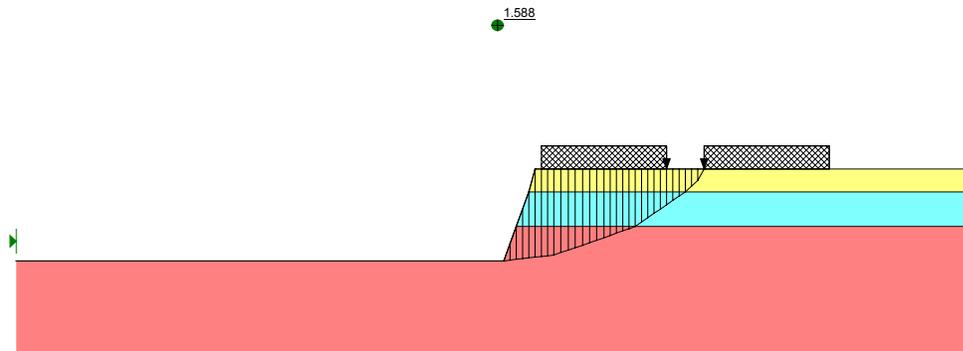


Figura 6.47: Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 4,0m, sem reforço.

A superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica é então traçada no talude com o reforço e está indicada na Figura 6.48. O reforço utilizado nesta análise tem o grampo superior com 12,0m e o inferior com 10,0m de comprimento. Esta diferença em relação à padronização feita até então é devido à configuração anterior não ter atendido as solicitações da análise da resistência ao arrancamento, que será demonstrada nas páginas a seguir.

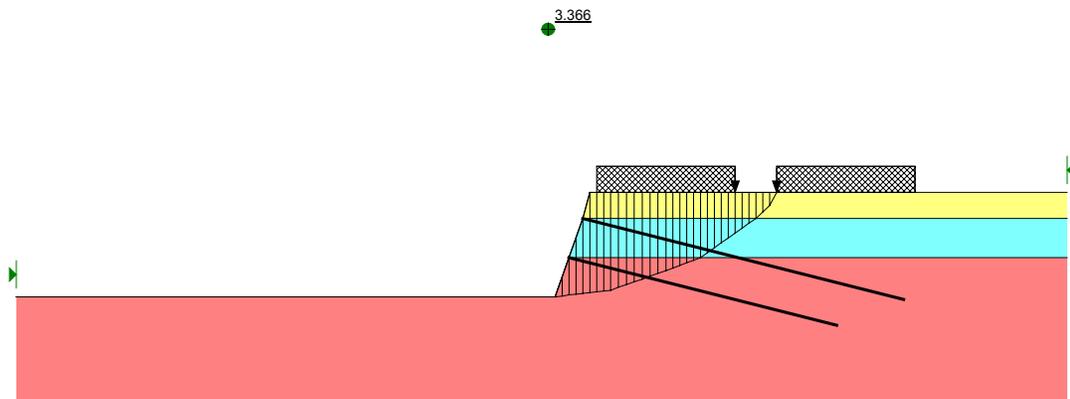


Figura 6.48: Configuração do talude de 4,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.

O Fator de segurança calculado para o esquema da Figura 6.48 foi de 3,4.

### 6.6.3 – Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 4,0m de altura

Para a verificação da estabilidade interna dos grampos, é analisada a carga de solicitação e a resistência ao arrancamento para cada um dos grampos.

Os cálculos para cada grampo foram feitos analogamente à seção de 9,0m.

Logo,  $\text{Resistência ao arrancamento} > \text{Carga de solicitação no grampo}$   
 $R_t > \text{Anchor Load (AL)}$

As Figuras 6.49 a 6.50 apresentam as configurações para os grampos “a” e “b”.

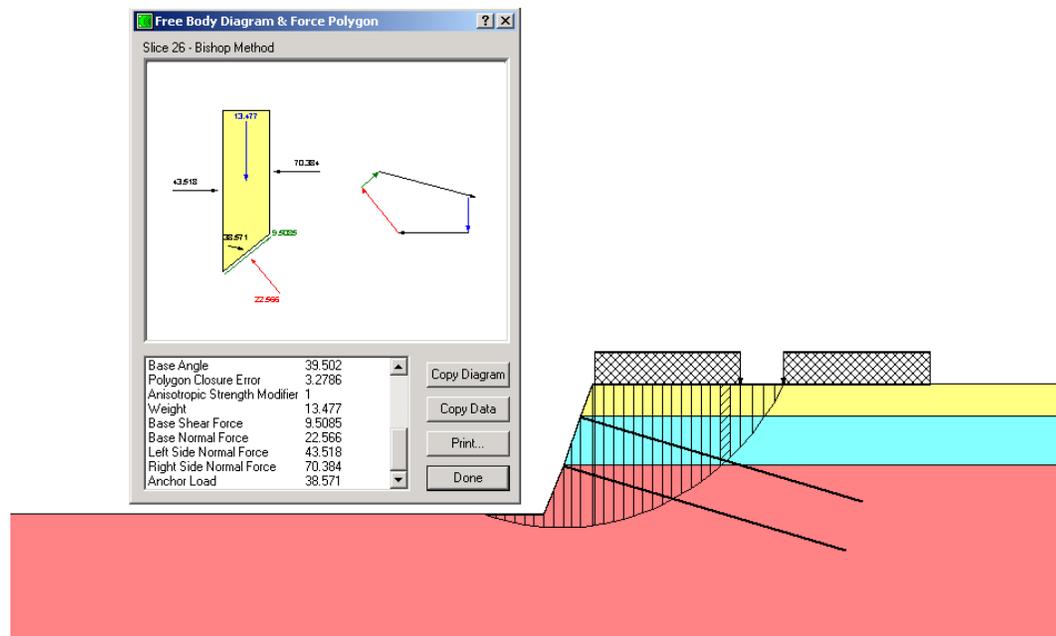


Figura 6.49: Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 4,0m.

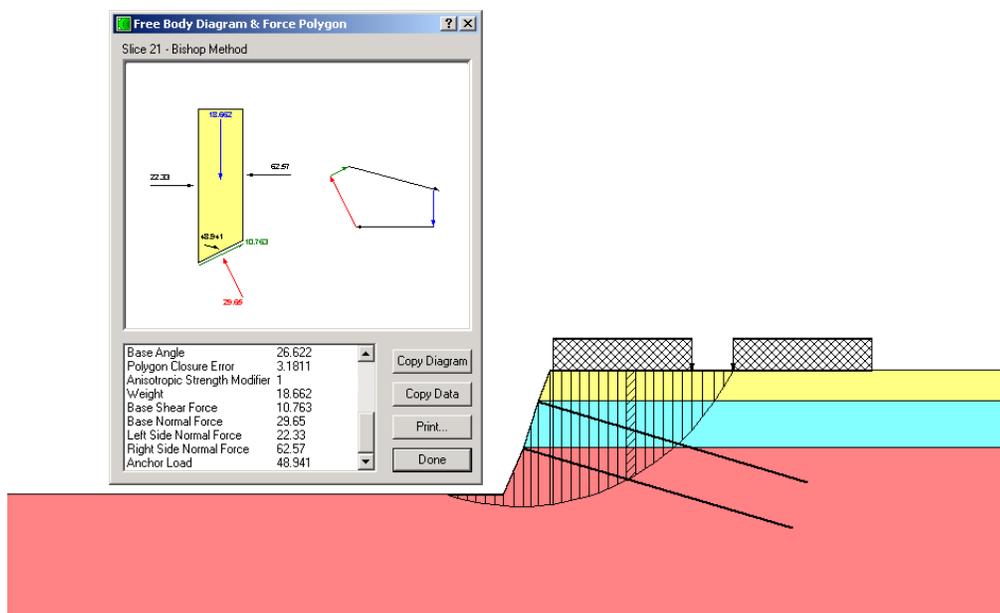


Figura 6.50: Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 4,0m.

A tabela 6.7 apresenta o resumo do cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento de todos os grampos para a seção de 4,0 metros de altura.

Grampo	Solicitação (A.I.)	Resistência (Rt)	F. S.
a	38,57	34,04	0,88
b	48,94	-	-

Tabela 6.7: Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 4,0m.

### OBSERVAÇÃO IMPORTANTE

O grampo “a” não foi aprovado na verificação realizada anteriormente, na resistência ao arrancamento, logo seu comprimento deverá ser aumentado de 10,0 para 12,0 metros a fim de atender a tal exigência.

Configuração do talude reforçado, correção para 12,0 metros de comprimento, como mostrado na Figura 6.51 abaixo.

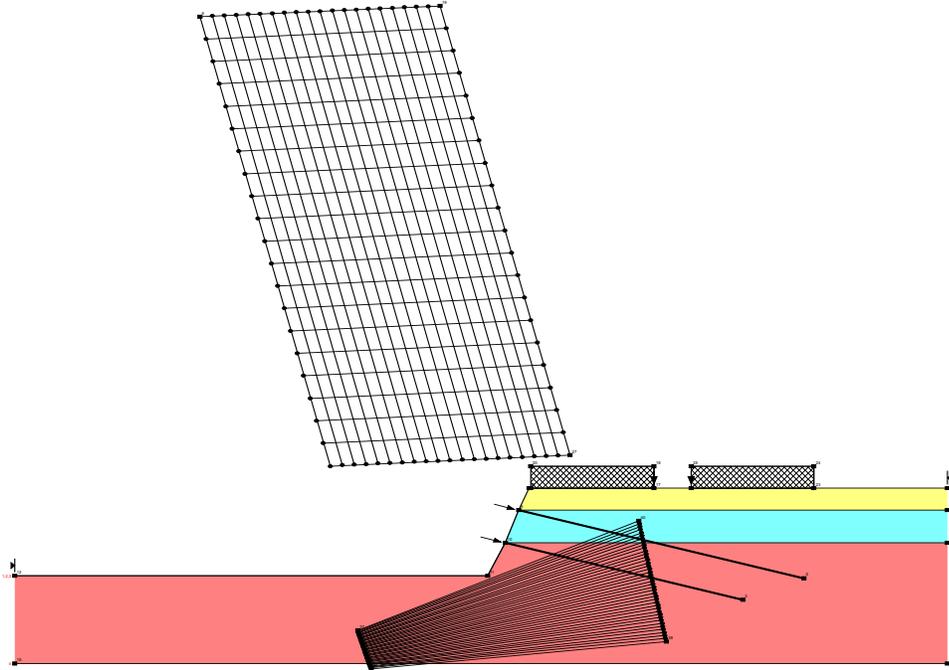


Figura 6.51: Configuração do talude regularizado de 4,0 com os grampos corrigidos para 12,0 e 10,0m

O Fator de Segurança obtido com a correção do comprimento do reforço foi de 1,6, e a verificação da superfície de ruptura está indicada na Figura 6.52.

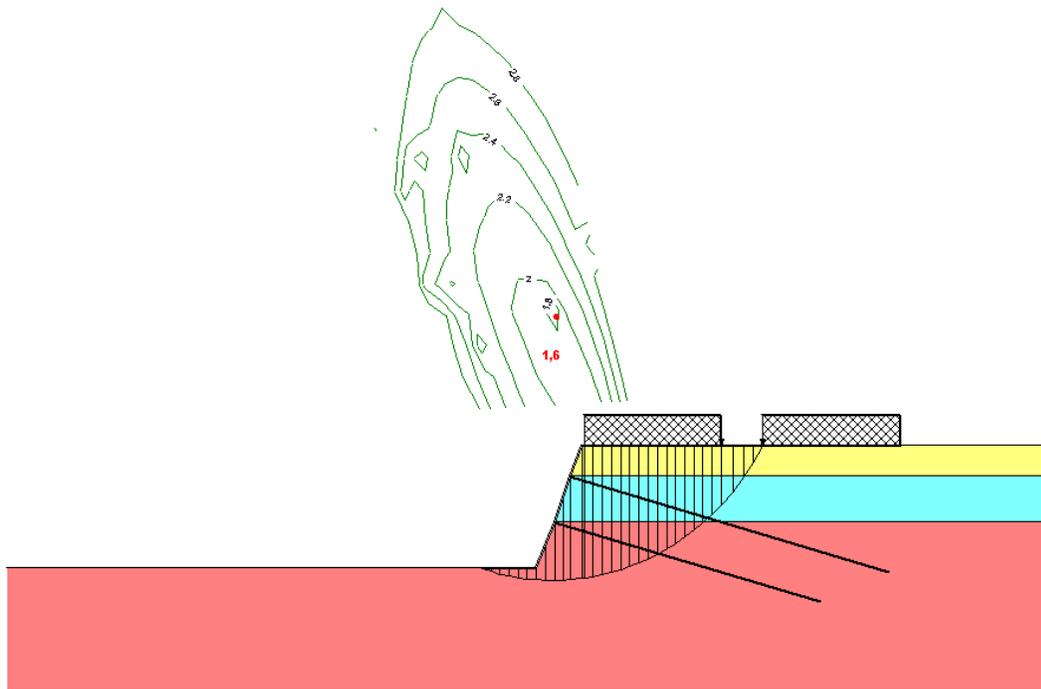


Figura 6.52: Superfície de ruptura crítica para seção de 4,0m, com reforço corrigido.

A análise da estabilidade interna dos grampos para a seção de 4,0 metros foi feita novamente para a configuração corrigida dos grampos.

As Figuras 6.53 a 6.54 apresentam as configurações para os grampos “a” e “b”.

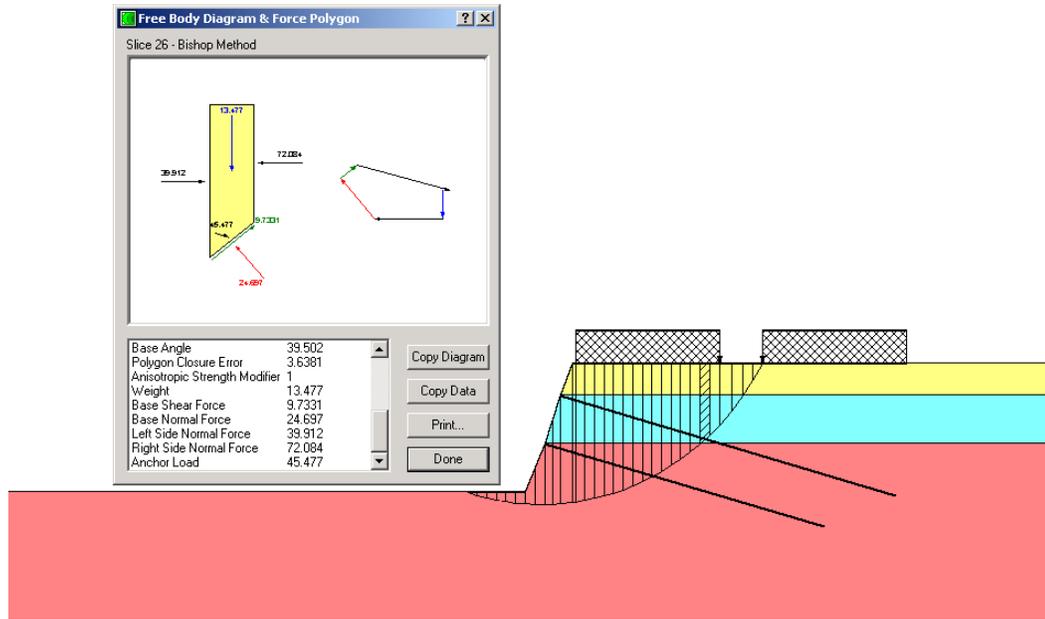


Figura 6.53: Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 4,0m, com os grampos corrigidos para 12,0 e 10,0 metros

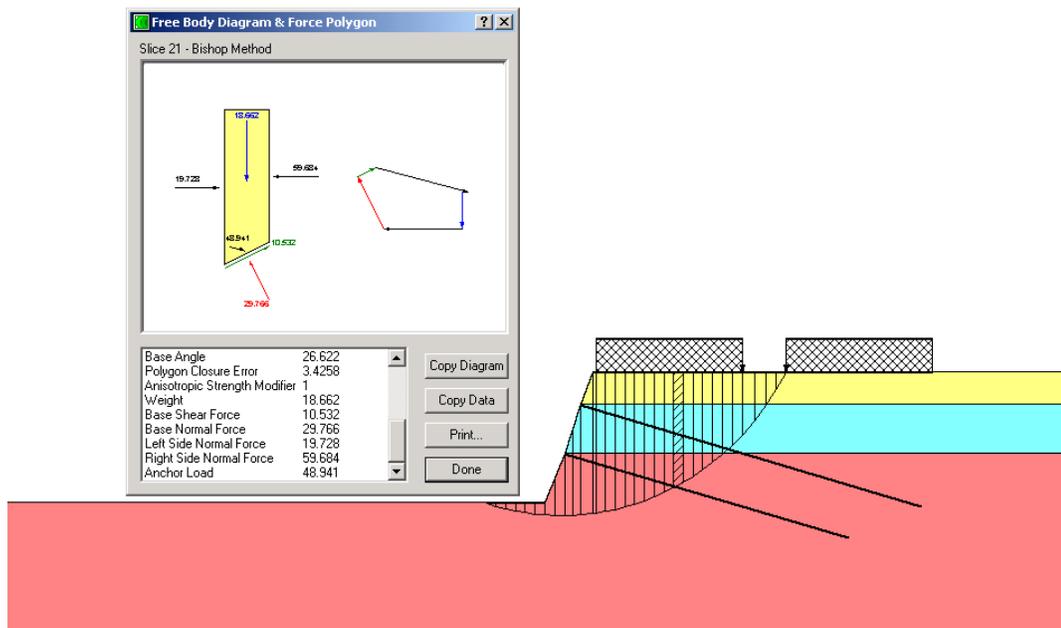


Figura 6.54: Indicação da carga de ancoragem do grampo “b”, para seção de 4,0m, com os grampos corrigidos para 12,0 e 10,0 metros

A tabela 6.8 apresenta o resumo do cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento dos grampos corrigidos para a seção de 4,0 metros de altura.

Grupo	Solicitação (A.I.)	Resistência (Rt)	F. S.
a	45,48	54,41	1,2
b	48,94	64,05	1,3

Tabela 6.8: Cálculo dos Fatores de Segurança ao arrancamento para o talude de 4,0m com os grampos corrigidos

## 6.7 – Análise da estabilidade do talude reforçado para seção de 2,0m de altura

### 6.7.1 - Estabilidade global

A configuração do talude com terreno natural para seção de 2,0m está indicada no Figura 6.55 abaixo.

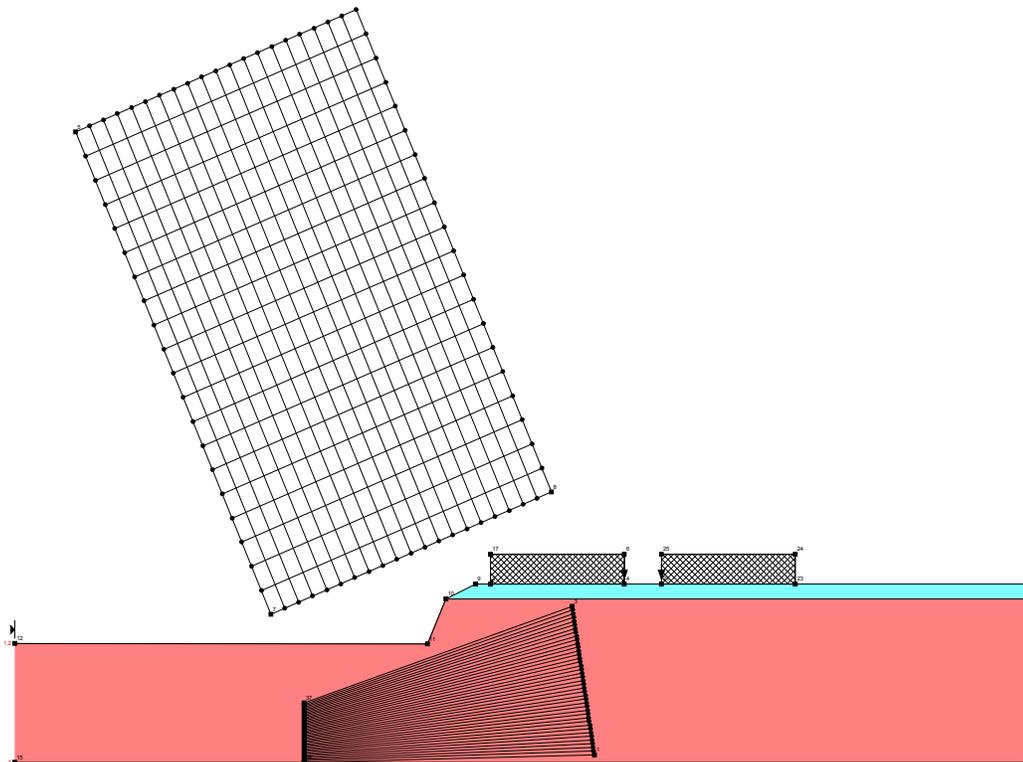


Figura 6.55: Configuração do talude de 2,0m natural, sem reforço.

A Figura 6.56 mostra a superfície de ruptura crítica para o talude em questão. O Fator de Segurança calculado é igual a 2,0.

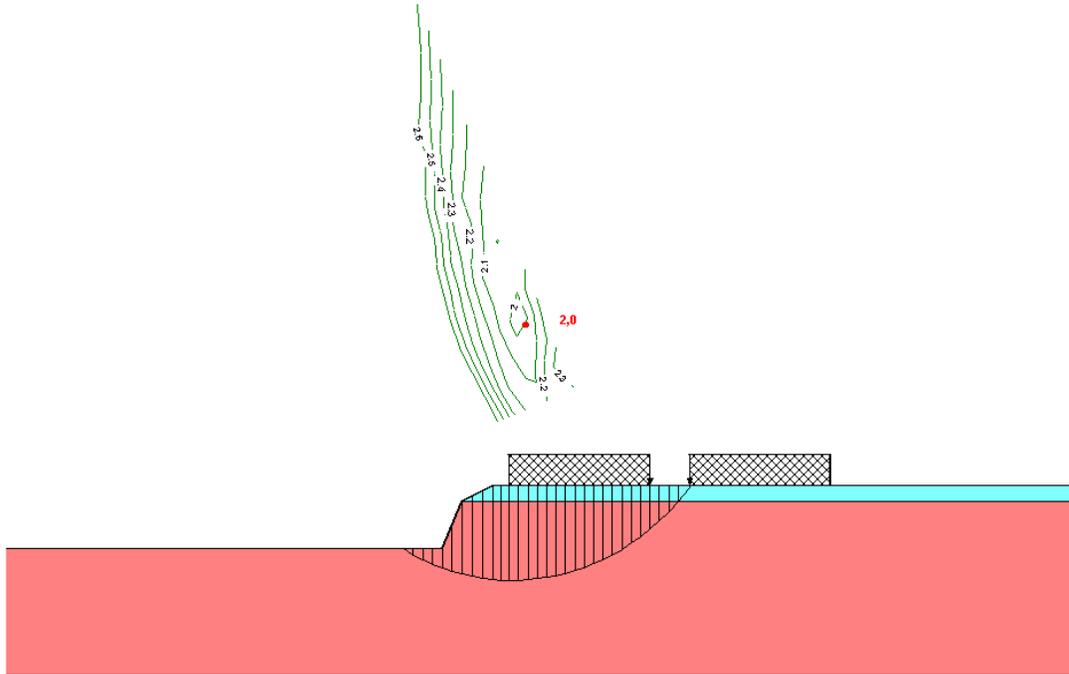


Figura 6.56: Superfície de ruptura crítica para seção de 2,0m natural.

A configuração do talude com a face regularizada está indicada na Figura 6.57.

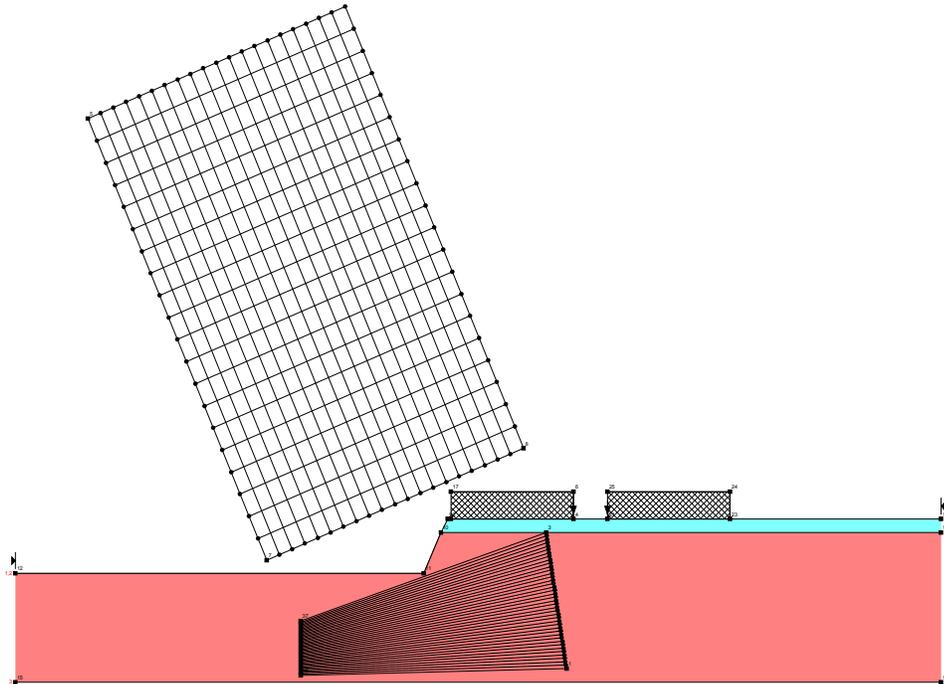


Figura 6.57: Configuração do talude com 2,0m regularizado sem reforço.

O fator de segurança para a superfície regularizada é de 1,6, e a superfície de ruptura crítica está indicada na Figura 6.58.

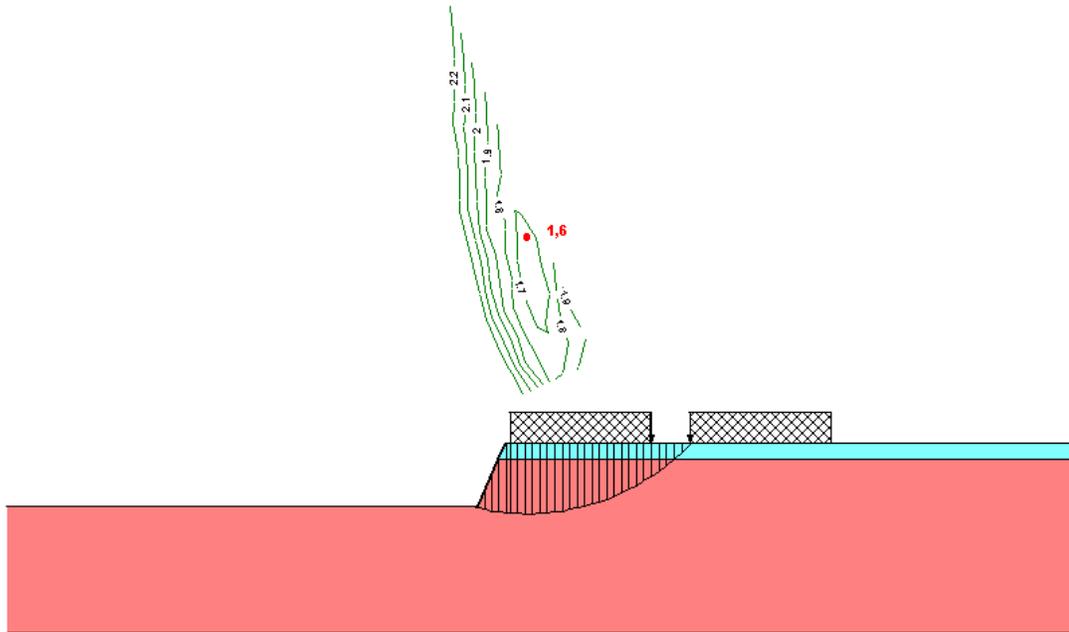


Figura 6.58: Superfície de ruptura crítica do talude com 2,0m regularizado sem reforço.

Para o reforço do talude com seção de 2,0m, o grampo terá o comprimento igual a 12,0m, já que assim como na seção de 4,0 metros, o comprimento de 10,0m foi insuficiente para a análise quando ao arrancamento. A configuração do talude de 2,0m com o grampo corrigido está ilustrado na Figura 6.59.

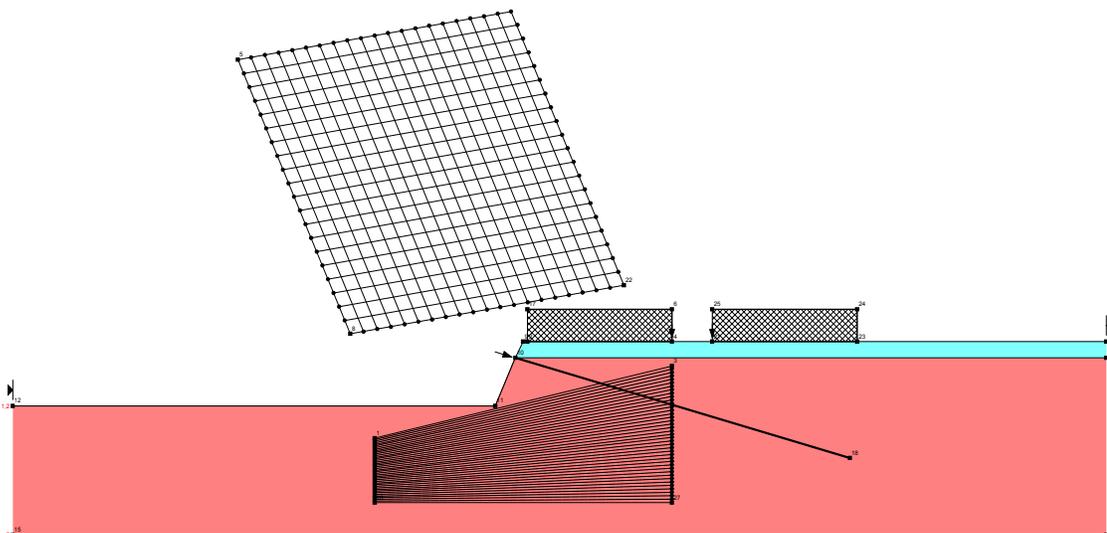


Figura 6.59: Configuração do talude regularizado de 2,0m com reforço.

O Fator de Segurança obtido com a aplicação do reforço foi de 2,2, e a verificação da superfície de ruptura está indicada na Figura 6.60.

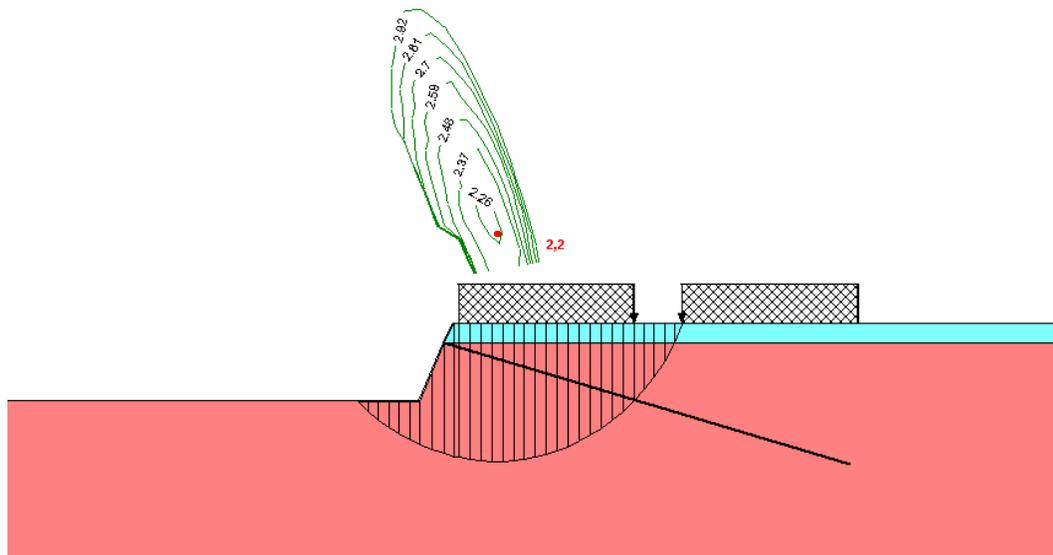


Figura 6.60: Superfície de ruptura crítica para seção de 2,0m, com reforço.

### 6.7.2 - Verificação da estabilidade global considerando a influência do reforço na superfície de ruptura crítica do talude natural

O Fator de Segurança para a superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica do talude natural regularizado é igual a 2,3, e o esquema dessa superfície crítica é mostrado na Figura 6.61 abaixo.

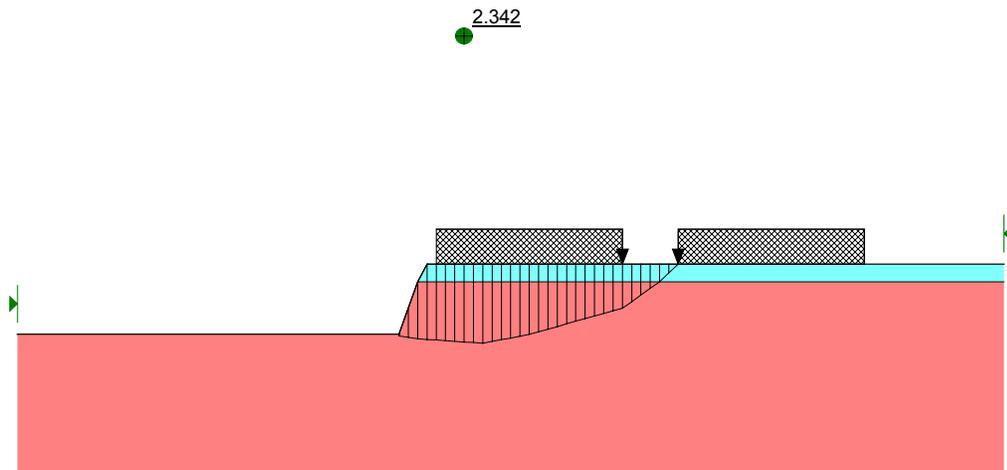


Figura 6.61: Superfície de ruptura crítica próxima a do talude natural para seção de 2,0m, sem reforço.

A superfície de ruptura aproximadamente igual à crítica é então traçada no talude com o reforço e está indicada na Figura 6.62.

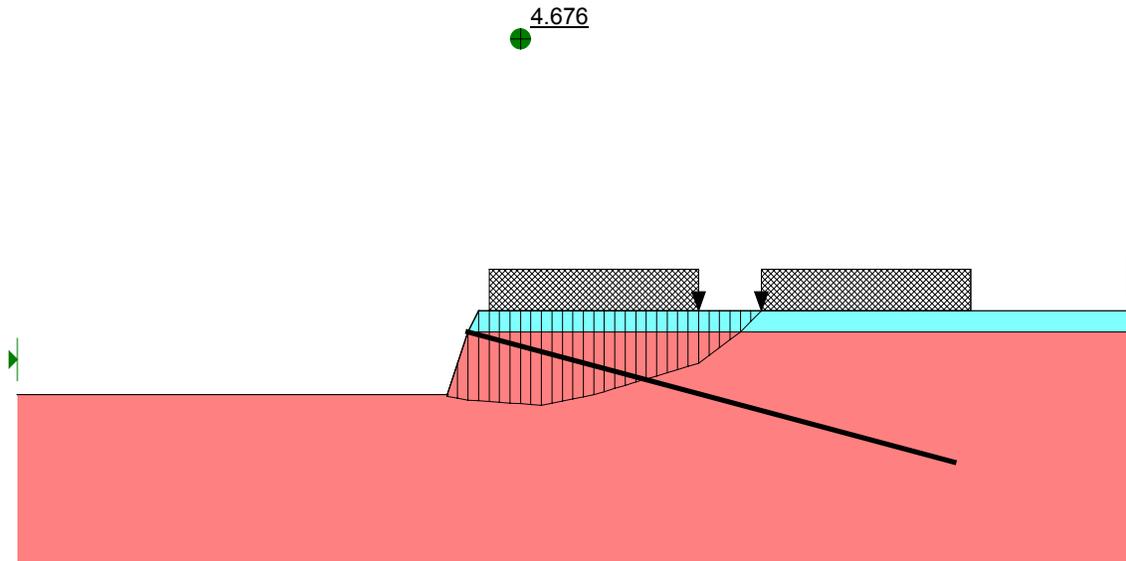


Figura 6.62: Configuração do talude de 2,0m com reforço atuando na superfície crítica próxima à do talude natural regularizado.

O Fator de segurança calculado para o esquema da Figura 6.62 foi de 4,7.

### 6.7.3 – Análise da estabilidade interna dos grampos para seção de 2,0m de altura

Para a verificação da estabilidade interna dos grampos, é analisada a carga de sollicitação e a resistência ao arrancamento para cada um dos grampos.

Os cálculos para cada grampo foram feitos analogamente à seção de 9,0m.

Logo,  $\text{Resistência ao arrancamento} > \text{Carga de sollicitação no grampo}$   
 $R_t > \text{Anchor Load (AL)}$

A Figura 6.63 apresenta a configuração para o grampo “a”.

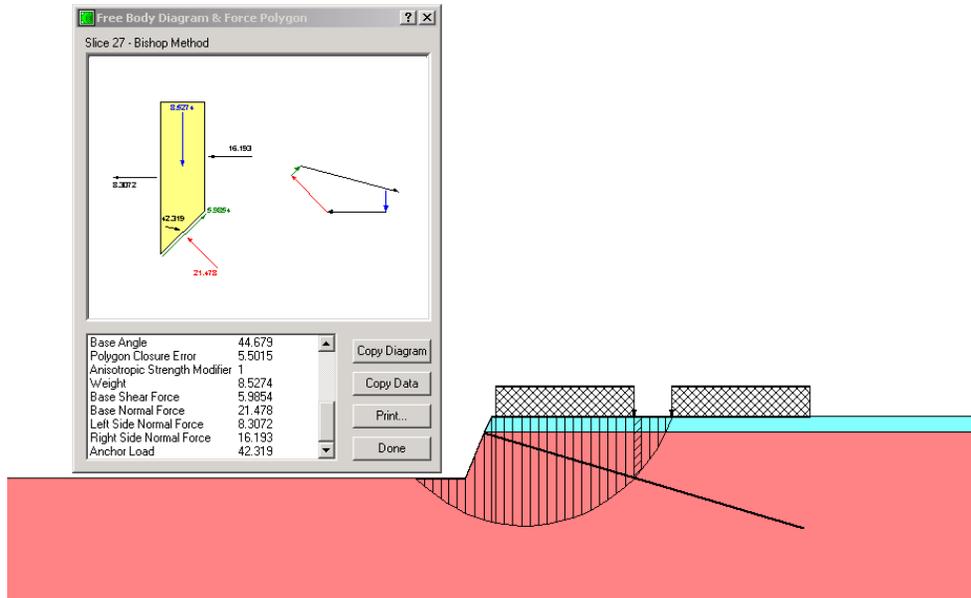


Figura 6.63: Indicação da carga de ancoragem do grampo “a”, para seção de 2,0m.

A tabela 6.8 apresenta o resumo do cálculo do Fator de Segurança ao arrancamento para o grampo da seção de 2,0 metros de altura.

Grampo	Solicitação (A.I.)	Resistência (Rt)	F. S.
a	42,32	43,57	1,1

Tabela 6.9: Cálculo do Fator de Segurança ao arrancamento para o talude de 2,0m.

## 6.8 - Materiais utilizados

### 6.8.1 - Grampo

Os materiais adotados no projeto são os utilizados no Sistema DYWIDAG 15 mm - Aço St 85/105, como mostrado na Figura 6.64.

A barra de aço utilizada é laminada à quente com comprimento máximo de 12 metros, barra contínua, com rosca contínua com passo de rosca grossa, podendo ser cortadas e fornecidas na medida especificada no projeto evitando perdas na obra.

Segundo o fabricante, outras características do grampo são, ótima relação entre o diâmetro da barra e as cargas aplicadas, e alta aderência por conta da rosca contínua e robusta, além das características e resistências mostradas nas Tabelas abaixo.

Seção	Peso	Passo	Módulo de Elasticidade
mm <sup>2</sup>	Kg/m	mm	Kgf/mm <sup>2</sup>
176	1,5	10	21.000

Tabela 6.10: Características do grampo (www.dywidag.com.br, 2007).

CARGAS		
Trabalho	Escoamento	Ruptura
tf	tf	tf
8	15	18

Tabela 6.11: Cargas admissíveis do grampo (www.dywidag.com.br, 2007).

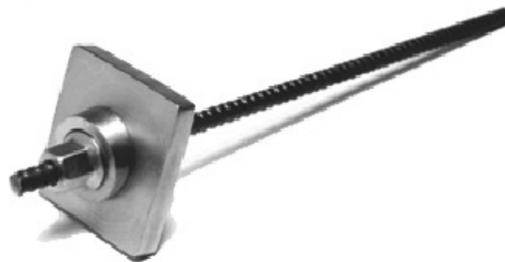


Figura 6.64: Detalhe da cabeça do grampo (www.dywidag.com.br, 2007).

Além das barras, o sistema também é composto pelos seguintes componentes.

As Placas de Ancoragem (Figura 6.65) têm a função de distribuir as tensões sobre a estrutura ancorada.

A placa utilizada será a Placa FC 160x160x40 mm, com peso de 6,9 kg.



Figura 6.65: Placa de Ancoragem (www.dywidag.com.br, 2007).

A contra-porca (Figura 6.66) restringe o deslocamento da ancoragem, e é rosqueada contra a placa. A contra-porca utilizada será a DW/GW 50x35 mm.



Figura 6.66: Contra-porca (www.dywidag.com.br, 2007).

O Anel de compensação angular (Figura 6.67) compensa o ângulo entre o grampo inclinado e o apoio da ancoragem.

O anel utilizado será DW/GW 4"x15°, proporcional à inclinação dos grampos utilizados.



Figura 6.67: Anel de compensação (www.dywidag.com.br, 2007).

Os distanciadores (Figura 6.68) são utilizados para manter a barra no centro do furo, para permitir um cobrimento mínimo do aço. São colocados em intervalos de 2 a 3 metros.



Figura 6.68: Distanciadores (www.dywidag.com.br, 2007).

## 6.8.2 - Especificação do Concreto Projetado

O concreto projetado sobre a face do talude, para o caso muro de solo grampeado, tem função principal de estabilização local de massas de solo localizadas entre os grampos na superfície do talude.

O concreto projetado utilizado terá adição de fibras de aço, **Wirand®** FS3N da Maccaferri, substituindo a solução tradicional com armadura convencional de aço.

As fibras Wirand® são fibras de aço de baixo teor de carbono, trefilado a frio, com 0,76mm de diâmetro e 33mm de comprimento, utilizadas para reforçar o concreto projetado em diversos tipos de obras.

Quando adicionadas ao concreto, atuam como uma armadura tridimensional que redistribui as tensões aplicadas sobre o elemento estrutural, restringindo a propagação de fissuras e aumentando a resistência pós-fissuração do elemento estrutural.

A espessura da camada de concreto utilizada será de 10,0cm em toda a superfície do talude.

O comprimento máximo da fibra não deve ser superior a 60% do diâmetro do mangote (saída da mangueira para a projeção do concreto).

Algumas recomendações do fabricante quanto a correta mistura de um concreto reforçado com fibras são:

- Teor de argamassa > 50%;
- Fator água/cimento < 0,55;
- Abatimento de tronco de cone de 100 + - 20 mm;
- Ajustar o 'slump' do concreto para no mínimo 12 cm;
- Adicionar as fibras na velocidade de 20 a 22 kg por minuto (1 saco);
- No caminhão betoneira, após adicionar a fibra, deve continuar misturando em alta velocidade durante 5 minutos;
- Nunca adicionar a fibra como primeiro componente;

Outras características a serem consideradas são:

- Dimensão Máxima dos agregados - 0,50 do comprimento (L) da fibra;
- Espessura mínima do elemento estrutural:  $S_{mín} = 1,5$  do comprimento (L) da fibra;

- Dimensão máxima dos agregados -  $1/3$  de  $S_{mín}$  ;
- Dosagem mínima recomendada -  $20 \text{ kg/m}^3$ .

As vantagens da utilização de um concreto fibro-reforçado são:

- Aquisição de um comportamento dúctil;
- Prevenção de fissuras por retração;
- Maior resistência ao impacto;
- Maior resistência as solicitações térmicas;
- Melhor comportamento a Fadiga;
- Menor Permeabilidade.

Outras vantagens em relação ao seu uso é que elimina ou diminui custos com mão-de-obra para armação e praticamente não gera desperdício de material, não exige grandes investimentos para transporte e estocagem e seu manuseio e aplicação são simples.

## 6.9 - Orçamento

ORÇAMENTO MURO SOLO GRAMPEADO						
<b>1</b>	<b>Serviços Preliminares</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Consumo Total</b>	<b>Unitário</b>	<b>Total</b>
1.1	Placa de identificação de obra publ., incl. pint. e suporte de mad.	m2	12,00	-	154,61	1.855,32
1.2	Placa de sinalização preventiva p/ obra na via public.	um	1,00	-	30,94	30,94
1.3	Locação Topográfica	h	8,00	-	197,93	1.583,44
1.4	Barracão de obra em chapa compensada plastif., excl. ligação provisória, incl. Instal.	m2	10,00	-	165,79	1.657,90
					<b>Sub-total</b>	<b>5.127,60</b>
		<b>m²</b>	<b>327,00</b>			
<b>2</b>	<b>Raspagem e limpeza manual do terreno</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Consumo Total</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Total</b>
2.1	Servente	h	0,0774	25,31	6,00	151,86
					<b>Sub-total</b>	<b>151,86</b>
		<b>m³</b>	<b>1.108,50</b>			
<b>3</b>	<b>Raspagem e limpeza mecanizada do terreno</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Consumo Total</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Total</b>
	Servente	h	0,055	60,97	6,00	365,81
	Retroescavadeira	h prod	0,055	60,97	45,00	2.743,54
					<b>Sub-total</b>	<b>3.109,34</b>
<b>4</b>	<b>Solo grampeado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Consumo Total</b>	<b>Unitário</b>	<b>Total</b>
4.1	Perrfuração rotat. horiz. em solo	m	172,00	-	81,56	14.028,32
4.2	Grampo aço CA 50, diam. 15mm, comprimento entre 9,0 e 15,0 metros, incl. todos os materiais, excl. perfuração e enchimento	m	1.820,00	-	25,36	46.155,20
4.3	Enchimento com argamassa 1:4	m³	16,50	-	490,63	8.095,40
4.4	Concreto projetado, aplicado em superf. vert. ou horiz. superior, medição feita pelo concr. aplic.	m³	32,70	-	646,64	21.145,13
4.5	Dreno tubo PVC diametro 3"	m	240,00	-	7,57	1.816,80
4.6	Concreto import. de usina dosado para 25MPa, p/ placa de contato grampo face do talude	m³	3,30	-	229,63	757,78
4.7	Tela de aço CA 60, formado por malha quadrada c/ diam 4,2mm e espaçam. 10x10cm entre eles	kg	113,00	-	3,80	429,40
4.8	Corte, dobra e montagem de tela de aço de 4,2mm de diam. p/ placa de contato grampo	kg	113,00	-	0,65	73,45
					<b>Sub-total</b>	<b>92.501,47</b>
					<b>Total</b>	<b>100.890,27</b>

Tabela 6.12: Tabela de Orçamento

## **CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO**

Diante dos dimensionamentos e dos orçamentos realizados concluímos que o muro de solo grampeado é mais econômico do que o muro de solo reforçado. Isso ocorreu neste caso, provavelmente devido à grande movimentação de solo que deverá ser feita no muro de solo reforçado e também a compactação do retroaterro que demanda um custo considerável.

Observamos também que o muro de solo grampeado causa menor transtorno no local da obra visto que não há a necessidade de interditar a estrada à montante do talude e que o muro é construído no próprio talude existente, sendo necessária apenas uma regularização da superfície, e nenhuma escavação e posterior compactação.

## BIBLIOGRAFIA

ABMS / SINDUSCON – SP. *Solo Grampeado: Projeto, execução, Instrumentação e comportamento*, São Paulo, 2003, 185p;

ABNT. (2006). *Estabilidade de encostas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, designação da norma: NBR - 11682/2006.

HUESKER, Especificações técnicas do Fortrac<sup>®</sup>;

MACCAFERRI, Especificações técnicas do Wirand<sup>®</sup>;

MACCAFERRI, Especificações técnicas do MacDrain<sup>®</sup> 2L FP;

MIRANDA, Maria Fátima – *Avaliação da Estabilidade de contenções através de métodos probabilísticos*, 2005, 106.

SOLOTRAT, *Manual Técnico* (2006). Engenharia Geotécnica. Segunda Edição

TCPO, *Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos*, São Paulo, PINI, 2003, 512p;

Vertematti, José Carlos – *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 2004, 413p;

## ANEXO I – DETERMINAÇÃO DE K E N DO SOLO

Para a determinação dos módulos  $k$  e  $n$  do solo de reaterro foi feito um gráfico com o módulo de elasticidade do solo versus a tensão  $\sigma_3$ , sendo esses dois parâmetros divididos pela pressão atmosférica  $P_a$ . Feito esse gráfico a inclinação da reta interpolada é a relação  $1:n$  e o valor de  $k$  é onde a reta toca o eixo do módulo de elasticidade.

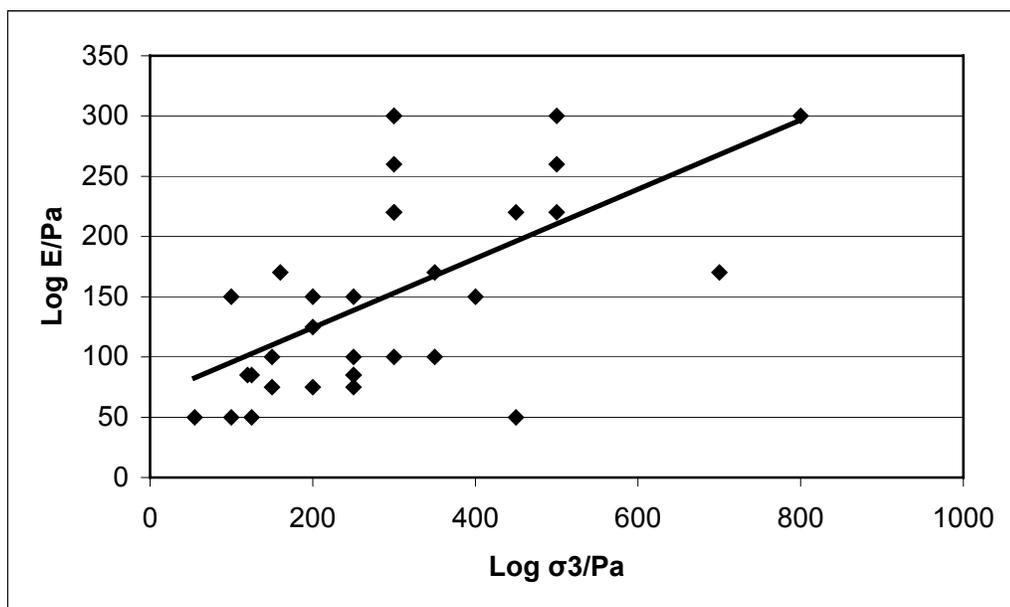


Figura I.1: Determinação de  $k$  e  $n$  do solo de reaterro.