



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**



**CAROLINA TRINDADE PAIVA**

**ESTUDO DE CASO DE ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES EM ÁREA  
URBANA COM ESTRUTURAS MISTAS DE SOLO GRAMPEADO E  
CORTINA ATIRANTADA**

Trabalho de Graduação Integrado  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de São Carlos como parte dos requisitos  
para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Teresinha de Jesus  
Bonucelli

SÃO CARLOS (SP)  
2021

A Deus, minha Rocha, que treina as  
minhas mãos para batalha.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família: João Paulo, Maria Minervina, Rômulo Paiva e Lucas Bosco, pelo apoio incondicional, carinho e paciência durante a minha jornada acadêmica.

A Universidade Federal de São Carlos, que me proporcionou a oportunidade de possuir um ensino superior e a expansão de meus horizontes profissionais.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Teresinha de Jesus Bonuccelli, pelo apoio, paciência, orientação e finais de semana investidos em construir este trabalho.

A Construtora Queiroz Galvão, pela oportunidade conhecer mais sobre o dia a dia da engenharia civil e pelo material cedido que foi fundamental para a realização deste trabalho.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Natália de Souza Correia e ao Prof. Dr. Fernando Martins Portelinha, pela inspiração como família e como profissionais, pelo apoio durante a Iniciação Científica e pela participação na banca deste trabalho, fatos que contribuem para eu ser a profissional que sou hoje.

Aos colegas de estágio em Salvador (BA), por toda a ajuda e por todas as conversas construtivas sobre engenharia civil.

Aos amigos da Aliança Bíblica Universitária, pela calorosa recepção quando cheguei como estudante em São Carlos, pelo acolhimento, pelo apoio em oração e por marcarem a minha vida de maneira tão positiva.

Aos amigos e ao tutor do PET, pelo crescimento profissional e pessoal proporcionados durante as reuniões e confraternizações.

Aos colegas de turma, que direta ou indiretamente participaram da minha formação, pela garra e pelas noites em claro mergulhados nos estudos.

## RESUMO

No Brasil, tem sido muito comum buscar as obras de contenções como recursos para melhorar o aproveitamento de espaços urbanos. Com o aumento da urbanização e do índice populacional, surgem demandas por estacionamentos no subsolo, abertura de túneis e novas vias urbanas, por exemplo. Para a ampliação do espaço e a segurança contra desmoronamentos, os estudos em engenharia geotécnica são fundamentais e precisam estar em constante aperfeiçoamento. Devido à diversidade de contextos geológicos encontrados, análises cuidadosas e detalhadas são necessárias para a escolha do sistema de estabilização e contenção mais adequado. Assim, nesse trabalho foram estudados e discutidos dois tipos de sistemas de estabilização de taludes bastante utilizados pela engenharia em vias urbanas: solo grampeado e cortina atirantada. Foi realizado um apanhado da literatura sobre os dois sistemas e respectivos métodos de dimensionamento e análises de estabilidade. Particularmente, estudou-se o caso da estabilização de dois cortes executados na ampliação de uma avenida na cidade de Salvador, Bahia. Concluiu-se que o uso misto de solo grampeado e cortina atirantada para estabilização dos taludes de corte foi a solução mais coerente em termos de viabilidade técnica e econômica.

**Palavras-chave:** Estabilidade de Taludes. Solo Grampeado. Cortina Atirantada.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de solo grampeado.....	16
Figura 2 - Detalhe de um grampo na região próxima a face do talude.....	16
Figura 3 - Obra de solo grampeado na década de 70, Rodovia dos Imigrantes (SP) .....	17
Figura 4 - Processo de execução da estabilização em solo grampeado.....	18
Figura 5 - Perfuratriz utilizada na execução de furos no maciço .....	18
Figura 6 - Chumbador com mangueiras de injeção e detalhe da dobra do aço .....	19
Figura 7 - Concreto projetado com fibras .....	20
Figura 8 - Detalhamento da extremidade de um DHP (dreno sub horizontal profundo) .....	21
Figura 9 - Modelos de drenos de paramento: (a) dreno linear contínuo; (b) dreno pontual.....	22
Figura 10 - Esquema de canaleta de drenagem superficial .....	22
Figura 11 - Análise de dados de deformações horizontais.....	24
Figura 12 - Verificações necessárias no projeto de solo grampeado.....	25
Figura 13 - Definição das zonas ativa e passiva em solo grampeado.....	29
Figura 14 - Posição da superfície de ruptura e da posição onde ocorre $T_{max}$ .....	29
Figura 15 - Superfícies potenciais de ruptura de taludes com solo grampeado .....	31
Figura 16 - Vista em perspectiva de aplicação de cortina atirantada .....	32
Figura 17 – Componentes de um tirante .....	33
Figura 18 - Detalhamento dos elementos da cortina atirantada.....	33
Figura 19 – Modos de ruptura de uma cortina atirantada.....	35
Figura 20 – Recomendações para projeto de cortina atirantada.....	35
Figura 21 - Interação dos componentes dos sistemas com o solo.....	37
Figura 22 – Forças atuantes nas lamelas, método de Fellenius .....	41
Figura 23 - Forças atuantes em uma lamela no método de Spencer.....	46
Figura 24 - Gráfico para determinação do Fator de Segurança do talude: método de Spencer .....	47

Figura 25 - Forças atuantes em uma lamela: método de Morgenstern-Price .....	48
Figura 26 - Vista do “Corte 7” .....	52
Figura 27 - Vista do “Corte 8” .....	53
Figura 28 – Representação da seção transversal 7 do Corte 7 utilizada no programa GEO5 .....	57
Figura 29 - Dados do solo analisado na seção transversal 7 do Corte 7 .....	58
Figura 30 - Representação da seção transversal 7 do Corte 7 com as propriedades do solo .....	58
Figura 31 - Dados inseridos para os grampos da seção transversal 7 do Corte 7 ...	59
Figura 32 - Dados inseridos para os tirantes da seção transversal 7 do Corte 7 .....	60
Figura 33 - Dados para a sobrecarga na seção transversal 7 do Corte 7 .....	60
Figura 34 – Representação da seção transversal 7 do Corte 7 configurada para análise de estabilidade no GEO5.....	61
Figura 35 – Representação da seção transversal 11 do Corte 7 configurada para análise de estabilidade no GEO5.....	65
Figura 36 – Representação a seção transversal 5 do Corte 8 configurada para análise de estabilidade no GEO5.....	67
Figura 37 – Representação a seção transversal 7 do Corte 8 configurada para análise de estabilidade no GEO5.....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre os métodos de estabilidade de taludes.....	49
Quadro 2 – Dados das principais seções transversais do Corte 7 (Fonte: Consórcio Transoceânico).....	55
Quadro 3 – Dados das principais seções transversais do Corte 8 (Fonte: Consórcio Transoceânico).....	56
Quadro 4 – Seções transversais críticas escolhidas para análise de estabilidade geral no programa GEO5 .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos valores de FS obtidos no <i>software</i> GEO5 para a seção transversal 7 do corte 7.....	61
Tabela 2 - Valores de FS para diferentes espaçamentos entre tirantes e grampos seção transversal 7 do Corte 7 .....	63
Tabela 3 - Valores de FS para diferentes situações: sem tirantes e sem grampos, só com grampos, só com tirantes, com ambos para a seção transversal 7 do Corte 7 .....	64
Tabela 4 – Valores de FS para a seção transversal 11 do Corte 7 .....	65
Tabela 5 - Valores de FS para a seção transversal 5 do Corte 8 sem considerar tirantes .....	67
Tabela 6 - Valores de FS para a seção transversal 5 do Corte 8 considerando reforço com tirantes .....	68
Tabela 7 - Valores de FS para a seção transversal 7 do Corte 8 considerando reforço com tirantes .....	69
Tabela 8 - Valores de FS para a seção transversal 7 do Corte 8 considerando o solo com tirantes antigos como sobrecarga.....	70
Tabela 9 - Valores de FS obtidos nas seções analisadas dos Cortes 7 e 8 .....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

DHP Dreno sub-horizontal profundo

IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas

FS – fator de segurança

$\delta$  - deformação horizontal da crista

d - deformação medida na crista do talude

H - altura da escavação em determinado estágio da obra ou altura total da escavação

$R_{PO}$  - resistência ao arrancamento (ou resistência da interface solo-grampo; ou “pull out resistance”) por metro de grampo

$D_{perf}$  - Diâmetro da perfuração ou grampo

L - comprimento do grampo

$q_s$  - resistência ao arrancamento ou resistência da interface solo-grampo

$T_{arranc}$  - carga máxima obtida no ensaio de arrancamento

$L_i$  - comprimento do grampo injetado (m), descontando o trecho livre

$N_{SPT}$  – índice de resistência a penetração do amostrador no ensaio de sondagem de simples reconhecimento com medida do SPT

$A_{útil}$  - área da seção transversal da barra de aço que pode ser assegurada durante toda a vida útil da obra

$f_{yk}$  - tensão de escoamento característica do aço

$R_T$  - carga resistente característica a tração da armação do grampo

$S_{max}$  - espaçamento máximo entre grampos

$R_F$  - resistência da conexão ou interface entre o grampo e o paramento, também chamada de “facing resistance”

$K_a$  - coeficiente de empuxo ativo

$\gamma$  - peso específico do solo

$S_h$  e  $S_v$  - espaçamento horizontal e vertical entre os grampos

$T_{máx}$  – solicitação axial máxima no grampo

$L_p$  - Comprimento de arranque ou comprimento do grampo atrás da superfície de ruptura

$T_0$  – solicitação axial na cabeça do grampo

$\alpha_g$  – ângulo de inclinação dos grampos com a horizontal

$\alpha_t$  – ângulo de inclinação dos tirantes com a horizontal

A/C – fator água cimento

$f_{ck}$  – resistência característica do concreto com 28 dias (MPa)

$\sigma_{adm}$  - tensão admissível a tração da armação (aço) do tirante (MPa)

$E_n, E_{n+1}$  – resultantes das forças horizontais (perpendicular a lateral de cada lamela) atuantes nas seções n e n + 1, respectivamente

$X_n, X_{n+1}$  – resultantes das forças cisalhantes (tangente a lateral de cada lamela) que atuam nas seções n e n + 1, respectivamente

W – peso total da lamela

N – força normal atuante na base da lamela

b – largura da lamela

h – altura da lamela

$\alpha$  – ângulo da normal N com a vertical ou da base da lamela (ou da tangente T) com a horizontal

x – distância do centro do círculo ao centro da lamela

R – raio do círculo

U - resultante da poropressão na base da lamela

T - componente tangencial da força W, na base da lamela

N - componente normal da força W, na base da lamela

$\beta$  – ângulo de inclinação do talude com a horizontal

$b_0$  – largura da base da lamela, ou seja comprimento da superfície de ruptura na base da lamela

$c'$  - coesão efetiva na base da lamela

$\phi'$  - atrito efetivo na base da lamela

$\sigma'$  - tensão efetiva na base da lamela,  $\sigma' = N'/b_0$

Q – resultante das forças de interação atuantes em cada lamela (X e E), no método de Spencer

$\theta$  - inclinação da resultante Q com a direção horizontal, em cada lamela, no método de Spencer

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	CONCEITO DE SOLO REFORÇADO.....	15
2.2	CONCEITO DE CONTENÇÃO.....	15
2.3	ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE EM SOLO GRAMPEADO.....	15
2.3.1	Procedimentos executivos e aplicabilidade da técnica.....	17
2.3.2	Verificações ou recomendações necessárias para adequabilidade do projeto .....	23
2.4	SISTEMA DE CONTENÇÃO DE TALUDES EM CORTINA ATIRANTADA .....	32
2.4.1	Procedimentos executivos e aplicabilidade da técnica.....	34
2.4.2	Verificações ou recomendações necessárias para um projeto adequado .....	34
2.5	COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS TÉCNICAS.....	37
2.6	MÉTODOS DE CÁLCULO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS.....	39
2.6.1	Fator de Segurança.....	39
2.6.2	Método de Fellenius .....	40
2.6.3	Método de Bishop .....	43
2.6.4	Método de Bishop Simplificado .....	44
2.6.5	Método de Spencer .....	45
2.6.6	Método de Morgenstern-Price.....	47
2.6.7	Comparativo entre os métodos .....	49
2.6.8	Influência da presença de grampos e tirantes no cálculo da estabilidade global (ou geral) dos taludes .....	49
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
4.1	ESCOLHA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS CORTES 7 E 8 PARA REALIZAR A ANÁLISE DA ESTABILIDADE GERAL OU MISTA .....	55
4.2	RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA O CORTE 7.....	57
4.2.1	Análise da seção transversal 7 do Corte 7 .....	57
4.2.1.1	Análise da influência do espaçamento dos tirantes e dos grampos .....	62

4.2.1.2	Análise da influência do não uso de grampos e tirantes; uso somente de grampos; uso somente de tirantes; uso combinado de grampos e tirantes .....	64
4.2.2	Análise da seção transversal 11 do corte 7 .....	65
4.3	RESULTADOS DAS ANÁLISES PARA O CORTE 8.....	66
4.3.1	Análise da seção transversal 5 do Corte 8 .....	66
4.3.1.1	Situação sem tirantes .....	67
4.3.1.2	Situação com tirantes de reforço .....	68
4.3.2	Análise da seção transversal 7 do Corte 8 com tirantes .....	69
4.3.3	Análise da seção transversal 7 do Corte 8 com região dos tirantes antigos atuando como sobrecarga .....	70
4.4	ANÁLISE DE TODOS OS CASOS .....	71
4.5	OUTRAS VERIFICAÇÕES PARA O SOLO GRAMPEADO.....	72
4.5.1	Verificação da capacidade de carga dos grampos .....	73
4.6	OUTRAS VERIFICAÇÕES PARA A CORTINA ATIRANTADA .....	74
4.6.1	Verificação da capacidade de carga e distribuição dos tirantes .....	75
4.7	VERIFICAÇÕES NÃO REALIZADAS .....	75
4.7.1	Verificações para solo grampeado .....	75
4.7.2	Verificações para cortina atirantada.....	76
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As obras de contenções são muito importantes na engenharia civil, principalmente no meio urbano, pois à medida que as cidades se expandem, por vezes é necessário modificar o relevo natural para adaptar novas construções que garantam a segurança da população que irá utilizar o espaço. Essas modificações muitas vezes incluem escavações de grandes quantidades de solo, o que provoca uma desestabilização natural do relevo. Alterações podem ocorrer, por exemplo, em obras de infraestrutura rodoviária, obras de arte especiais e em áreas urbanas que possuem pouco espaço para construção. Além disso, podem surgir situações emergenciais, que exigem demandas para conter ou prevenir deslizamentos de terra. Em contextos como estes, faz-se necessário a aplicação de reforços no solo, de forma a garantir a estabilidade do local que foi alterado e a contenção do volume de solo existente. Assim, é importante buscar formas de aprimorar as aplicações de contenções, analisando o que tem sido feito e buscando maneiras de melhorar a tecnologia do sistema. Diante disto, esse trabalho apresenta um estudo de caso de estabilização de talude de corte em área urbana com utilização de solo grampeado e cortina atirantada.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, os tipos de solos e a maneira como estão dispostos na superfície, além da dinâmica antrópica sobre o meio ambiente, geram uma diversidade de contextos geotécnicos. Diante disso, os profissionais de geotecnia encontram condições diversas que exigem estudos e análises cuidadosas para que sejam tomadas decisões visando garantir a segurança do homem e o equilíbrio com os recursos naturais. Sendo assim, é importante estudar casos em que houve alterações no relevo, analisando como a nova configuração imposta pelo projeto influenciou no estado de equilíbrio do maciço de solo e quais as implicações geológicas e geotécnicas no meio em que está inserida a obra. Por esse motivo, este trabalho se torna relevante, pois analisa como o uso de solo grampeado e de cortina atirantada geram um novo equilíbrio do talude, e o que se mostrou necessário verificar para chegar ao produto final. O estudo de casos específicos contribui para a melhoria da compreensão de situações semelhantes àquelas que foram analisadas neste trabalho, contribuindo dessa forma na prevenção de erros de projeto e de execução em obras

futuras. O objeto de estudo é um caso de obra real, especificamente a estabilização de um talude de corte em área urbana, onde foram utilizados os sistemas de cortina atirantada e solo grampeado .

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi melhorar a compreensão do funcionamento de sistemas de estabilização de taludes de corte. Particularmente, procurou-se estudar o uso de solo grampeado e cortina atirantada, vantagens e desvantagens de cada um. Especificamente, analisou-se um caso real para consolidar os conhecimentos adquiridos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se a seguir uma compilação da literatura existente sobre solo grampeado, cortina atirantada e métodos de análise de estabilidade de taludes.

### 2.1 CONCEITO DE SOLO REFORÇADO

De acordo com ABNT NBR 16920, solo reforçado é um sistema no qual o talude tem a sua estabilidade melhorada através da inserção de grampos ou outros componentes passivos, os quais tem a função de absorver os esforços gerados pela interação entre os elementos inseridos e o solo. Um exemplo de solo reforçado, ou também chamado de sistema de estabilização, é o solo grampeado, que será detalhado posteriormente neste trabalho.

### 2.2 CONCEITO DE CONTENÇÃO

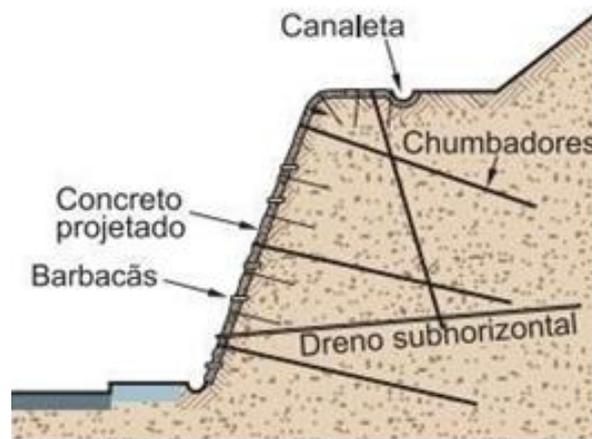
Segundo Ranzini e Negro Jr. (1998), contenção é uma estrutura que contrapõe-se a empuxos e tensões geradas em um maciço que teve sua condição de equilíbrio alterada por intervenções como escavações, cortes ou aterros, promovendo uma nova configuração de estabilidade para o maciço de solo.

Assim, as obras de contenções são compostas por estruturas implantadas em taludes que oferecem resistência à situações de instabilidade, de movimentação do maciço e à rupturas, de forma a gerar reforço no solo (IPT,1991). Um exemplo de contenção, mostrado neste trabalho, é a cortina atirantada.

### 2.3 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE EM SOLO GRAMPEADO

O solo grampeado, segundo Abramento, Koshima e Zirlis (1998), é uma técnica de arrimo de alta produtividade, na qual há o reforço de taludes aplicando chumbadores, ou barras de aço, usualmente chamados de grampos, ou, de acordo com a ABNT NBR 16920, “refere-se à aplicação de reforços resistentes à tração em maciços, de forma a se obter um compósito com melhores características mecânicas”. Na Figura 1 é possível observar uma exemplificação desse conceito.

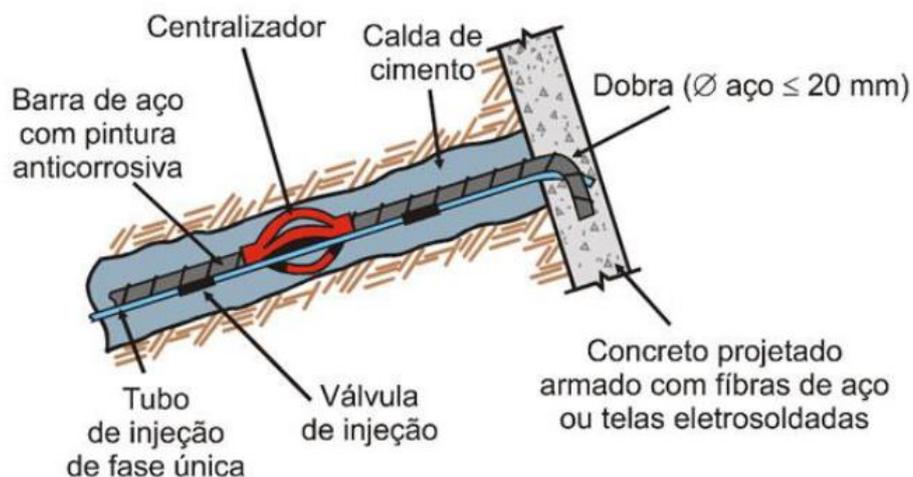
Figura 1 - Esquema representativo de solo grampeado



Fonte: Talus Engenharia (2020)

Ainda de acordo com a ABNT NBR 16920 e conforme ilustrado na Figura 1, é uma técnica que considera a inclusão de elementos de reforços metálicos (grampos) e de sistema de drenagem. Os grampos são envolvidos por concreto projetado e a face do talude (paramento) também é revestida com este material, conforme exemplificado na Figura 2.

Figura 2 - Detalhe de um grampo na região próxima a face do talude

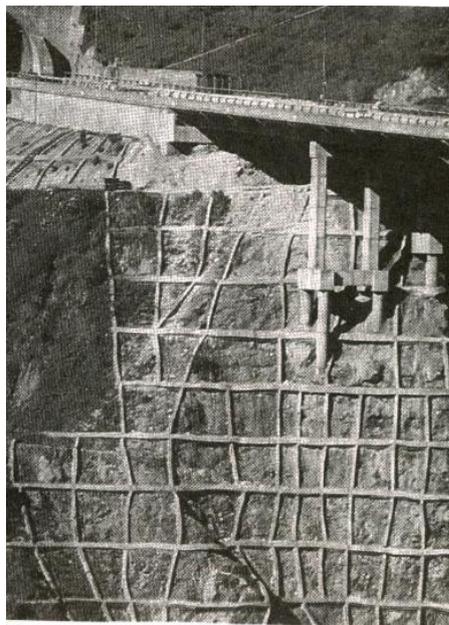


Fonte: Magalhães e Azevedo (2016)

Ranzini e Negro (1998) classificam o solo grampeado como uma construção que introduz elementos no solo para aumentar sua resistência e assim suportar tensões geradas devido a imposição de um brusco desnível (escavação ou corte). É uma das técnicas mais aplicadas no Brasil nas últimas décadas, tendo sido desenvolvida no início da década de 70 na Europa. O governo francês foi o primeiro

a investir em solo grampeado ao fomentar estudos sobre a técnica. No Brasil, uma das primeiras obras em solo grampeado foi a inserção de chumbadores nos maciços próximos aos emboques e desemboques dos túneis da Rodovia dos Imigrantes, na década de 70, em São Paulo, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Obra de solo grampeado na década de 70, Rodovia dos Imigrantes (SP)

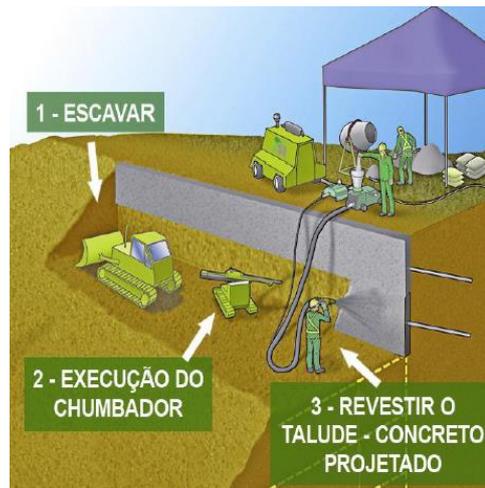


Fonte: Pitta, Souza e Zirlis (2013)

### 2.3.1 Procedimentos executivos e aplicabilidade da técnica

No processo de execução da técnica, realiza-se a escavação do solo, seguido da abertura dos furos nos quais os chumbadores (grampos) são colocados, posteriormente envolvidos por uma calda de cimento e ancorados na superfície do talude. Costuma-se executar uma proteção da face do talude (paramento) utilizando concreto projetado. É possível ver um esquema do processo da execução de solo grampeado na Figura 4.

Figura 4 - Processo de execução da estabilização em solo grampeado



Fonte: Pitta, Souza e Zirlis (2013)

Para a execução do chumbador, pode-se utilizar uma perfuratriz, conhecida no mercado como *rock drill*, que realiza os furos no maciço através de ar comprimido, conforme exemplificado na Figura 5.

Figura 5 - Perfuratriz utilizada na execução de furos no maciço



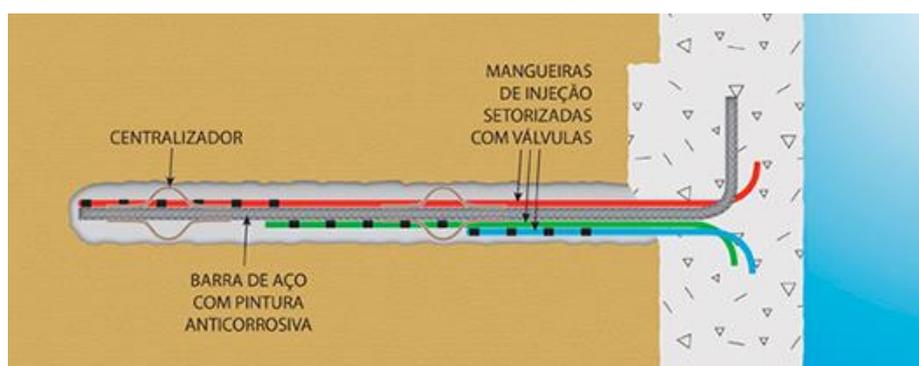
Fonte: Próprio autor

De acordo com Pitta, Souza e Zirlis (2013), é importante destacar que os chumbadores não são protendidos e exercem esforços somente quando ocorre mobilização de solo, além disso, têm a função de estabilizar o maciço inteiro. O concreto projetado em volta dos chumbadores promove a estabilidade local da face do talude (chamado de paramento).

Os autores recomendam que o chumbador deve ser previamente preparado em uma bancada, onde são instalados os centralizadores e mangueiras de injeção, que devem ser colocados em pelo menos 3 trechos dos grampos. Se necessário, aplica-se uma proteção anticorrosiva.

No processo de preparação do solo, os autores descrevem primeiramente, o processo de perfuração do furo, que apresentam diâmetros entre 75mm e 150mm (ABNT NBR 16920). Em seguida se faz a injeção da bainha com calda de cimento. Posteriormente, faz-se a introdução do chumbador acompanhado dos centralizadores e mangueiras de injeção. Executa-se as 3 fases de injeção, com intervalo de 4 a 8 horas entre elas. Para fazer o acabamento do chumbador, faz a dobra do aço ou coloca-se uma placa com uma porca na extremidade superior (face do talude). A Figura 6 mostra um esquema da barra de aço instalada junto com as mangueiras e finalizado com dobra.

Figura 6 - Chumbador com mangueiras de injeção e detalhe da dobra do aço



Fonte: Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda. (2018)

O concreto projetado é o material que reveste a face do talude e pode ser feito em preparo a seco ou por via úmida. Pitta, Souza e Zirlis (2013) descrevem que, pelo preparo a seco, a água é adicionada no momento da projeção do concreto na superfície. Pelo preparo úmido, o concreto é preparado anteriormente com água e levado ao local para aplicação. O mais utilizado dentre os dois é a projeção via seca

e geralmente é preparado *in loco*, para que haja concreto disponível quando necessário. Usualmente, a resistência do concreto projetado é maior que 20 MPa. Para melhor aderência do concreto projetado, os autores recomendam a aplicação de fibras de polietileno ou metálicas, que são adicionadas diretamente na betoneira. O concreto aplicado com as fibras apresenta um melhor ajuste ao relevo da face do talude, além de gerar um aumento da impermeabilidade e da tenacidade do produto final, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Concreto projetado com fibras



Fonte: Pitta, Souza e Zirlis (2013)

Outra opção de aderência do concreto projetado apontada pelos autores é o uso de telas eletrossoldadas. Pode-se utilizar até duas telas, de forma que haja uma camada de concreto entre elas e outra camada acima da segunda tela, que corresponde a camada final aparente na face do talude.

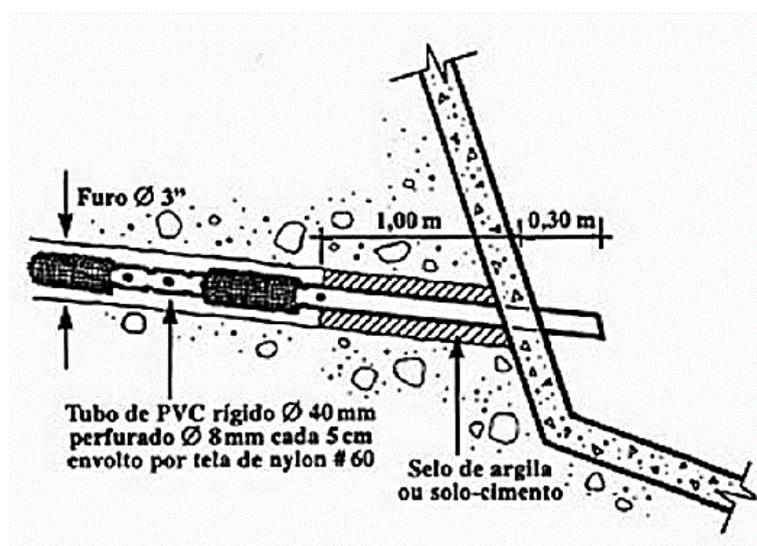
Outro ponto destacado pelos autores é o cuidado com as juntas do concreto projetado, frequentemente negligenciadas. Fazer as juntas, e não deixar que a natureza as faça, evita a falsa impressão de problemas de instabilidade no talude com o passar dos anos. Ou seja, fazer as juntas é uma preocupação estética importante para a qualidade da obra. Os autores citam a existência de dois tipos de juntas: horizontais e verticais. As juntas horizontais devem ser aplicadas de cima para baixo na face do talude e são feitas em forma de cunhas. Já as juntas verticais são feitas entre 2 a 10 espaçamentos de uma coluna de chumbadores e na direção dos drenos verticais de paramento, para facilitar o fluxo de água na face do talude

Os autores evidenciam a importância da instalação de um sistema de drenagem para captar e conduzir as águas que atinjam o maciço. Deve-se levar em

consideração tanto o fluxo de águas do interior do talude como o do exterior deste. Para isso, usa-se o Dreno Sub-Horizontal Profundo (DHP), drenos de paramento e canaletas.

O DHP, ainda segundo os autores, é constituído por tubos plásticos drenantes que captam as águas no interior do talude, antes de aflorar na face deste, e as direcionam para as canaletas. O comprimento dos tubos drenantes variam entre 6 e 24 metros e possuem ranhuras de 0,4 mm. É recomendável colocar um DHP próximo à face superior do talude e também na base deste. Na Figura 8 está mostrado um esquema de DHP, próximo à face do talude.

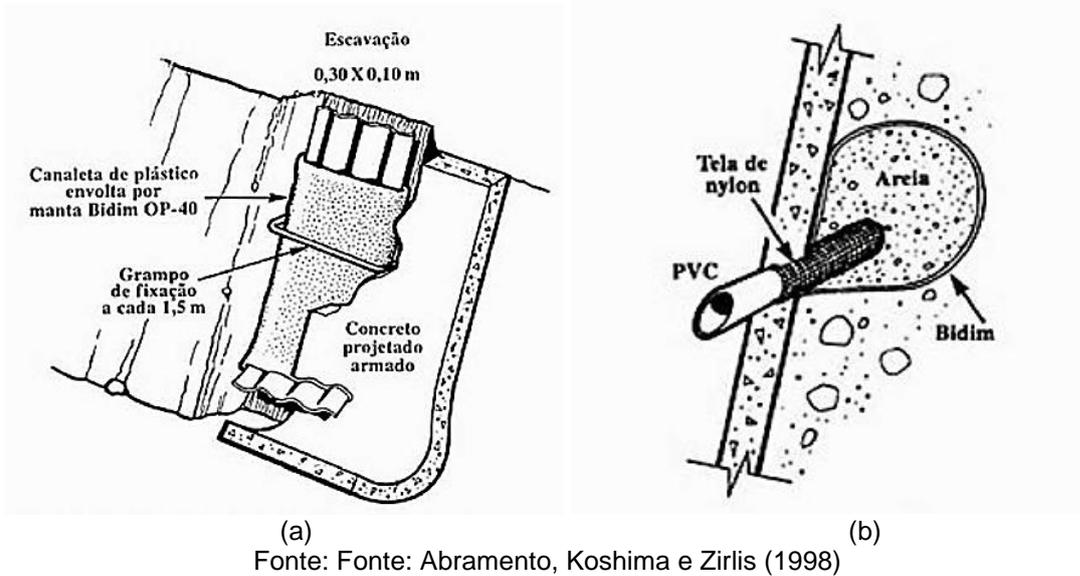
Figura 8 - Detalhamento da extremidade de um DHP (dreno sub horizontal profundo)



Fonte: Abramento, Koshima e Zirlis (1998)

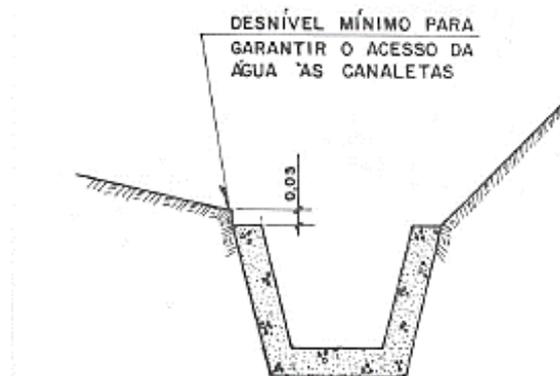
Os drenos de paramento são dispositivos que direcionam o fluxo de água que chega a face do talude. Os dois modelos existentes são o dreno linear contínuo, mostrado na Figura 9(a), e o dreno pontual (barbacã), exemplificado na Figura 9(b).

Figura 9 - Modelos de drenos de paramento: (a) dreno linear contínuo; (b) dreno pontual



Recomenda-se manter desobstruídas as saídas dos drenos. Já as canaletas, ou drenos de superfície, são colocados no pé, na crista do talude e também nas decidas d'água. Assim, semelhante aos dois dispositivos anteriormente citados, é necessário manter as canaletas desobstruídas. Além disso, deve-se evitar canaletas em condutos fechados. É importante a instalação dos dispositivos de drenagem, especialmente em obras urbanas, devido ao risco de vazamentos das redes públicas de esgoto e água. Na Figura 10 estão mostrados os detalhes de uma canaleta.

Figura 10 - Esquema de canaleta de drenagem superficial



Fonte: IPT (1991)

Em relação à aplicabilidade do sistema de solo grampeado, os autores afirmam que este pode ser executado em todos os tipos de solo, mesmo em situações

de argilas orgânicas moles e possui uma execução simples comparado com outros sistemas. Porém, Magalhães e Azevedo (2016) argumentam que é um sistema que apresenta limitações em situações como: presença de solo argiloso, pois a parcela de atrito pode ser insuficiente; presença de grandes pressões hidrostáticas; presença de nível freático, nesse caso, há necessidade de rebaixamento do nível de água durante a execução dos trabalhos.

Esses mesmos autores consideram o solo grampeado como um sistema de estabilização econômico se comparado com outros sistemas existentes, pois é a solução com menor custo linear, com necessidade mínima de movimentação de terra e alta produtividade da execução. Pitta, Souza e Zirlis (2013) mencionam ainda que, devido à grande utilização do solo grampeado e também por ser considerada recente no Brasil, a técnica tem sido alvo de constantes melhorias.

### **2.3.2 Verificações ou recomendações necessárias para adequabilidade do projeto**

Para o solo grampeado existe um parâmetro internacional chamado de deformação horizontal da crista, que é usado para avaliação da estabilidade, como mostra a equação 1:

$$\delta = \frac{d}{H} \quad (1)$$

onde:

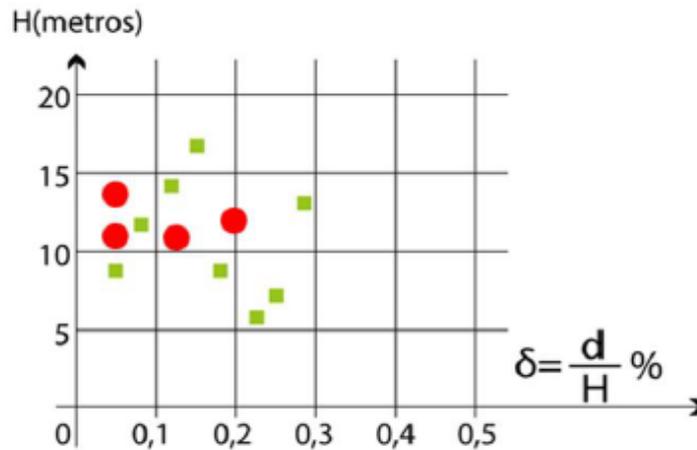
$\delta$  - deformação horizontal da crista (adimensional)

d - deformação medida na crista do talude (m)

H - altura da escavação em determinado estágio da obra (m)

Com os dados de d e H medidos nas principais prumadas do talude, obtém-se a razão mostrada na equação 1, e desta calcula-se a porcentagem de deformação ao longo da execução da obra. Na Figura 11 está mostrado o exemplo de dados de deformação horizontal da crista da execução de solo grampeado do Hospital da Beneficência Portuguesa, em São Paulo - SP:

Figura 11 - Análise de dados de deformações horizontais



Fonte: Pitta, Souza e Zirlis (2013)

Na Figura 11 observa-se ainda uma comparação entre padrões internacionais de deformação (quadrados verdes) e os dados da obra do hospital em análise (pontos vermelhos). Nesse caso, os valores obtidos estão dentro do padrão aceitável, ou seja, o deslocamento horizontal na crista deve estar entre 0,05% e 0,3% da altura escavada.

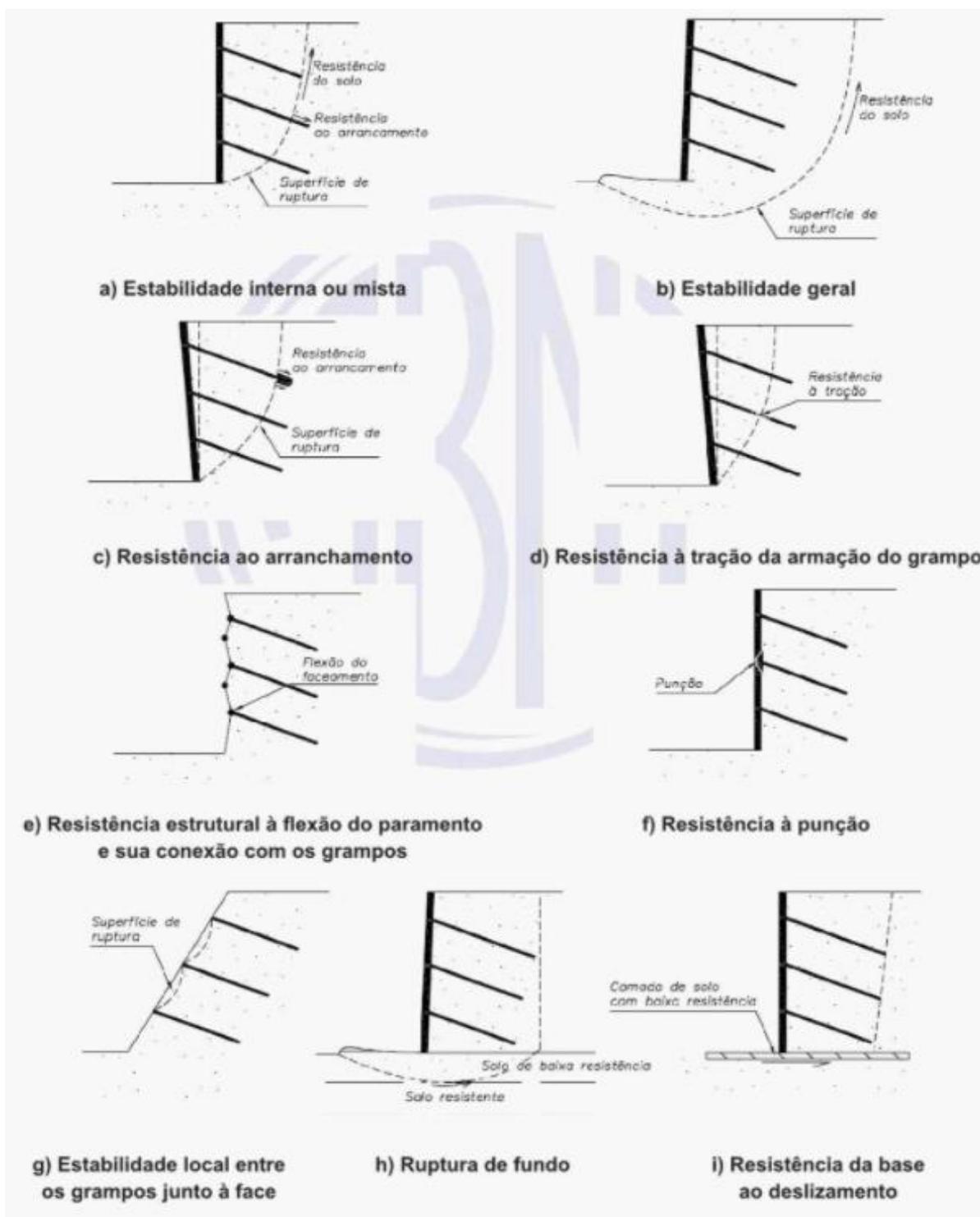
Pitta, Souza e Zirlis (2013) desenvolveram um sistema de medição das deformações (equação 1), chamado de extensômetro múltiplo. Um extensômetro se assemelha a um tirante, composto por 3 fios de 8 mm ancorados em pontos diferentes os quais possuem a cabeça livre, próxima a parede de concreto, onde são feitas as medições diariamente durante a execução da obra, em no mínimo 3 prumadas distintas.

De acordo com a norma ABNT NBR 16920, item 9.5, as seguintes verificações são necessárias no projeto de solo grampeado, conforme esquematizado na Figura 12: estabilidade interna ou mista com contribuição dos grampos; estabilidade geral; resistência ao arrancamento do grampo; resistência a tração da armação do grampo; resistência estrutural a flexão do paramento e sua conexão com os grampos; punção do paramento; estabilidade local entre os grampos junto a face; ruptura de fundo; resistência da base ao deslizamento.

No dimensionamento do solo grampeado, os seguintes parâmetros precisam ser avaliados: resistência ao arrancamento do grampo ou resistência da interface solo-

grampo ( $R_{Po}$ ), resistência a tração da armação do grampo ( $R_T$ ), resistência da conexão do grampo com o paramento ( $R_F$ ).

Figura 12 - Verificações necessárias no projeto de solo grampeado.



Para avaliação da resistência da interface solo-grampo há vários métodos propostos na literatura. Na prática, se costuma utilizar a chamada resistência ao arrancamento (ou resistência da interface solo-grampo; ou “pull out resistance”) por metro de grampo, chamada de  $R_{PO}$ . Para obter esse valor ( $R_{PO}$ ) basta multiplicar a resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) pela área lateral do grampo e dividir pelo comprimento do mesmo, ou seja:

$$R_{PO} = \frac{(\pi \cdot D_{perf} \cdot L) \times q_s}{L} \quad (\text{kN/m}) \quad (2)$$

onde:

$R_{PO}$  - resistência ao arrancamento (ou resistência da interface solo-grampo; ou “pull out resistance”) por metro de grampo (kN/m)

$D_{perf}$  - Diâmetro da perfuração ou grampo (m)

$L$  - comprimento do grampo (m),

$q_s$  - resistência ao arrancamento ou resistência da interface solo-grampo (kPa)

De acordo com o item 9.4 da norma ABNT NBR 16920, deve-se calcular a resistência da interface solo-grampo ( $q_s$ ) a partir de ensaios de arrancamento ou por estimativas semi-empíricas.

No ensaio de arrancamento (item A7 da norma ABNT NBR 16920), o valor de  $q_s$  é dado por:

$$q_s = \frac{T_{arranc}}{\pi \cdot D_{perf} \cdot L_i} \quad (\text{kPa}) \quad (3)$$

onde:

$T_{arranc}$  - carga máxima obtida no ensaio de arrancamento (kN)

$D_{perf}$  - Diâmetro da perfuração ou grampo (m)

$L_i$  - comprimento do grampo injetado (m), descontando o trecho livre

$q_s$  - resistência ao arrancamento ou resistência da interface solo-grampo (kPa)

Ortigão e Palmeira (1997), citados por Silva (2009), executaram ensaios de arrancamento em furos com diâmetros entre 75 e 150 mm com injeção de calda de cimento sem pressão, nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Brasília. A partir desses, os autores propuseram a seguinte equação que correlaciona  $N_{SPT}$  (índice de

resistência a penetração do amostrador) e resistência da interface solo-grampo ( $q_s$ ), em kPa:

$$q_s = 50 + 7,5 \cdot \ln(N_{SPT}) \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

Springer (2006), apresenta uma outra formulação empírica, onde o valor da resistência da interface solo-grampo ( $q_s$ ) é dada pela seguinte equação, em kPa, e é função do valor do  $N_{SPT}$  ao longo do comprimento do grampo :

$$q_s = 45,12 \times \ln(N_{SPT}) - 14,99 \quad (\text{kPa}) \quad (5)$$

A resistência a tração da armação do grampo ou “tensile resistance” ( $R_T$ ), de acordo com o item 9.1 da norma ABNT NBR 16920, deve ser calculada para barras de aço, utilizando a seguinte equação:

$$R_T = A_{\text{útil}} \times f_{yk} \quad \text{em KN} \quad (6)$$

$$A_{\text{útil}} = \left( \frac{\pi \times D_{\text{barra}}^2}{4} \right) \quad \text{em m}^2$$

onde:

$A_{\text{útil}}$  - área da seção transversal da barra de aço que pode ser assegurada durante toda a vida útil da obra. Isso significa que o diâmetro da barra pode ser menor que o nominal, quando se leva em conta a corrosão que o material pode sofrer.

$f_{yk}$  - tensão de escoamento característica do aço, em KPa

$R_T$  - carga resistente característica a tração da armação do grampo, em KN

A resistência da conexão ou interface entre o grampo e o paramento ( $R_F$ ), chamada de “facing resistance” pode ser calculada, pela equação 7, que foi adaptada do manual técnico da FHWA (2015):

$$R_F = \min(R_T; R_{PO} \cdot L) \cdot (0,6 + 0,2(S_{max} - 1)) \quad (\text{kN}) \quad (7)$$

onde:

L - comprimento do grampo (m)

$S_{max}$  - espaçamento máximo entre grampos (m)

$R_T$  - resistência a tração da armação do grampo (kN)

$R_{PO}$  - resistência ao arrancamento do grampo (kN/m)

De acordo com Gondim (2018), outras especificações de projeto referentes ao espaçamento entre os grampos, comprimento e ângulo de inclinação dos chumbadores foram recomendadas em FHWA-NHI-14-007 (2015) e Clouterre (1991). Assim, o espaçamento vertical ( $S_v$ ) e horizontal ( $S_h$ ) devem ser bem próximos, com valores entre 1,20m e 1,80m. O ângulo de inclinação dos grampos ( $\alpha_g$ ) deve estar entre 10 e 20 graus com a horizontal. O comprimento do grampo ( $L$ ) deve estar entre  $0,5H$  e  $1,2H$ , onde  $H$  é a altura da escavação.

Para avaliar a estabilidade interna do solo grampeado, a ABNT NBR 16920, item 9.8, considera 3 modos de ruptura em cada camada de reforço: ruptura por arrancamento do grampo por insuficiência de comprimento ancorado; ruptura estrutural por tração no ponto de atuação da força de tração máxima; ruptura da conexão do grampo com o paramento. Recomenda também que o Fator de Segurança para a estabilidade interna deve ser maior ou igual a 1,5 para todas as linhas de reforço.

Para calcular os esforços solicitantes na verificação da estabilidade interna a norma ABNT NBR 16920 sugere, como um dos métodos, dividir o maciço de solo grampeado em duas zonas: ativa e resistente (passiva), conforme Figura 13. A zona ativa é mantida estável pelos elementos de reforço ancorados na zona passiva ou zona resistente. Entretanto, os tipos e posição da superfície de ruptura dependem da geometria, carga aplicada, resistência e deformabilidade do solo e do grampo. Dessa forma, a superfície de ruptura pode ser linear, poligonal, circular, espiral log, cabendo ao projetista a definição daquela que melhor se adequa ao caso em estudo.

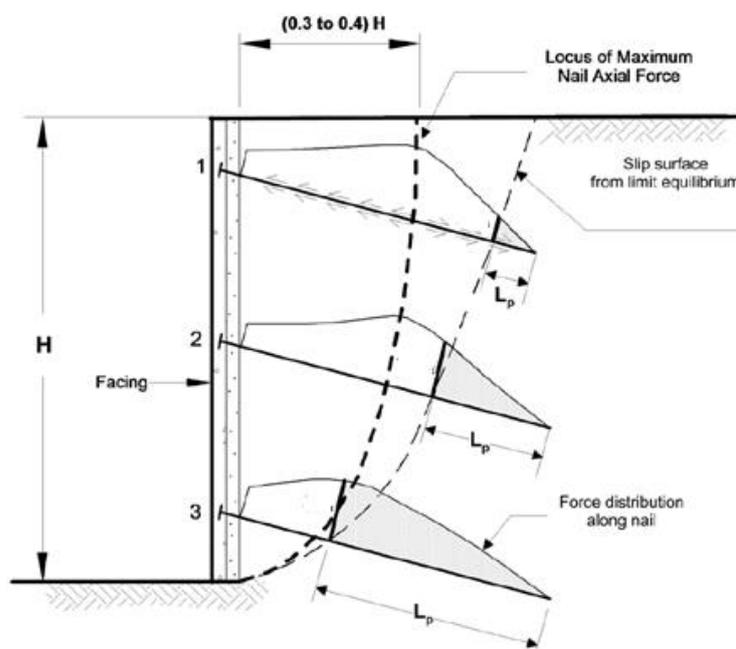
Figura 13 - Definição das zonas ativa e passiva em solo grampeado



Fonte: ABNT NBR 16920

De acordo com Lima (2007) a posição da força máxima de tração ( $T_{\max}$ ) não coincide com superfície de ruptura, conforme pode ser observado na Figura 14. Para cortes verticais, observações de campo, fornecem as seguintes posições para  $T_{\max}$ : na parte superior do solo grampeado  $0,30H$  a  $0,40H$  da face (Mitchell, 1987; Clouterre, 1991, apud LIMA, 2007); na parte inferior  $0,15H$  e  $0,2H$  da face (Byrne et al. 1998, apud LIMA, 2007).

Figura 14 - Posição da superfície de ruptura e da posição onde ocorre  $T_{\max}$



Fonte: FHWA, 2015, modificado

Verifica-se, portanto, que a avaliação dos esforços solicitantes em cada linha ou camada de reforço, não é uma tarefa simples. A título de exemplo, em termos práticos a força axial máxima, para solos grampeados com paramento vertical, nos

2/3 superiores da parede, pode ser definida para um valor normalizado de 0,75, conforme a expressão (Lazarte et al., 2003 apud LIMA, 2007):

$$T_{\text{máx}} = 0,75 \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot s_h \cdot s_v \quad (8)$$

onde:

$T_{\text{máx}}$  – solicitação axial máxima no grampo (kN)

$K_a$  - coeficiente de empuxo ativo

$\gamma$  - peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>)

$H$  - altura da escavação (m)

$s_h$  e  $s_v$  - espaçamento horizontal e vertical entre os grampos (m)

Para o terço inferior, o valor de  $T_{\text{máx}}$  decresce consideravelmente a aproximadamente, 50% do valor da parte superior.

Quanto a força de conexão do grampo com o paramento ( $T_0$ ), a norma ABNT NBR 16920 item 9.2 recomenda que se indique no projeto o modelo de cálculo usado para a mesma. Para o cálculo da força de tração na cabeça do grampo ( $T_0$ ), o manual técnico da FHWA (2015), baseado em Lazarte et al. (2003), recomenda que se utilize a seguinte equação

$$T_0 = T_{\text{máx-s}} \cdot [0,6 + 0,2 (s_{\text{máx}} - 1)] \quad (9)$$

onde:

$T_{\text{máx-s}}$  - força de tração máxima obtida a partir dos resultados de análises de estabilidade globais utilizando um programa computacional (kN)

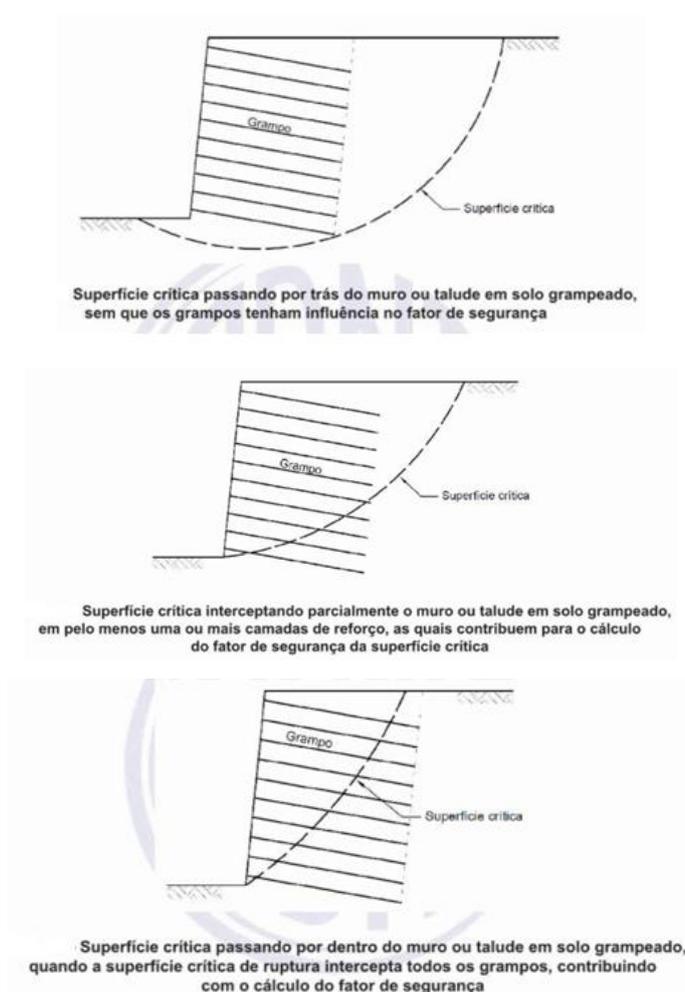
$s_{\text{máx}}$  - máximo espaçamento entre grampos (maior valor entre  $s_v$  e  $s_h$ , em metros).

$T_0$  – solicitação axial na cabeça do grampo (kN)

Esta recomendação baseia-se nas sugestões iniciais apresentadas pelo projeto Clouterre (1991). Experimentalmente, Byrne et al. (1998) apud FHWA (2015) verificaram que a força de tração na cabeça do grampo ( $T_0$ ) equivale a 60% a 100% da força de tração máxima ( $T_{\text{máx}}$ ).

Quanto a verificação da estabilidade geral do talude com solo grampeado, a norma ABNT NBR 16920, afirma que ela pode ser baseada no cálculo do fator de segurança global por métodos que utilizam a “teoria do equilíbrio-limite”. No item 2.5 dessa revisão bibliográfica, estão apresentados os principais métodos de análise de estabilidade utilizados na prática. Deve-se analisar as superfícies potenciais de ruptura: aquelas que não interceptam os elementos de reforço, aquelas que interceptam parcialmente ou ainda aquelas que interceptam totalmente os elementos de reforço (veja Figura 15). Se faz necessário encontrar a superfície crítica, ou seja, aquela que apresenta o menor Fator de Segurança. As tabelas do anexo B da norma ABNT NBR 16920 apresentam valores mínimos do Fator de Segurança relacionados a perda de vidas humanas, danos materiais e ambientais. Verifica-se que os valores do FS variam entre 1,5 e 1,2.

Figura 15 - Superfícies potenciais de ruptura de taludes com solo grampeado

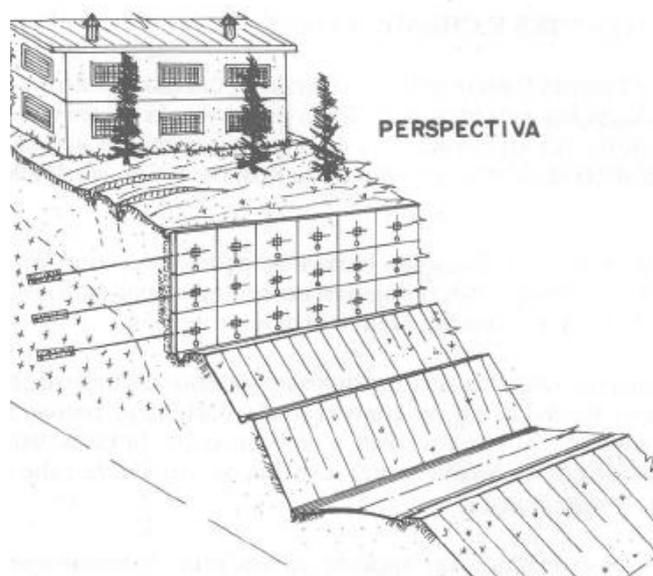


Fonte: ABNT NBR 16920

## 2.4 SISTEMA DE CONTENÇÃO DE TALUDES EM CORTINA ATIRANTADA

Segundo Ranzini e Negro Jr. (1998), cortinas são contenções ancoradas ou apoiadas em outras estruturas e se caracterizam pelas pequenas deslocabilidades. É um tipo de sistema que demanda mão de obra especializada, elevada movimentação de terra e os materiais utilizados contribuem para que a cortina atirantada seja um sistema mais oneroso se comparado com outras soluções usuais. Por isso, é adequada para projetos de grande altura, conforme exemplificado na Figura 16, de contenções em que há altas cargas de empuxo. A vantagem desse sistema é que possui pequena deslocabilidade e elevados fatores de segurança.

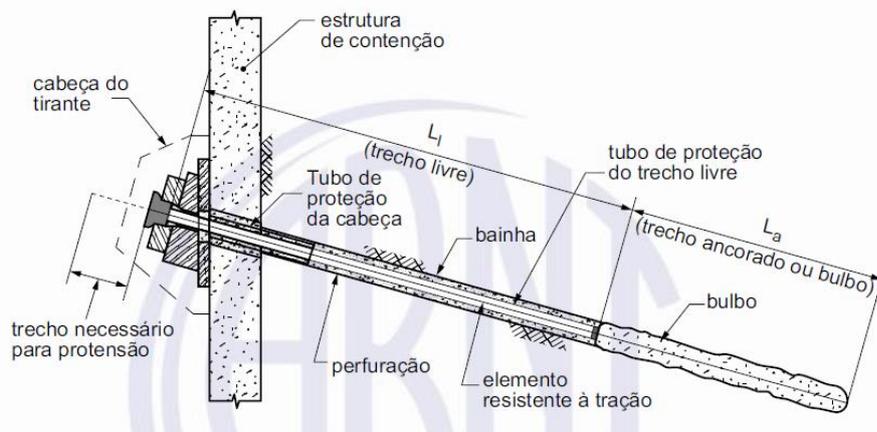
Figura 16 - Vista em perspectiva de aplicação de cortina atirantada



Fonte: IPT (1991)

As cortinas são ancoradas com tirantes protendidos com uma carga de trabalho adequada ao projeto e transmitem o esforço externo de tração para o solo em volta. Usualmente, um tirante é composto por um trecho protendido e um trecho livre, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Componentes de um tirante



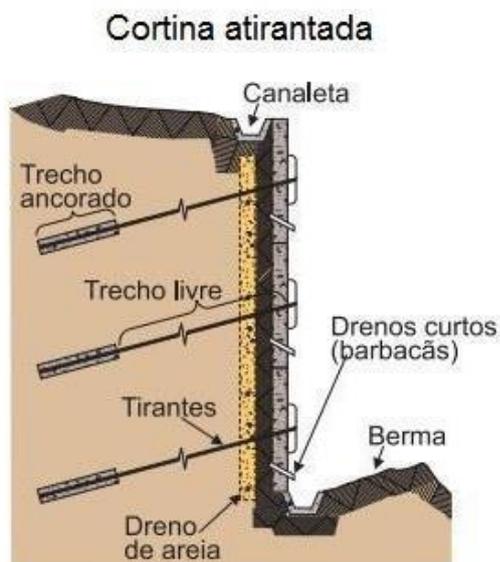
Fonte: ABNT NBR 5629 (2018)

Além do trecho livre e do bulbo, localizados no interior do talude, a cabeça do tirante e o trecho necessário para protensão se encontram na face externa do talude, junto a estrutura de contenção, conforme indicado na Figura 17.

O elemento resistente a tração pode ser constituído por fios, cordoalhas ou barras de aço e o cimento empregado na injeção dos tirantes deve ter um fator água/cimento ( $a/c$ ) de 0,5 (ABNT NBR 5629).

Nesse sistema também é necessário a implantação de drenos e canaletas para o escoamento adequado da água percolada no solo (MAGALHÃES e AZEVEDO, 2016). Na Figura 18 estão mostrados os detalhes citados.

Figura 18 - Detalhamento dos elementos da cortina atirantada



Fonte: Talus Engenharia (2020)

É importante destacar que a cortina atirantada pode interferir nos terrenos adjacentes à obra, pois os tirantes podem provocar recalques e sua fixação no solo pode gerar esforços horizontais e levantamento do terreno (MAGALHÃES e AZEVEDO, 2016; SAES, STUCCHI e MILITTISKY, 1998).

#### **2.4.1 Procedimentos executivos e aplicabilidade da técnica**

Para a execução dos tirantes, a ABNT NBR 5629 recomenda que estes tenham proteção anticorrosiva, além de dispositivos que garantam um mínimo de cobrimento da calda de cimento, de acordo com o estabelecido em projeto.

Quanto ao diâmetro da perfuração, deve haver um cobrimento mínimo de 1 cm para aglutinantes compostos por argamassa ou nata de cimento, que pode ser garantido com o uso de espaçadores. As paredes dos furos devem permanecer estáveis, para isso usa-se revestimento ou fluido estabilizante. Além disso, a perfuração do talude deve ser feita de maneira a minimizar impactos em estruturas vizinhas.

A injeção do tirante, ou trecho do bulbo, pode ser composta por calda de cimento ou outro aglutinante, e pode ser feito em uma única etapa ou em várias etapas. No caso da utilização da calda de cimento, deve-se usar a dosagem a/c de 0,5 para a execução da bainha e dosagem entre 0,5 e 0,7 para execução de reinjeção.

Após o preenchimento do bulbo e realização de ensaios de desempenho, o trecho livre deve ser preenchido através da injeção de calda de cimento ou outro fluido adequado.

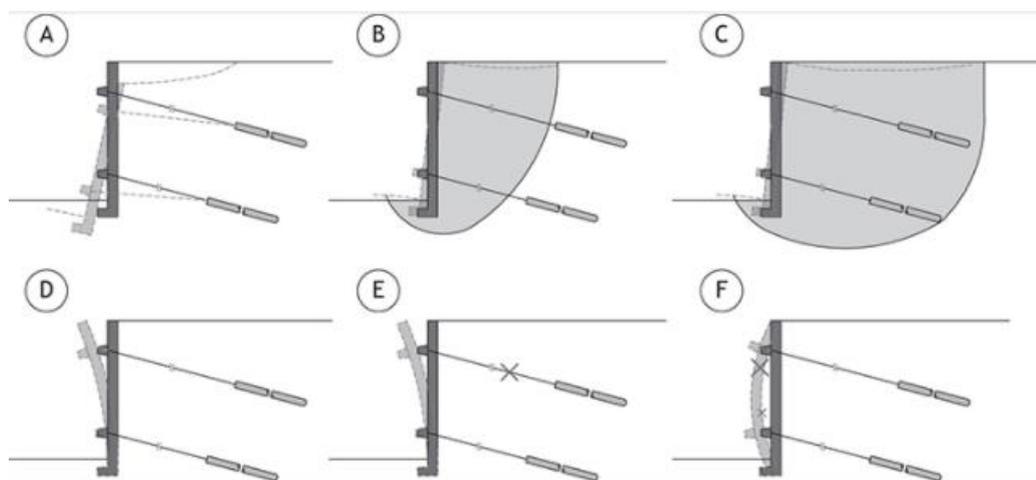
Por fim, para a cabeça do tirante, deve haver uma proteção de concreto, argamassa ou outro material que garanta recobrimento de 5 cm de todo o componente metálico.

#### **2.4.2 Verificações ou recomendações necessárias para um projeto adequado**

De acordo com Gerscovich, Danziger e Saramago (2016), citando o Manual Técnico de Encostas GeoRio (2014), os tipos de ruptura que podem ocorrer em uma cortina atirantada, e que estão esquematizadas na Figura 18, são: A) ruptura da

fundação, B) e C) ruptura do talude D) deformação excessiva, E) ruptura dos tirantes F) ruptura do painel.

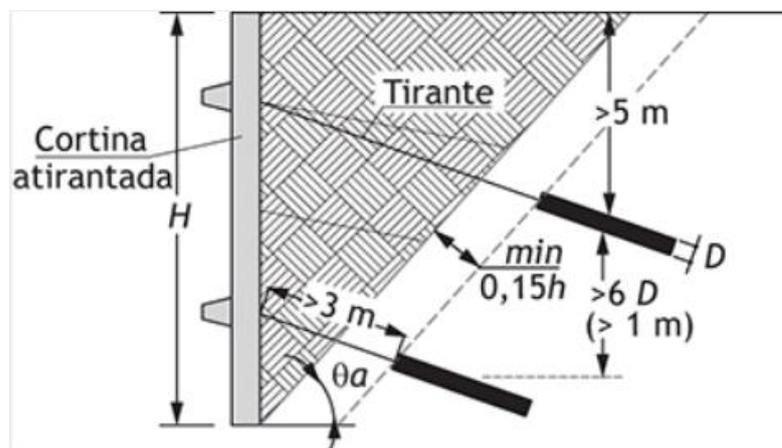
Figura 19 – Modos de ruptura de uma cortina atirantada



Fonte: Geo Rio, 2014 apud Gerscovich, Danziger e Saramago, 2016.

Outras recomendações para elaboração de projeto que devem ser atendidas são as seguintes (Pinelo, 1980 apud Gerscovich, Danziger e Saramago, 2016): o bulbo (trecho ancorado) deve estar a, no mínimo, 3m de distância a face do paramento (item 5.5.1 ABNT NBR 5629). O início do bulbo deve distar, no mínimo, 15% da altura do talude ( $0,15H$ ) em relação a superfície de ruptura crítica prevista; o centro do bulbo deve estar, no mínimo, 5m abaixo do nível do terreno; o espaçamento entre os bulbos deve ser maior que 1m e maior que seis vezes o diâmetro de perfuração. Veja Figura 20.

Figura 20 – Recomendações para projeto de cortina atirantada



Fonte: Pinelo, 1980 apud Gerscovich, Danziger e Saramago, 2016

Ainda segundo os mesmos autores, o ângulo de inclinação dos tirantes ( $\alpha_t$ ) com a horizontal, deve estar entre 15 e 30 graus, para facilitar o processo executivo de injeção. Quanto a espessura da parede de concreto, ela é definida por projeto estrutural, em função do puncionamento e dos momentos fletores ao longo do painel, ficando geralmente com valores entre 20 e 40cm. Quanto as juntas de dilatação, elas geralmente acompanham o comprimento dos painéis, que variam entre 5m e 15m.

A norma ABNT NBR 5629 faz as seguintes recomendações para os tirantes: a calda de cimento com fck mínimo de 25MPa (item 4.4.3) e fator água/cimento menor ou igual a 0,5 para a bainha e  $0,5 < A/C < 0,7$  para as reinjeções (item 5.6.3).

Ainda de acordo com essa norma, a carga de trabalho do tirante pode ser obtida multiplicando-se a tensão admissível a tração pela área da seção transversal do aço do tirante. A tensão admissível a tração para tirantes permanentes (item 4.5.2.1) deve ser calculada como:

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk} \cdot 0,9}{1,75} \quad (10)$$

onde:

$\sigma_{adm}$  - tensão admissível a tração da armação (aço) do tirante (MPa)

$f_{yk}$  - tensão de escoamento característica do aço

0,9 x  $f_{yk}$  - carga máxima do ensaio de tração, com fator redutor de 0,9

FS = 1,75 - Fator de Segurança usado para minorar a resistência

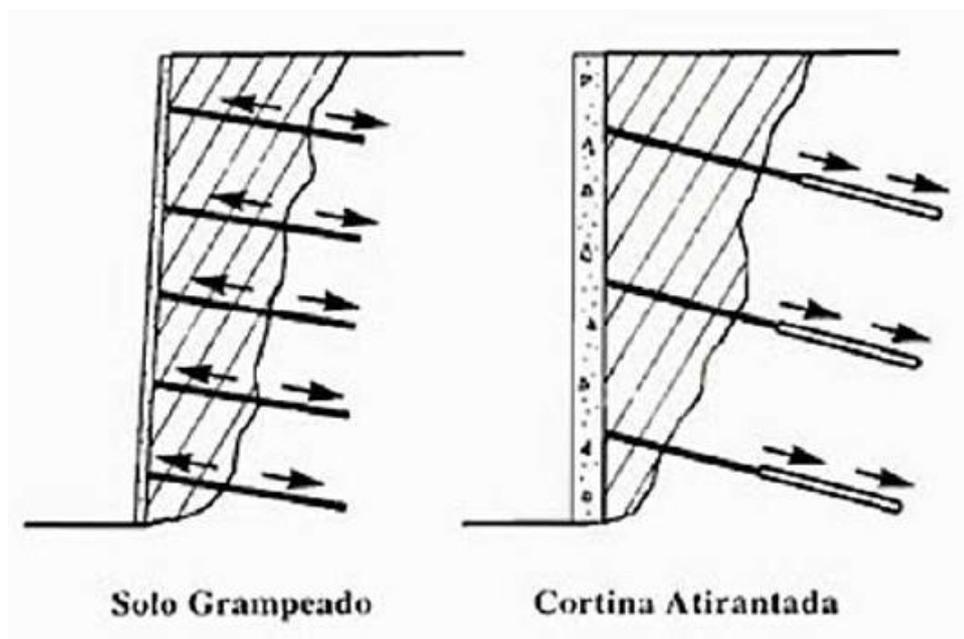
Para o caso do dimensionamento do comprimento do trecho ancorado, essa mesma norma, no item 4.5.3, recomenda a utilização de métodos teóricos e semi-empíricos divulgados na literatura técnica. Detalhes sobre procedimentos executivos dos tirantes e de ensaios de qualificação e recebimento também estão detalhados nessa norma.

No cálculo da estabilidade geral, a norma ABNT NBR 5629 (anexo B2.2) adota a mesma tabela da norma de solo grampeado (ABNT NBR 16920), que apresenta a variação do valor do Fator de Segurança, conforme a possibilidade de perdas humanas, ambientais e econômicas (FS varia entre 1,2 e 1,5).

## 2.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS TÉCNICAS

As duas técnicas são importantes, de acordo com Abramento, Koshima e Zirlis (1998) para reforço e estabilização de taludes e escavações *in situ*. A diferença entre as duas é que a cortina atirantada melhora a estabilidade do maciço através de uma força externa e o solo grampeado utiliza a resistência ao cisalhamento próprio do solo para estabilizá-lo. O solo grampeado tem como componente os chumbadores, que são responsáveis pelo trabalho inicial passivo, já a cortina atirantada tem como componente principal o tirante, que realiza um trabalho ativo sobre o solo. Os tirantes não deformam o maciço inicialmente, devido estes estarem previamente protendidos. Já os chumbadores geram deformações, numa ordem de grandeza muito inferior as dimensões do maciço, para que realizem trabalho sobre o solo e assim fiquem aderidos nele ao longo de todo o comprimento do chumbador. É possível notar, na Figura 21, como os chumbadores ficam aderidos ao solo ao longo do seu comprimento total, enquanto que no tirante, as tensões atuam na região em que este foi protendido.

Figura 21 - Interação dos componentes dos sistemas com o solo



Fonte: Abramento, Koshima e Zirlis (1998)

Abramento, Koshima e Zirlis (1998) destacam também, que é necessário um número maior de chumbadores por  $m^2$  de talude, entre 0,5 e 6 unidades, do que a quantidade de tirantes, entre 0,10 e 0,25 unidades. Em compensação, se um

chumbador apresentar falhas, não gera grandes riscos para o sistema em sua totalidade, ao contrário dos tirantes defeituosos, que podem acrescentar 65% de carga nos tirantes adjacentes. O comprimento dos tirantes é de 3 a 5 vezes maior que o dos chumbadores, devido a isso os equipamentos para inserção dos tirantes são de maior porte.

França (2007) evidencia que os solos grampeados são recomendados para rupturas de pequenas profundidades e o emprego de cortinas atirantadas é indicado para maciços com superfícies de ruptura profunda.

Além disso, de acordo com Abramento, Koshima e Zirlis (1998), os tirantes estão mais suscetíveis à corrosão, pois estão sujeitos ao efeito da corrosão sob tensão, ou *stress corrosion*, e por isso precisam de tratamento especial antes da inserção no solo. No entanto, para os dois casos, é necessário dar atenção a esse fenômeno, deve-se portanto, verificar as recomendações das normas ABNT NBR 5629 e NBR 16920.

Ortigão, Palmeira e Zirlis (1995), afirmam que o concreto projetado na face do talude de solo grampeado não tem função estrutural, já para a cortina atirantada há uma interação entre os tirantes e os esforços gerados na face do talude. Por isso, a espessura da face de concreto no solo grampeado tem um valor próximo 0,15 metros e na corta atirantada essa espessura é da ordem de 0,2 a 0,4 metros. Além disso, os tirantes tem comprimento livre, ao contrário dos chumbadores, que transmitem forças de tração contra o solo ao longo de todo o seu comprimento.

De acordo com Pitta, Souza e Zirlis (2013), a técnica de solo grampeado, possui vantagens como velocidade de execução, ganho de espaço, capacidade de adaptação a diversas situações geométricas, ajuste a reentrâncias e pode ser executado em paredes curvas ou de diversos ângulos. É um sistema que dá maior segurança na aplicação se comparado com a cortina atirantada, pois tem maior intervalo de tolerância a imprecisões na aplicação dos chumbadores. Também se mostra como um sistema muito drenante, pois diferente da cortina atirantada, não funciona como interceptor, ou seja, não promove a subida do lençol freático.

Em relação ao aspecto econômico, Magalhães e Azevedo (2016) afirmam que soluções com solo grampeado são bastante econômicas em diferentes alturas de contenções, sendo portanto uma das técnicas com menor custo linear. Já a cortina atirantada é uma das técnicas mais onerosas existentes, se mostrando inviável para obras com baixa altura de talude, porém aplicável para obras de grande altura, pois é

uma técnica que resiste a elevados carregamentos com pequena deslocabilidade e proporciona elevados fatores de segurança, sendo portanto um investimento justificável.

É importante salientar que os sistemas de estabilização e de contenção de taludes analisados, assim como as demais existentes, devem estar de acordo com a norma ABNT NBR 11682 (2009), pois a mesma trata sobre estabilidade de encostas e taludes, da necessidade da investigação do terreno, da elaboração do diagnóstico da situação, do que é preciso para concepção do projeto básico, projeto executivo, execução, avaliação de desempenho e conservação da obra.

## 2.6 MÉTODOS DE CÁLCULO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

Os métodos mais comumente utilizados na avaliação da estabilidade de taludes em maciços terrosos usam o conceito da “teoria do equilíbrio limite”, que considera a que a ruptura do talude ocorre quando as tensões atuantes (ou esforços solicitantes ou forças instabilizadoras) se igualam as tensões resistentes (ou resistência do solo ou forças estabilizadoras).

Segundo Dutra (2013), dentro da “teoria do equilíbrio limite”, o método das fatias, ou das lamelas, é o mais utilizado. No método das lamelas, a parte potencialmente deslizante, que fica acima da superfície de ruptura, que geralmente tem a forma circular, é dividida em lamelas, para que sejam determinados as forças atuantes (esforços solicitantes, forças instabilizadoras) e as forças resistentes (estabilizadoras) sobre a superfície de ruptura (VILAR; BUENO, 2004).

Nesta seção, foi realizado um resumo sobre os principais métodos de análise de estabilidade de taludes que admitem superfície circular de ruptura. Foram apresentadas as principais diferenças entre esses métodos.

### 2.6.1 Fator de Segurança

Todos os métodos analisados neste trabalho utilizam o fator de segurança global (FS) como referência para determinar a estabilidade dos taludes. É um tipo de abordagem chamada de método determinístico, porque estabelece um valor

determinado valor para o FS, ou seja, a medida da estabilidade do talude deve ser feita em termos de FS (GEORIO, 2000).

Nos métodos que utilizam lamelas, com superfície de ruptura circular, e escorregamento rotacional, o fator de segurança, segundo Vilar e Bueno (2004), é a razão entre o somatório dos momentos resistentes, oriundos das forças que favorecem o equilíbrio do maciço, e dos momentos atuantes, originados das forças que provocam o deslizamento, conforme explicitado na equação seguinte.

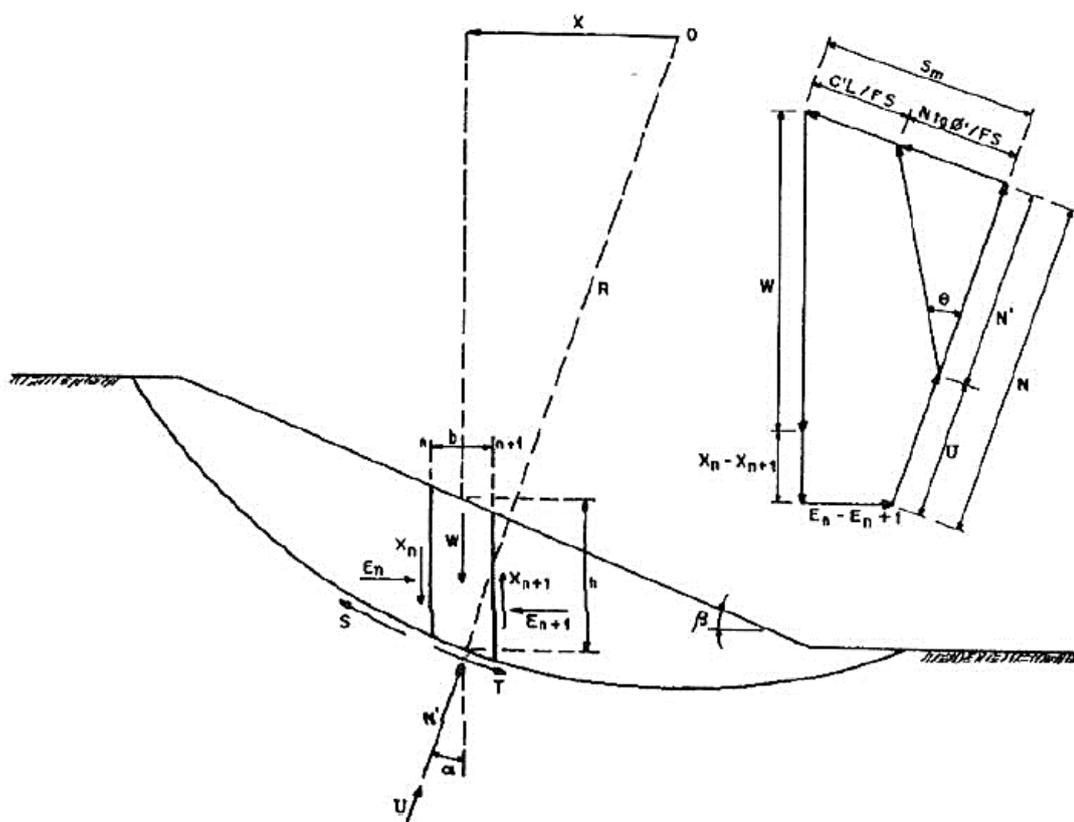
$$FS = \frac{\sum \text{momentos resistentes}}{\sum \text{momentos atuantes}} \quad (11)$$

Os autores afirmam que, se a razão da equação 11 for maior que 1, significa que o maciço se encontra em situação de estabilidade. Entretanto, na prática da engenharia geotécnica, para aumentar a segurança contra a ruptura dos taludes, devido a imprecisões na avaliação dos momentos solicitantes e resistentes, adota-se valores maiores de FS, que é tanto maior quanto maior for a possibilidade de ocorrer os danos pessoais, materiais e ambientais.

### 2.6.2 Método de Fellenius

Segundo Vilar e Bueno (2004), o método de Fellenius desconsidera a interação entre as lamelas, ou seja, as forças perpendiculares e tangenciais atuantes na lateral de cada lamela são iguais em módulo e possuem sentidos opostos, o que anula seus efeitos sobre o trecho analisado. Na Figura 22 são mostradas as forças atuantes em cada lamela.

Figura 22 – Forças atuantes nas lamelas, método de Fellenius



Fonte: Vilar e Bueno (2004)

A forças mostradas na Figura 22 são:

$E_n$ ,  $E_{n+1}$  – resultantes das forças horizontais (perpendicular a lateral de cada lamela) atuantes nas seções  $n$  e  $n + 1$ , respectivamente;

$X_n$ ,  $X_{n+1}$  – resultantes das forças cisalhantes (tangente a lateral de cada lamela) que atuam nas seções  $n$  e  $n + 1$ , respectivamente;

$W$  – peso total da lamela;

$N$  – força normal atuante na base da lamela;

$b$  – largura da lamela;

$h$  – altura da lamela;

$\alpha$  – ângulo da normal  $N$  com a vertical;

$x$  – distância do centro do círculo ao centro da lamela;

$R$  – raio do círculo.

$U$ : resultante da poropressão na base da lamela,  $U=u \cdot b \cdot 1$

$T$ : componente tangencial da força  $W$ , na base da lamela

$N$ : componente normal da força  $W$ , na base da lamela

$\beta$  – ângulo de inclinação do talude com a horizontal

Com essas forças, é possível determinar os momentos atuantes em cada lamela. Assim o momento atuante é dado pela equação 12:

$$Ma = \sum(W \cdot x) = R \cdot \sum_{i=1}^n (W \cdot \text{sen } \alpha) \quad (12)$$

Já o momento resistente, que depende da resistência ao cisalhamento na base de cada lamela, é mostrado na equação 13:

$$Mr = S \cdot R = R \cdot \sum_{i=1}^N [b_0 \cdot (c' + \sigma' \cdot \text{tg} \phi')] = R \sum_{i=1}^N [(c' \cdot b_0 + N' \cdot \text{tg} \phi')] \quad (13)$$

onde:

$$b_0 = b / \cos \alpha$$

$c'$ : coesão efetiva na base da lamela

$\phi'$ : atrito efetivo na base da lamela

$\sigma'$ : tensão efetiva na base da lamela,  $\sigma' = N' / b_0$

A força na direção normal à lamela é dada pela equação seguinte:

$$N' = N - U = W \cos \alpha - U \quad (14)$$

Substituindo as equações anteriores na equação 13, é possível obter o Fator de Segurança pelo método de Fellenius, considerando-se as influências dos momentos atuantes e resistentes em cada lamela:

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot b_0 + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot b_0) \cdot \text{tg} \phi']}{\sum W \cdot \text{sen} \alpha} \quad (15)$$

O método de Fellenius é um dos mais conservadores (ou menos rigorosos), devido considerar que as resultantes das forças laterais (perpendicular e tangente as laterais das lamelas) são colineares e de igual intensidade e portanto, se anulam (VILAR; BUENO, 2004).

Os autores ressaltam que, caso haja qualquer esforço externo ao talude, como por exemplo sobrecargas no nível do terreno, deve-se adicioná-lo no somatório

dos momentos. Também a presença de grampos e/ou tirantes influencia no aumento das forças resistentes. É claro que essa contribuição somente irá ocorrer se o grampo ou tirante ultrapassar a superfície de ruptura.

### 2.6.3 Método de Bishop

O método de Bishop, segundo Vilar e Bueno (2004), é semelhante ao método de Fellenius, na análise do maciço em lamelas. A diferença está no fato que o método de Bishop considera a interação entre as lamelas. Assim, o valor de  $N'$  é obtido através do somatório de forças na direção vertical, mostrados anteriormente na Figura 22.

$$N' = N - u \cdot bo$$

$$N' = \frac{W + (x_n - x_{n+1}) - \left( u \cdot \cos\alpha + \frac{c'}{FS} \cdot \text{sen}\alpha \right) \cdot bo}{\cos\alpha + \text{sen}\alpha \cdot \frac{\text{tg}\phi'}{FS}} \quad (16)$$

Sabendo que

$$x = R \cdot \text{sen}\alpha \quad \text{e que} \quad bo = b \cdot \text{sec}\alpha$$

Calcula-se o Fator de Segurança do método de Bishop, mostrado na equação seguinte, considerando-se as influências dos momentos atuantes e resistentes em cada lamela:

$$FS = \frac{1}{\sum W \text{sen}\alpha} \sum [c' \cdot b + \text{tg}\phi' (W - u \cdot b + x_n - x_{n+1}) / M_\alpha] \quad (17)$$

Onde

$$M_\alpha = \cos\alpha + \text{sen}\alpha \cdot \frac{\text{tg}\phi'}{FS} \quad (18)$$

Os valores de  $x_n - x_{n+1}$  são determinados por aproximações sucessivas e devem satisfazer a equação 16:

$$\sum(x_n - x_{n+1}) = 0 \quad (19)$$

Analisando o equilíbrio de forças na direção tangencial, tem-se a equação 20:

$$S = (W + x_n - x_{n+1}) \cdot \text{sen}\alpha + (E_n - E_{n+1}) \cdot \text{cos}\alpha \quad (20)$$

Da expressão 20, é possível obter o valor do somatório:

$$\sum(E_n - E_{n+1})$$

Segundo os autores, ao se fazer aproximações sucessivas, e atender as condições impostas, faz-se a análise de estabilidade do talude. Deve-se observar que nesse método, a soma das componentes tangenciais (verticais, ou seja  $X_i$ ) nas laterais da lamelas se anulam, mas a soma das componentes perpendiculares (horizontais, ou seja  $E_i$ ) não se anulam.

#### 2.6.4 Método de Bishop Simplificado

No método de Bishop simplificado, segundo Vilar e Bueno (2004), consideram-se nulos os somatórios de ambas as componentes tangenciais (verticais,  $X_i$ ) e perpendiculares (horizontais,  $E_i$ ) nas laterais das lamelas, ou seja :

$$\sum(x_n - x_{n+1}) = 0 \quad (21)$$

$$\sum(E_n - E_{n+1}) = 0 \quad (22)$$

Com as equações anteriores, pode-se expressar de uma nova maneira, explicitada na equação 23:

$$FS = \frac{1}{\sum W \text{sen}\alpha} \left[ c' \cdot b + \frac{\text{tg}\phi' \cdot (W - u \cdot b)}{M_\alpha} \right] \quad (23)$$

O valor de  $M_\alpha$  da equação 23 é igual ao mostrado na equação 18. Segundo os autores,  $M_\alpha$  depende de FS, e por isso, faz-se necessário arbitrar valores para FS. É costume se arbitrar o primeiro FS igual ao obtido pelo método de Fellenius. Quando  $FS_{arb}$  for igual ao FS calculado pelo método de Bishop, chegou-se ao final dos cálculos.

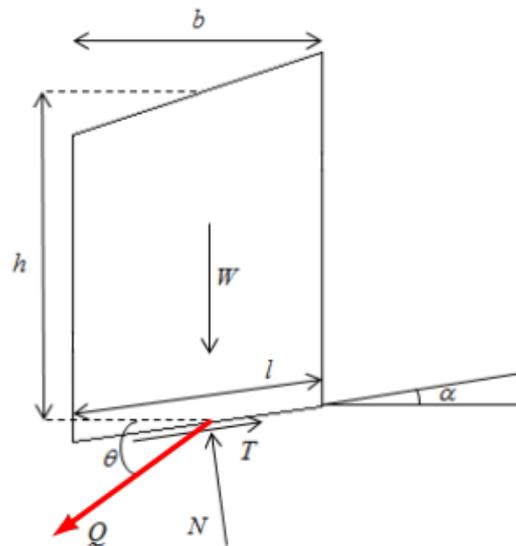
Os autores recomendam a divisão do talude em 10 lamelas, pois fracionar o talude em quantidades maiores do que esta não contribui significativamente na precisão do método.

Para cada par de valores de centro e raio da superfície de ruptura é gerado um valor de FS. Assim, o valor crítico (menor Fator de Segurança) será obtido após verificar vários raios com o mesmo centro e vários centros para as superfícies de rupturas. Para cada centro tem-se o raio com o menor FS. Nos projetos de engenharia civil, é necessário verificar os possíveis danos materiais, pessoais e ambientais, com isso se estabelece o FS menor aceitável, é comum se trabalhar com FS é igual a 1,5. (VILAR; BUENO, 2004).

### **2.6.5 Método de Spencer**

O método de Spencer, segundo Ferreira (2012), foi apresentado em 1967, sendo considerado um método rigoroso, pois considera todas as equações de equilíbrio atuantes na lamela. Neste método, as forças de interação entre as fatias (X e E) são substituídas por uma resultante equivalente, representada pela letra Q, que atua no ponto médio da base da lamela, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Forças atuantes em uma lamela no método de Spencer



Fonte: Ferreira (2012)

A força  $Q$  é obtida das equações de equilíbrio de forças atuantes na lamela e equivale a equação 24:

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot b \cdot \operatorname{cosec} \alpha}{FS} + \frac{(W \cos \alpha - u \cdot b \cdot \operatorname{cosec} \alpha) \operatorname{tg} \phi'}{FS} - W \operatorname{sen} \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \phi' \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \theta)}{FS}\right)} \quad (24)$$

Onde  $\theta$  é a inclinação da resultante  $Q$  com a direção horizontal, em cada lamela.

Se a soma dos momentos das forças externas é nula em relação a um ponto, o autor indica que o mesmo ocorre com os momentos envolvendo a força  $Q$ , conforme mostrado na equação 25:

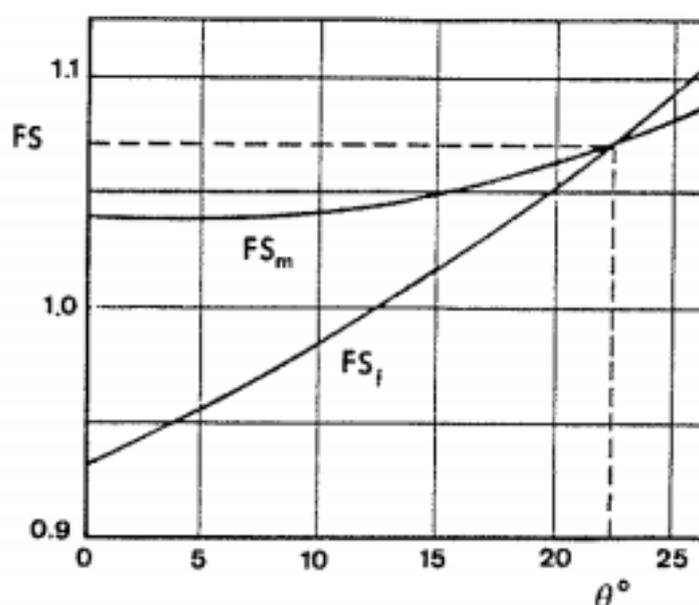
$$\sum(Q \cdot R \cdot \cos(\alpha - \theta)) = 0 \quad (25)$$

Sendo  $R$  o raio da superfície de deslizamento.

O autor propõe considerar raio constante, forças externas em equilíbrio, e dessa forma, tem-se que o valor de  $\sum Q$ ,  $Q$  vetorial, é nulo. Considerando ainda que as resultantes das forças de interação são paralelas, os valores dos ângulos  $\theta$  não

variam ao longo do talude. Dessa forma, arbitrando o valor ângulo  $\theta$ , é possível obter os valores do  $FS_f$  (fator de segurança relativo ao equilíbrio de forças) e do  $FS_m$  (fator de segurança relativo ao equilíbrio dos momentos). De posse desses valores,  $FS_f$  e  $FS_m$  calculados, e do ângulo  $\theta$  arbitrado, é plotado um gráfico como exemplificado na Figura 23. Variando-se o valor do ângulo  $\theta$ , constrói-se as curvas  $FS_f \times \theta$  e  $FS_m \times \theta$ ; o valor do Fator de Segurança do talude é o obtido do cruzamento dessas 2 curvas.

Figura 24 - Gráfico para determinação do Fator de Segurança do talude: método de Spencer

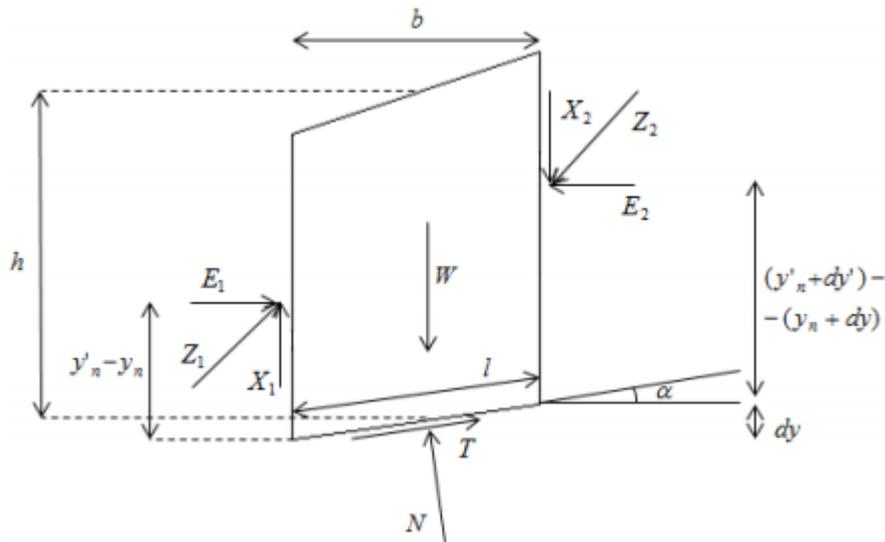


Fonte: Ferreira (2012)

### 2.6.6 Método de Morgenstern-Price

O método de Morgenstern-Price data de 1965 e junto com Spencer, também é considerado rigoroso, pois busca satisfazer todas as condições de equilíbrio (FERREIRA, 2012). Na Figura 25 é possível ver as forças consideradas no método.

Figura 25 - Forças atuantes em uma lamela: método de Morgenstern-Price



Fonte: Ferreira (2012)

Segundo o autor, o equilíbrio é calculado através de equações diferenciais, sendo a equação 26 para os momentos e a equação 27 para as forças:

$$(y'_1 - y_1) \frac{dE}{b} + E_1 \frac{dy'}{b} - X_1 = 0 \quad (26)$$

$$\frac{c'}{FS} [1 + tg\alpha^2] + \frac{tg\phi'}{FS} \left[ \frac{dW}{b} + \frac{dX}{b} - \frac{dE}{b} tg\alpha - u(1 + tg\alpha^2) \right] = \frac{dE}{b} + \frac{dX}{b} tg\alpha + \frac{dW}{b} tg\alpha \quad (27)$$

O autor destaca que as equações 26 e 27 possuem três incógnitas, as forças X e E de interação entre as fatias e  $y'$  referente a posição da linha de pressão. Assim, torna-se um sistema indeterminado. Morgenstern e Price, então adicionaram uma função que descreve a variação da relação entre X e E, juntamente com um fator de escala  $\lambda$ , conforme explicitado na equação 28:

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (28)$$

Assim, o autor indica que é preciso aplicar o processo de integração nas equações 26 e 27, e posteriormente realizar a iteração através do método de Newton-Raphson, para então obter o valor de FS e de  $\lambda$ .

Segundo Dutra (2013), é o método mais geral de equilíbrio limite, pois é aplicável para qualquer tipo de superfície de ruptura, inclusive a circular.

### 2.6.7 Comparativo entre os métodos

Conforme dito anteriormente, segundo Ferreira (2012), todos os métodos analisados neste trabalho admitem superfície circular de ruptura, além de considerar a área do talude como discretizada, ou seja, analisada em fatias. O diferencial de cada método está listado no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparativo entre os métodos de estabilidade de taludes

<b>Método</b>	<b>Grau de rigor</b>	<b>Considerações</b>
Fellenius	não rigoroso	As forças perpendiculares e tangentes atuantes na lateral de cada lamela são iguais em módulo e possuem sentidos opostos, por isso se anulam
Bishop	não rigoroso	Despreza-se a ação da <b>resultante</b> das forças tangenciais as faces laterais das lamelas
Bishop Simplificado	não rigoroso	Despreza-se a ação da <b>resultante</b> das forças perpendiculares e tangenciais às faces laterais das lamelas
Spencer	rigoroso	Considera todas as forças
Morgenstern-Price	rigoroso	Considera todas as forças

Fonte: Próprio autor

É importante destacar que, no caso da aplicação de vários modelos para uma mesma situação, percebe-se que, quanto mais rigoroso é o método, maior deverá ser o valor de FS. Cabe ao projetista analisar qual método é adequado para cada situação, de forma a conciliar fatores econômicos e técnicos.

### 2.6.8 Influência da presença de grampos e tirantes no cálculo da estabilidade global (ou geral) dos taludes

O efeito estabilizador de grampos e tirantes nos métodos descritos anteriormente, que utilizam a teoria do equilíbrio limite, pode ser descrito da seguinte forma: a força de grampeamento ou ancoragem, pode ser decomposta em duas parcelas, que contribuem para o aumento do fator de segurança. A componente

tangencial (ou paralela) a superfície de deslizamento (ruptura) tem sentido contrário ao sentido do movimento, isso significa que há uma diminuição das forças ou momentos instabilizadores. A componente normal (perpendicular) a superfície de deslizamento, aumenta a parcela de atrito ou seja, há uma elevação das forças ou momentos resistentes (estabilizador). É evidente que esses efeitos só ocorrem quando a superfície de ruptura cruza os grampos ou tirantes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir o principal objetivo desse trabalho, que é a compreensão do uso do solo grampeado e cortina atirantada na estabilização de taludes de corte, propõe-se executar as seguintes etapas:

- revisão bibliográfica dos seguintes temas: uso e funcionamento de sistemas de estabilização de taludes em solo grampeado e cortina atirantada; métodos de dimensionamento mais utilizados; métodos de análise de estabilidade de taludes. Esse item já foi apresentado;
- aplicação do conhecimento apreendido a um caso real de dois cortes de taludes em via urbana, cujas peculiaridades estão descritas nos próximos parágrafos;
- análise de estabilidade geral dos dois cortes, utilizando os dados das seções transversais selecionadas, no *software* GEO5, utilizando os métodos de Bishop Simplificado, Fellenius, Spencer e Morgenstern-Price.
- discussão sobre adequabilidade do uso da solução mista de cortina atirantada e solo grampeado na estabilização dos taludes de corte analisados.

Os casos analisados são cortes em encostas localizadas em uma avenida na cidade de Salvador, BA, que está em fase de duplicação da via urbana. Os dados foram disponibilizados pelo Consórcio Transoceânico, das empresas Construtora Queiroz Galvão e Constran, responsável pela execução do projeto.

Os cortes analisados nesse trabalho se referem aos chamados “Corte 7” e “Corte 8”, do projeto da avenida.

A Figura 26 se refere ao “Corte 7”, que apresenta 178 m de extensão, altura máxima de 20m, e dois sistemas de estabilização de encostas: tirantes e solo grampeado. A parte inferior do talude de corte tem inclinação de 1H:8V (ou seja, 82,9° com horizontal), e malha de tirantes com espaçamento vertical de 2,0m e espaçamento horizontal variável entre 2 e 3m. Os comprimentos dos tirantes são variáveis, em torno de 21 a 27m (11 a 17m de trecho livre e 10m de trecho ancorado). A parte superior do talude tem inclinação 1H:2V (ou seja, 63,4° com horizontal), e malha de grampos com espaçamentos (horizontal e vertical) de 1,5 m e comprimento de 15,0 m. Tirantes e grampos apresentam inclinação de 15° com o plano horizontal. Há ainda entre as partes uma berma de equilíbrio com 3,0 m de largura e inclinação

transversal de 3% para condicionar o escoamento de águas pluviais. Na posição de máxima altura, a bermas se localiza a uma altura de aproximadamente 10m do nível da rua, ou seja, na metade do talude.

Figura 26 - Vista do “Corte 7”



Fonte: Próprio autor

A Figura 26, se refere ao “Corte 8”, que apresenta 210 m de extensão, altura máxima 20,90m, e dois sistemas de estabilização de encostas: tirantes e solo grampeado. A parte inferior do talude no primeiro lance, tem inclinação 1H:1V (45° com a horizontal) e malha de grampos com espaçamentos (horizontal e vertical) de 1,5 m e comprimento de 12,0 m; já o segundo lance apresenta inclinação 1H:4V (76° com a horizontal) e mesma configuração de grampos. Os trechos de maior altura apresentam uma malha de tirantes com espaçamentos horizontal e vertical de 3,0 m e comprimento 25m. Esses tirantes reforçam uma cortina atirantada pré-existente. Tirantes e grampos apresentam inclinação de 15° com o plano horizontal. Há ainda a presença de bermas de equilíbrio com 3,0 m de largura e inclinação transversal de 3%. Na posição de máxima altura, as bermas se localizam a uma altura de aproximadamente 5m e 11m do nível da rua.

Figura 27 - Vista do “Corte 8”



Fonte: Próprio autor

Os grampos (ou chumbadores) utilizados são constituídos por barras de aço 25 mm (aço CA-50) de diâmetro e pintura anticorrosiva e furo de 4” (quatro polegadas ou 100mm), preenchidos com calda de cimento com pressão de injeção da ordem de 10 kg/cm<sup>2</sup>. A capacidade de carga a tração da armação do grampo (“tensile resistance” ou “tension strength”) utilizada no projeto foi 22tf (220kN) e a resistência ao arrancamento (“pull out resistance”) foi 2tf/m (20kN/m).

Os tirantes utilizados foram do tipo monobarra com carga de trabalho a tração de 51 tf (510kN).

O paramento do solo grampeado foi executado com 5cm de concreto projetado, tela metálica Q196 (aço CA-60), e camada final de acabamento de concreto projetado com 5cm.

O paramento da cortina atirantada foi executado com camada de 5cm de concreto projetado (fck de 30MPa e fator A/C 0,5), tela metálica Q246 (aço CA-60), outra camada de 10cm de concreto projetado, segunda tela metálica Q246, e última camada de concreto projetado. com e telas metálicas soldadas com aço CA-60.

As sondagens SPT realizadas apontam para um perfil geológico típico para a região, de um solo residual silto argiloso, com o nível do lençol freático, de modo geral,

abaixo do nível do greide da via urbana em implantação. Foram executados ensaios triaxiais para determinar os parâmetros de resistência do material na região. Os resultados, para solo residual silto argiloso com areia (cortes 7 e 8), obtidos em ensaio CU saturado, foram: peso específico natural ( $\gamma$ ) igual a  $16 \text{ kN/m}^3$ , ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) igual a  $34,10^\circ$  e coesão efetiva ( $c'$ ) igual a  $4,2 \text{ kPa}$ .

Em relação a sobrecarga linear aplicada no topo do talude, o valor utilizado nos cálculos está de acordo com o recomendado pela norma ABNT NBR 11682 para obras de contenção de solo:  $20 \text{ KN/m}^2$ .

Para executar a análise de estabilidade de taludes, utilizou-se o *software* GEO5, em sua versão de demonstração (versão demo), após tentativas em outros programas como SVSlope, da Soil Vision e no programa Slope, do GeoStudio, que não foram bem sucedidas devido a impossibilidade de inserção de grampos e tirantes ou por acesso por tempo limitado ao programa. O programa GEO5 disponibilizou todas as possibilidades de análise necessárias, além do período de uso ser ilimitado, mas os resultados não são salvos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se a seguir os resultados das análises propostas no item materiais e métodos.

### 4.1 ESCOLHA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS CORTES 7 E 8 PARA REALIZAR A ANÁLISE DA ESTABILIDADE GERAL OU MISTA

Nas informações de projeto fornecidos pela construtora, os dois cortes (7 e 8) foram divididos em várias seções transversais representativas para realizar a análise de estabilidade geral da encosta, cada uma com uma quantidade específica de tirantes ou grampos e com alturas diferentes. Foram selecionadas as principais seções transversais de cada corte, como mostrado no Quadro 2 e no Quadro 3. Os valores de Fator de Segurança (FS) citados nestes quadros foram obtidos pelos projetistas da obra, a partir do *software Slide*, da empresa *Rocscience*, utilizando os métodos de Bishop Simplificado e Spencer.

No Quadro 2 é possível ver a localização de cada seção transversal do Corte 7 na obra, através da posição das estacas, a altura destas, seus fatores de segurança, além do número de tirantes e de grampos considerados pelos projetistas em cada seção transversal.

Quadro 2 – Dados das principais seções transversais do Corte 7 (Fonte: Consórcio Transoceânico)

<b>Seção</b>	<b>Estaca</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>FS</b>	<b>Nº tirantes</b>	<b>Nº grampos</b>
2	5+0,0m	4,84	1,558	2	0
3	5+10,0m	10,73	1,584	5	0
4	6+0,0m	15,74	1,697	7	0
5	6+10,0m	17,61	1,635	8	0
6	7+0,0m	16,02	1,582	7	2
7	7+10,0m	20,00	1,659	6	5
8	8+0,0m	17,70	1,575	5	6
9	8+10,0m	16,25	1,536	4	6
10	9+0,0m	15,47	1,544	4	4
11	9+10,0m	13,05	1,518	3	5

Fonte: Próprio autor

No Quadro 3, tem-se os dados para as três seções transversais analisadas pelos projetistas no caso do Corte 8. Como na seção transversal 7 do Corte 8 há tirantes pré-existentes ao projeto, estes foram considerados de duas maneiras: primeiro atuando na estabilidade do talude como tirantes (total de 2), como mostrado na terceira linha do Quadro 3; e segundo atuando como sobrecarga aplicada, de forma a desfavorecer a estabilidade do talude, como mostrado na quarta linha do Quadro 3, onde se lê “7\*”. Observa-se que o FS da seção 7\* é, como esperado, menor que o valor de FS para a seção 7.

Quadro 3 – Dados das principais seções transversais do Corte 8 (Fonte: Consórcio Transoceânico)

<b>Seção</b>	<b>Estaca</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>FS</b>	<b>Nº tirantes</b>	<b>Nº grampos</b>
5	264+0,0m	20,53	1,505	0	10
7	265+0,0m	20,90	1,582	2	7
7*	265+0,0m	20,90	1,516	0	11
10	266+10,0m	13,2	1,615	0	10

Fonte: Próprio autor

Para esse trabalho, foram selecionadas nesse as seções transversais dos cortes 7 e 8 apresentadas no Quadro 4. Foram escolhidas como seções críticas aquelas de maior altura de talude e de menor fator de segurança. As seções transversais mostradas no Quadro 4 foram analisadas no *software* GEO5.

Quadro 4 – Seções transversais críticas escolhidas para análise de estabilidade geral no programa GEO5

<b>Corte</b>	<b>Seção</b>	<b>Estaca</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>FS</b>	<b>Nº tirantes</b>	<b>Nº grampos</b>
7	7	7+10,0m	20,00	1,659	6	5
7	11	9+10,0m	13,05	1,518	3	5
8	5	264+0,0m	20,53	1,505	0	10
8	7	265+0,0m	20,90	1,582	2	7
8	7*	265+0,0m	20,90	1,516	0	11

Fonte: Próprio autor

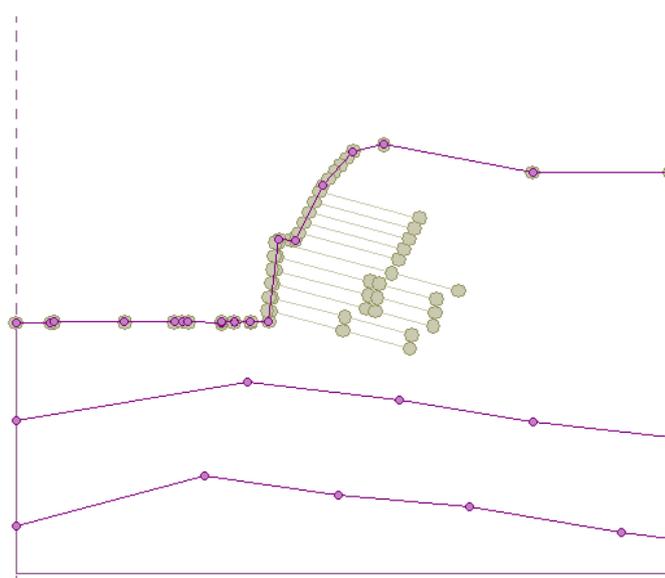
## 4.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE PARA O CORTE 7

Apresenta-se neste tópico os resultados obtidos pela análise de estabilidade geral, utilizando os dados das seções transversais selecionadas do “Corte 7”, conforme o Quadro 4, no *software* GEO5, utilizando os métodos de Bishop Simplificado, Fellenius, Spencer e Morgenstern-Price.

### 4.2.1 Análise da seção transversal 7 do Corte 7

Para fazer a análise de estabilidade geral, de forma a obter o fator de segurança para a seção transversal 7, inseriu-se no programa GEO5 o perfil geotécnico desta em forma de arquivo .dxf, a seguir traçou-se a face do talude, tendo como base o arquivo .dxf, conforme mostrado seguinte. Na Figura 28 é possível ver o perfil do talude, importado do *software* AutoCAD, e a face do talude desenhada graficamente no programa.

Figura 28 – Representação da seção transversal 7 do Corte 7 utilizada no programa GEO5



Fonte: Próprio autor

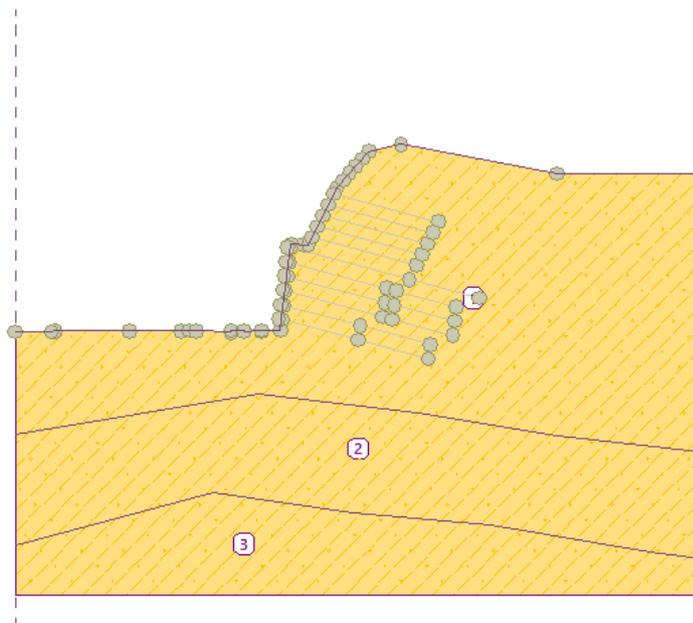
Em seguida, inseriu-se os dados referentes ao tipo de solo, obtidos através de ensaio triaxial adensado-rápido com material saturado (CU), fornecidos pela empresa e citados no capítulo 3 deste trabalho. A Figura 27 mostra a inserção destes valores no programa GEO5.

Figura 29 - Dados do solo analisado na seção transversal 7 do Corte 7

Fonte: Próprio autor

Após aplicação dos dados da Figura 28, o talude está pronto para inserção das estruturas de estabilização (grampos e tirantes), conforme mostrado Figura 30.

Figura 30 - Representação da seção transversal 7 do Corte 7 com as propriedades do solo



Fonte: Próprio autor

A seguir foram inseridos os dados para os grampos (parte superior do talude), conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 - Dados inseridos para os grampos da seção transversal 7 do Corte 7

No. ^	Start pt. x (m)	z (m)	Length l (m)	Inclination $\alpha$ [°]	Spacing b (m)	Tension strength	Pull out resistance	Nail head strength
1	44,08	22,94	15,00	15,03	1,50	$R_t = 220,00$ kN	$T_p = 20,00$ kN/m	$R_h = 154,00$ kN
2	43,32	21,42	15,00	15,03	1,50	$R_t = 220,00$ kN	$T_p = 20,00$ kN/m	$R_h = 154,00$ kN
3	42,58	19,92	14,99	15,00	1,50	$R_t = 220,00$ kN	$T_p = 20,00$ kN/m	$R_h = 154,00$ kN
4	41,83	18,43	14,99	15,04	1,50	$R_t = 220,00$ kN	$T_p = 20,00$ kN/m	$R_h = 154,00$ kN
5	41,09	16,94	15,00	15,03	1,50	$R_t = 220,00$ kN	$T_p = 20,00$ kN/m	$R_h = 154,00$ kN

Fonte: Próprio autor

Os valores de x e z se referem a posição horizontal e vertical da cabeça do grampo, o valor l se refere ao comprimento dos grampos (~15m), o valor  $\alpha$  se refere a inclinação dos grampos (15 graus). Essas informações foram obtidas através do perfil .dxf do talude inserido no programa, e estão esquematizadas na Figura 31. O espaçamento lateral entre grampos b, na direção horizontal y, correspondente a de 1,5 m foi inserido manualmente, de acordo com o que foi determinado no memorial de cálculo da empresa e já apresentado no item materiais e métodos.

O valor de “*tension strength*” de 220 kN se refere a capacidade de carga a tração da armação de cada grampo. A resistência ao arrancamento dos grampos, ou “*pull out resistance*”, é de 20kN/m. Ambos os valores também foram determinados no projeto da empresa, e foram descritos no item materiais e métodos.

Para determinar o valor da resistência da cabeça do grampo (“*facing resistance*” ou resistencia da conexão grampo-paramento), ou “*nail head strength*”, utilizou-se a equação 7, já descrita nesse trabalho, que foi adaptada do manual técnico da FHWA (2015), e que também está apresentada no *software* GEO5, (FINE SOFTWARE, 2021). O resultado foi o valor de 154kN, para a resistência da conexão grampo-paramento, conforme indicado na Figura 31.

$$R_F = \min(R_T; R_{PO} \cdot L) \cdot (0,6 + 0,2(S_{max} - 1)) \quad (\text{kN}) \quad (7)$$

onde:

L: comprimento do grampo (m), no caso 15m

S<sub>max</sub>: espaçamento máximo entre grampos (m), no caso 1,5m

R<sub>T</sub>: resistência a tração da armação do grampo (kN), no caso R<sub>T</sub> = 220kN

R<sub>PO</sub>: resistência ao arrancamento do grampo (kN/m), no caso 20kN/m

Para os tirantes, foram inseridos os dados mostrados na

Figura 32. Os valores de x e z se referem a posição horizontal e vertical da cabeça do tirante; o valor l se refere ao comprimento livre dos tirantes (11m a 17m); o valor  $l_k$  se refere ao comprimento ancorado dos tirantes (aproximadamente 10m); o valor  $\alpha$  se refere a inclinação dos tirantes (15 graus); o valor b se refere ao espaçamento lateral na direção horizontal y, correspondente a 2m. A força de 510 kN é referente a carga de trabalho a tração de cada tirante. Todas essas informações foram obtidas no projeto da empresa, já citados no item materiais e métodos.

Figura 32 - Dados inseridos para os tirantes da seção transversal 7 do Corte 7

No. ^	Origin		Free length l [m]	Root length $l_k$ [m]	Slope $\alpha$ [°]	Anchor spacing b [m]	Force F [kN]
	x [m]	z [m]					
1	38,12	15,43	17,00	10,00	15,00	2,00	510,00
2	37,87	13,44	14,00	10,00	15,03	2,00	510,00
3	37,62	11,44	14,00	10,00	15,03	2,00	510,00
4	37,37	9,44	14,00	10,00	15,03	2,00	510,00
5	37,12	7,44	11,00	10,00	15,02	2,00	510,00
6	36,87	5,44	11,00	10,00	15,02	2,00	510,00

Fonte: Próprio autor

Para a sobrecarga, foram inseridos os dados conforme mostra a Figura 33. O valor da sobrecarga linear de  $20 \text{ kN/m}^2$ , como citado anteriormente, segue o padrão exigido pela norma ABNT NBR 11682. Os valores de x e l foram determinados seguindo o perfil do arquivo .dxf e inserido no programa.

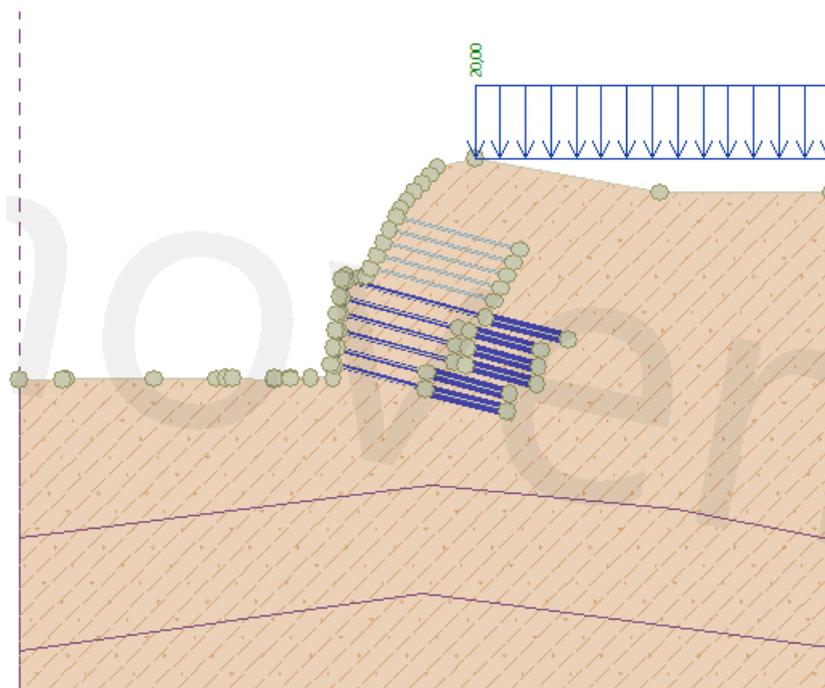
Figura 33 - Dados para a sobrecarga na seção transversal 7 do Corte 7

No. ^	Name	Type	Type of action	Location z [m]	Origin x [m]	Length l [m]	Width b [m]	Slope $\alpha$ [°]	Magnitude		unit
									q, q <sub>1</sub> , f, F, x	q <sub>z</sub> , z	
1	sobrecarga	strip	permanent	on terrain	53,37	41,50		0,00	20,00		$\text{kN/m}^2$

Fonte: Próprio autor

Após a inserção dos dados dos grampos, dos tirantes e da sobrecarga, o talude está pronto para a execução da análise de estabilidade global. A Figura 34 mostra o talude que foi analisado.

Figura 34 – Representação da seção transversal 7 do Corte 7 configurada para análise de estabilidade no GEO5



Fonte: Próprio autor

Com a configuração mostrada na Figura 34, fez-se a análise de otimização com os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Isso significa que o programa mostra como resultado a superfície mais crítica, ou seja, aquela com o menor Fator de Segurança. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para o FS pelo software GEO5 utilizado nesse trabalho, para espaçamento horizontal (lateral) 1,50m entre os grampos e 2m entre os tirantes.

Tabela 1 – Resultados dos valores de FS obtidos no software GEO5 para a seção trasversal 7 do corte 7

<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,50</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>2,00</b>
Fellenius	1,39
Bishop simplificado	1,44
Spencer	1,76
Morgenstern-Price	1,76
Média	1,59

Fonte: Próprio autor

Nota-se, a partir da Tabela 1, que os valores obtidos para o FS pelo software GEO5 se apresentam, em média, maiores que o valor 1,5, o que está de acordo com a norma ABNT NBR 16920 e NBR 11682. Verifica-se que os métodos mais rigorosos apresentam maiores valores de FS. No Apêndice A, é possível verificar as superfícies de ruptura relacionadas a cada resultado da Tabela 1.

É importante destacar que as normas ABNT NBR 11682 e NBR 16920 recomendam que o FS mínimo aceitável, seja compatível com o perigo de perda de vidas humanas e à possibilidade de danos materiais e do meio ambiente. Assim, de acordo com a região onde foi projetado o corte 7, o nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas é alto, pois é uma região de intenso fluxo de pessoas, com residências no entorno e com alto fluxo de veículos. Já para danos materiais e ambientais, o nível de segurança desejado é médio, pois há presença de propriedades de valor moderado e o local tem um risco médio a acidentes ambientais. Dessa forma, de acordo com as normas ABNT NBR 11682 e NBR 16920, o fator de segurança mínimo a ser adotado no projeto é de 1,5.

#### 4.2.1.1 Análise da influência do espaçamento dos tirantes e dos grampos

Para a seção transversal 7 do Corte 7, foi realizada uma análise com várias situações de espaçamento horizontal (lateral) entre os tirantes e os grampos, sendo que, para cada configuração, foi calculado o valor de FS para os quatro métodos de estabilidade geral, conforme mostra a Tabela 2. Nos Apêndices A até F estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de FS para diferentes espaçamentos entre tirantes e grampos seção transversal 7 do Corte 7

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>	<b>Caso 5</b>	<b>Caso 6</b>
<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>1,0</b>	<b>2,5</b>
Fellenius	1,39	1,68	1,42	1,34	1,84	1,30
Bishop simplificado	1,44	1,90	1,47	1,38	1,90	1,34
Spencer	1,76	2,05	1,82	1,59	2,05	1,53
Morgenstern-Price	1,76	2,05	1,81	1,58	2,05	1,53
Média	1,59	1,92	1,63	1,48	1,96	1,43

Fonte: Próprio autor

Após análise da Tabela 2, nota-se que, quanto maior o espaçamento entre tirantes e grampos, menores são os valores de FS obtidos, pois a intensidade das forças resistentes a cada metro de talude é menor. É nítida a importância do espaçamento sobre o valor de FS, ou seja, essa escolha afeta a definição do FS de projeto.

Comparando-se os dois grupos de casos 2-3-4 e 5-1-6 da Tabela 2 que apresentam espaçamento fixo entre grampos, respectivamente 1m e 1,5m, nota-se que o valor de FS diminui à medida que o espaçamento entre os tirantes aumenta. Esse resultado é esperado, pois a sobreposição da região de influência entre os tirantes diminui. Deve-se observar que esse comportamento ocorreu para todos os métodos utilizados no cálculo de FS.

Considerando o espaçamento fixo entre os tirantes, casos 3-1 e casos 4-6, respectivamente 2m e 2,5m, nota-se que o aumento da distância entre os grampos também diminui os valores de FS, porém essa mudança não é tão brusca quanto na análise dos casos em que se variou a distância entre os tirantes e manteve-se a distância entre grampos fixada. Ou seja, o posicionamento dos tirantes no talude tem maior influência nos valores de FS do que o posicionamento dos grampos. Entretanto, os casos 2-5, onde a distância entre tirantes é fixada em 1m, os resultados se mostram incoerentes: no método de Fellenius, um maior espaçamento dos grampos,

apresentou maior FS e deveria resultar um FS menor; para os demais métodos não ocorreu alterações no FS, o que também representa um resultado inesperado.

#### 4.2.1.2 Análise da influência do não uso de grampos e tirantes; uso somente de grampos; uso somente de tirantes; uso combinado de grampos e tirantes

Foi realizada também uma análise com várias situações de uso ou não uso de grampos e tirantes. Para cada configuração, foi calculado o valor de FS para os quatro métodos de estabilidade geral, conforme mostra a Tabela 3. Nos Apêndices G, H, I e também no Apêndice A estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de FS para diferentes situações: sem tirantes e sem grampos, só com grampos, só com tirantes, com ambos para a seção transversal 7 do Corte 7

Corte analisado Seção analisada	Corte 7 Seção 7			
	Situação dos grampos sem grampos	Situação dos tirantes sem tirantes	Situação dos grampos com grampos	Situação dos tirantes com tirantes
Espaçamento entre grampos (m)	-	1,50	-	1,50
Espaçamento entre tirantes (m)	-	-	2,00	2,00
Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> )	20,00	20,00	20,00	20,00
<b>Fellenius</b>	0,49	1,10	1,61	1,39
<b>Bishop Simplificado</b>	0,48	1,15	1,64	1,44
<b>Spencer</b>	0,48	1,14	1,99	1,76
<b>Morgenstern-Price</b>	0,50	1,14	2,00	1,76
<b>Média dos FS</b>	0,49	1,13	1,80	1,62

Fonte: Próprio autor

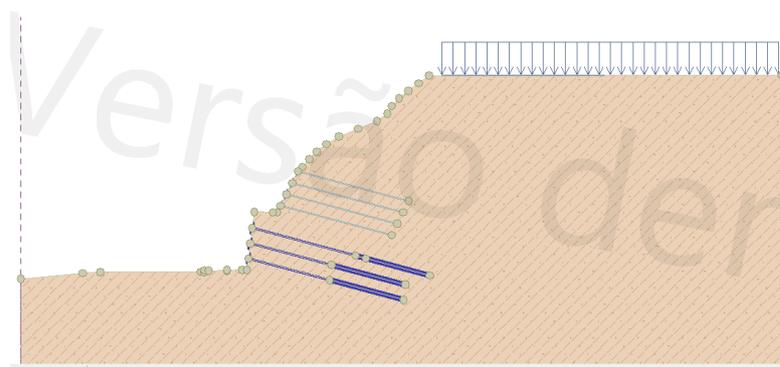
Conforme é possível verificar nos resultados apresentados na Tabela 3, se não fossem utilizados nem tirantes e nem grampos o talude não seria estável pois FS é menor que 1. Se fossem utilizados apenas grampos, o talude também não alcançaria o valor mínimo de 1,5 para o FS. Se fossem utilizados apenas tirantes, o talude seria estável pois o FS é maior que 1,5, mas em termos econômicos essa seria a solução mais cara, pois, conforme Magalhães e Azevedo (2016), o uso de solo grampeado custa 43% do valor da execução da cortina atirantada para obras com altura de 20 m, que é a altura analisada da seção transversal 7 do corte 7.

Já a combinação do uso de tirantes e grampos, é mais viável economicamente e apresenta FS médio acima de 1,5, demonstrando ser exequível essa solução, que, aliás, foi a solução adotada pelos projetistas.

#### 4.2.2 Análise da seção transversal 11 do corte 7

Para a seção transversal 11 do Corte 7, foram inseridos os dados iniciais citados anteriormente e foi analisada a estabilidade para o espaçamento (horizontal) de 1,5 m entre os grampos e de 2,0 m para os tirantes. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos e a Figura 35 ilustra as dimensões e posicionamento dos tirantes e grampos nessa seção transversal. No Apêndice J estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 4.

Figura 35 – Representação da seção transversal 11 do Corte 7 configurada para análise de estabilidade no GEO5



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 – Valores de FS para a seção transversal 11 do Corte 7

<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,50</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>2,00</b>
Fellenius	1,39
Bishop simplificado	1,46
Spencer	1,35
Morgenstern-Price	1,35
Média	1,39

Fonte: Próprio autor

Nota-se que os valores obtidos pelo software GEO5 se encontram abaixo do valor aceitável proposto pelas normas ABNT NBR 11682 e NBR 16920, que é 1,5. Na comparação entre os métodos, verifica-se incoerência: os métodos de Spencer e Morgenstern-Price, que são mais rigorosos, apresentaram valores menores. Observando as figuras do Apêndice J, verifica-se que a superfície de ruptura crítica é muito diferente para esses dois métodos. Não foi possível resolver isso, utilizando a opção de “otimização” do programa GEO5. Decidiu-se verificar qual o FS para a mesma superfície crítica obtida no método de Bishop simplificado. O resultado foi FS igual a 1,64, valor coerente, porque os métodos de Spencer e Morgenstern-Price são mais rigorosos.

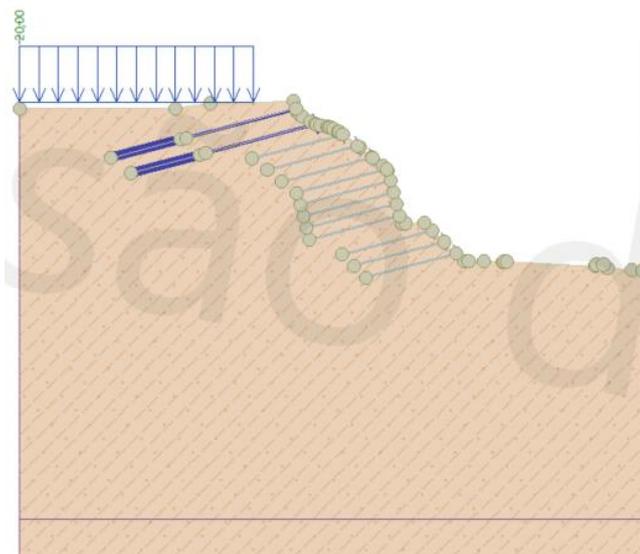
#### 4.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES PARA O CORTE 8

Neste tópico são expostos os resultados das análises de estabilidade para duas seções transversais distintas do Corte 8: a seção 5, onde é analisada uma situação sem tirantes e outra com tirantes; e a seção 7, na qual é apresentada uma análise com tirantes e outra considerando a região dos tirantes atuando como sobrecarga no talude.

##### 4.3.1 Análise da seção transversal 5 do Corte 8

A seguir, apresenta-se os resultados da análise de estabilidade de dois casos para a seção transversal 5 do Corte 8, ou seja, é avaliado o valor de FS do talude com tirantes e sem tirantes. A Figura 35 ilustra as dimensões e posicionamento dos tirantes e grampos nessa seção transversal.

Figura 36 – Representação a seção transversal 5 do Corte 8 configurada para análise de estabilidade no GEO5



Fonte: Próprio autor

#### 4.3.1.1 Situação sem tirantes

Na análise da seção transversal 5 do Corte 8, a empresa responsável pelo projeto não considerou a presença de tirantes, pois estes são pré-existentes ao projeto. Por esse motivo, essa situação foi aqui verificada também, como pode ser visto na Tabela 5. No Apêndice K estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de FS para a seção transversal 5 do Corte 8 sem considerar tirantes

<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,50</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>-</b>
Fellenius	1,29
Bishop simplificado	1,46
Spencer	1,45
Morgenstern-Price	1,46
Média	1,42

Fonte: Próprio autor

Observa-se que os valores de FS obtidos na Tabela 5 estão abaixo do valor preconizado pelas normas ABNT NBR 11682 e NBR 16920, que é 1,5. O resultado que causa estranheza se refere aos métodos mais rigorosos (Spencer e Morgenstern-Price) que apresentaram mesmo valor que o método menos rigoroso (Bishop simplificado). Não foi possível resolver isso, utilizando a opção do “otimização” do programa GEO5.

#### 4.3.1.2 Situação com tirantes de reforço

Para realizar um comparativo, foi considerada a influência de tirantes de reforço, conforme mostrado na Figura 36, mesmo a empresa não tendo realizado esse estudo. Os tirantes pré-existent também não foram considerados por falta de dados; apenas os tirantes de reforço é que foram considerados. A Tabela 6 a seguir mostra o resultado obtido. O espaçamento entre os tirantes de reforço adotado foi de 3,0 m, conforme utilizado para o corte 8 (veja item materiais e métodos). No Apêndice L estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de FS para a seção transversal 5 do Corte 8 considerando reforço com tirantes

<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,50</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>3,00</b>
Fellenius	1,37
Bishop simplificado	1,52
Spencer	1,52
Morgenstern-Price	1,52
Média	1,49

Fonte: Próprio autor

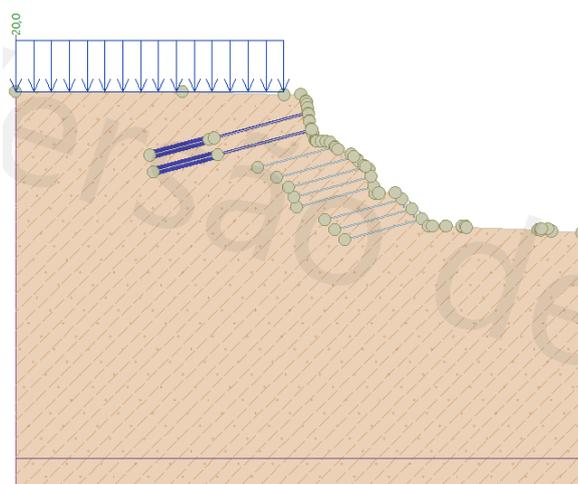
Comparando os resultados da Tabela 5 e da Tabela 6, os valores de FS obtidos considerando os reforços de tirantes foram maiores, como esperado. Exceto para o método de Fellenius, os demais métodos apresentam FS maior que 1,5, mostrando a importância da presença dos tirantes. Novamente os valores de Spencer e Morgenstern-Price estão muito parecidos com o método menos rigoroso (Bishop

Simplificado), o que não é esperado. Não foi possível resolver isso, utilizando a opção do “otimização” do programa GEO5.

#### 4.3.2 Análise da seção transversal 7 do Corte 8 com tirantes

Nesta análise da seção transversal 7 do Corte 8, foi considerado os tirantes de reforço aos pré-existentes, e os grampos previstos no projeto. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos. A Figura 36 ilustra as dimensões e posicionamento dos tirantes e grampos nessa seção transversal. No Apêndice M estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 7.

Figura 37 – Representação a seção transversal 7 do Corte 8 configurada para análise de estabilidade no GEO5



Fonte: Próprio autor

Tabela 7 - Valores de FS para a seção transversal 7 do Corte 8 considerando reforço com tirantes

<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,50</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>3,00</b>
Fellenius	1,06
Bishop simplificado	1,53
Spencer	1,55
Morgenstern-Price	1,56
<b>Média</b>	<b>1,43</b>

Fonte: Próprio autor

Observa-se da Tabela 7 que, exceto para o método de Fellenius, os fatores de segurança FS obtidos estão acima do recomendado pelas normas da ABNT. Observando as figuras do Apêndice M, verifica-se que a superfície de ruptura crítica é muito diferente para o método de Fellenius. Não foi possível resolver isso, utilizando a opção do “otimização” do programa GEO5. Decidiu-se verificar qual o FS para a mesma superfície crítica obtida no método de Bishop simplificado. O resultado foi FS igual a 1,39, valor coerente, porque o método de Fellenius é menos rigoroso.

#### 4.3.3 Análise da seção transversal 7 do Corte 8 com região dos tirantes antigos atuando como sobrecarga

Para realizar uma comparação e observar a influência dos tirantes, a empresa fez também a análise de estabilidade considerando o maciço acima do trecho de solo grampeado como se fosse uma sobrecarga aplicada no talude, em adição ao padrão utilizado de 20 kN/m<sup>2</sup>. Em outras palavras, a região dos tirantes pré-existentes e dos tirantes de reforço adicionados foi considerada como sobrecarga (peso do solo e tirantes nessa região), de forma que o valor aplicado sobre o maciço de solo grampeado foi de 156 kN/m<sup>2</sup>. A Tabela 8 mostra os resultados da análise nessas condições. No Apêndice N estão apresentadas outras informações e figuras, relativas a cada caso da Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de FS para a seção transversal 7 do Corte 8 considerando o solo com tirantes antigos como sobrecarga

<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	<b>1,50</b>
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	<b>3,00</b>
<b>Sobrecarga (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>156</b>
Fellenius	1,24
Bishop simplificado	1,44
Spencer	1,44
Morgenstern-Price	1,45
Média	1,39

Fonte: Próprio autor

Ao realizar a comparação entre a Tabela 7 e a Tabela 8, nota-se que os tirantes atuando no maciço influenciam no aumento do FS, pois são considerados como forças resistentes que favorecem o equilíbrio do maciço, enquanto que, considerando a parcela de solo com tirantes antigos e de reforço como uma sobrecarga, os valores de FS diminuem, pois dessa maneira são forças atuantes (instabilizadoras) que favorecem o deslizamento. Assim, como esperado, os valores da Tabela 7 são maiores que os valores da Tabela 8.

#### 4.4 ANÁLISE DE TODOS OS CASOS

Após análises restritas a cada seção, apresentadas anteriormente, foi realizado um comparativo geral entre as seções dos dois cortes, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de FS obtidos nas seções analisadas dos Cortes 7 e 8

<b>Corte analisado</b>	Corte 7	Corte 7	Corte 8	Corte 8	Corte 8	Corte 8
<b>Seção transversal</b>	Seção 7	Seção 11	Seção 5	Seção 5	Seção 7	Seção 7
<b>Situação dos tirantes</b>	com grampos e tirantes	com grampos e tirantes	com grampos e sem tirantes	com grampos e com tirantes	com grampos e com tirantes	com grampos e tirantes antigos como sobrecarga
<b>Espaçamento entre grampos (m)</b>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
<b>Espaçamento entre tirantes (m)</b>	2,00	2,00	-	3,00	3,00	-
<b>Sobrecarga (kN/m<sup>2</sup>)</b>	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	156,00
<b>Fellenius</b>	1,39	1,39	1,29	1,37	1,39	1,24
<b>Bishop simplificado</b>	1,44	1,46	1,46	1,52	1,53	1,44
<b>Spencer</b>	1,76	1,64	1,45	1,52	1,55	1,44
<b>Morgenstern-Price</b>	1,76	1,64	1,46	1,52	1,56	1,45
<b>Média dos FS</b>	1,59	1,53	1,42	1,48	1,51	1,39
<b>Média FS para Bishop e Spencer</b>	1,60	1,55	1,46	1,52	1,54	1,44

Fonte: Próprio autor

A Tabela 9 reúne todos os valores de FS obtidos e a média dos FS em cada seção. O espaçamento de 1,5 metros entre os grampos foi igual para todos os casos

e o espaçamento entre os tirantes foi de 2 metros para o Corte 7 e de 3 metros para o Corte 8, conforme citado no material cedido pelo Consórcio Transoceânico.

Na maioria dos casos foi utilizada a sobrecarga sugerida pela NBR 11682, porém na seção transversal 7 do Corte 8, devido a região dos tirantes antigos (pré-existent), hipoteticamente, atuar como sobrecarga, esse valor foi aumentado. Nota-se a influência da sobrecarga nos valores de FS, ou seja, se a sobrecarga é maior, o valor de FS tende a diminuir.

Pode-se verificar que os valores de FS obtidos pelo método de Fellenius são menores em comparação com os outros métodos. Isso ocorre devido este ser o método mais simples de todos, pois considera que as forças laterais atuantes em cada lamela são colineares e de mesma intensidade e, portanto, se anulam. As lamelas nesse método não interagem entre si, e por consequência o valor de FS obtido é mais baixo. É o método menos rigoroso e mais conservador.

Verifica-se também que os resultados obtidos pelos métodos de Spencer e Morgenstern-Price apresentam nenhuma ou mínima diferença.

Assim, decidiu-se analisar a média dos resultados obtidos pelos métodos de Bishop simplificado e Spencer. Essa tentativa diz respeito a utilizar um método mais rigoroso (Spencer) e outro não rigoroso (Bishop Simplificado). Dessa forma, verifica-se que o FS é maior que 1,5 em 4 (quatro) dos 6 (seis) casos cujos resultados estão apresentados na Tabela 9.

Analisando os dados fornecidos pelo Consórcio Transoceânico, verificou-se que há algumas diferenças entre o número de tirantes e grampos apresentados no memorial descritivo e aqueles fornecidos nos arquivos AutoCad das seções transversais. Isso poderia explicar os valores menores do FS encontrados nesse trabalho. Outra fonte de diferenças poderia ser divergências nas rotinas de cálculo do software utilizado pela empresa, que foi o Slide da Rocscience, e o software GEO5 da Fine utilizado nesse trabalho.

#### 4.5 OUTRAS VERIFICAÇÕES PARA O SOLO GRAMPEADO

Nesse item apresenta-se a verificação, a título de comparação com o que foi levantado na literatura técnica, de outros aspectos do projeto de estabilização dos Cortes 7 e 8, especificamente sobre a parte que utiliza solo grampeado, conforme recomenda a norma ABNT NBR16920.

#### 4.5.1 Verificação da capacidade de carga dos grampos

Quanto a resistência ao arrancamento dos grampos, o projeto adotou o valor de 20 kN/m, e o cálculo a seguir para diâmetro do grampo de 10 cm e  $N_{SPT}$  médio igual a 8, resultou 22,67kN/m (resistência característica, sem minoração por fator de segurança).

Resistência ao arrancamento do grampo ( $R_{PO}$ ), de acordo com revisão da literatura:

$$q_s = 50 + 7,5 \cdot \ln(N_{spt}) = 50 + 7,5 \cdot \ln 8 = 65,59kPa$$

$$q_s = 45,12 \times \ln(N_{spt}) - 14,99 = 45,12 \times \ln 8 - 14,99 = 78,83kPa$$

Adotando-se  $q_s$  médio igual a 72,21 kPa, obtém-se:

$$R_{PO} = \frac{(\pi \cdot D_{perf} \cdot L) \times q_s}{L} = \frac{(\pi \cdot 0,1 \cdot L) \times 72,21}{L} = 22,67kN/m$$

Quanto a resistência a tração da armação do grampo, o projeto adotou o valor de 220 kN, e o cálculo a seguir para o aço CA-50 com diâmetro de 25mm, resultou 245kN (resistência característica, sem minoração por fator de segurança).

Resistência a tração da armação do grampo ( $R_T$ ), de acordo com revisão da literatura:

$$R_T = A_{\text{útil}} \times f_{yk} = \frac{\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{4} \times 500 \cdot 10^3 = 245,31kN$$

Quanto a resistência ao arrancamento dos grampos, o projeto não especificou valor, mas para a verificação da análise de estabilidade pelo software GEO5 foi necessário se adotar um valor, conforme foi apresentado no item 4.2.1 desse trabalho. O valor adotado nesse caso foi 154 kN porque se utilizou  $R_T$  igual a 220 kN/m.

Mas quando se utiliza a resistência a tração da armação do grampo ( $R_T$ ) calculada no presente item, e o espaçamento máximo é 1,5m, o valor de  $R_F$ , de acordo com revisão da literatura é:

$$R_F = \min(R_T; R_{PO} \cdot L) \cdot (0,6 + 0,2(S_{max} - 1)) = 245,31 \cdot (0,6 + 0,2(1,5 - 1)) \\ = 171,71kN$$

Quando se utiliza a resistência ao arrancamento como o menor valor, é necessário utilizar o comprimento total do grampo, que não é igual ao comprimento de ancoragem do grampo. Assim, para  $L = 15m$  e  $R_{PO} = 22,67kN/m$ , tem-se:

$$R_F = \min(R_T; R_{PO} \cdot L) \cdot (0,6 + 0,2(S_{max} - 1)) = 22,67 \cdot 15 \cdot (0,6 + 0,2(1,5 - 1)) \\ = 238,04kN$$

Portanto, o valor de  $R_F$  que deve ser utilizado é o menor valor entre os dois calculados, 171,71kN. Esse valor, 171,7kN, é maior que o valor adotado nas verificações de projeto (154kN).

Quanto ao espaçamento dos grampos, o projeto adotou espaçamento vertical e horizontal de 1,5m, o que está de acordo com os valores encontrados na literatura, que recomenda 1,2 a 1,80m na vertical e horizontal, se possível adotando valores iguais ou próximos.

Quanto ao ângulo de inclinação dos grampos, o projeto adotou 15 graus com a horizontal, o que está de acordo com os valores recomendados na literatura que variam entre 10 e 20 graus.

Quanto ao comprimento dos grampos, o valor adotado foi 15m, que também está de acordo com a literatura que recomenda usar valores entre 0,5 e 1,2H; sendo a maior altura dos cortes foram 20m e 20,90m, tem-se que os valores deveriam estar entre 10m e 25m.

#### 4.6 OUTRAS VERIFICAÇÕES PARA A CORTINA ATIRANTADA

Nesse item apresenta-se a verificação, a título de comparação com o que foi levantado na literatura técnica, de outros aspectos do projeto de estabilização dos Cortes 7 e 8, especificamente sobre a parte que utiliza cortina atirantada, seguindo as recomendações da GeoRio (2014) apud Gerscovich, Danziger e Saramago (2016).

#### **4.6.1 Verificação da capacidade de carga e distribuição dos tirantes**

Quanto ao tirante adotado em projeto, com carga de trabalho de 510kN, ele deve apresentar, de acordo com a literatura consultada, diâmetro da monobarra de 41mm e diâmetro do furo de 125mm (GEORIO, 2000).

Quanto ao espaçamento dos tirantes, o projeto adotou espaçamento vertical de 2m, o que está de acordo com os valores encontrados na literatura, que recomenda ser maior que 1m ou 6 vezes diâmetro do furo, que seria 6x12,5cm ou seja 75cm.

Quanto ao ângulo de inclinação dos tirantes, o projeto adotou 15 graus com a horizontal, o que está de acordo com os valores recomendados na literatura que variam entre 15 e 30 graus.

Quanto ao comprimento dos tirantes eles variam em torno dos seguintes valores: de 21 a 27m (11 a 17m de trecho livre e 10m de trecho ancorado) para o Corte 7; e para o Corte 8 o comprimento adotado foi de 15m de trecho livre e 10m de bulbo (trecho ancorado), totalizando 25m.

#### **4.7 VERIFICAÇÕES NÃO REALIZADAS**

Neste tópico, são pontuadas as verificações recomendadas pelas normas referentes a cada sistema de estabilização de taludes que, porém, não foram realizadas devido não fazerem parte do escopo deste trabalho.

##### **4.7.1 Verificações para solo grampeado**

Para o sistema de drenagem, esse item não foi verificado, porque não se teve acesso aos dados do projeto. Ressalta-se a importância de coletar e direcionar as águas internas e externas ao talude, de forma adequada para não impactar negativamente o comportamento geotécnico dos sistemas de estabilização, conforme item 12 da norma ABNT NBR 16920.

Para os seguintes itens: resistência estrutural a flexão do paramento e sua conexão com os grampos; punção do paramento e estabilidade local entre os grampos junto a face de deslizamento, não foram realizadas verificações, devido ao objetivo deste trabalho ser a análise da estabilidade geral dos sistemas de estabilização.

Também não foram feitas as verificações de deslizamento, tombamento e capacidade de carga da fundação, devido a esses itens não fazerem parte da análise de estabilidade geral dos sistemas de estabilização.

Por fim, para a estabilidade interna do solo grampeado não houve verificação, pois, conforme descrito na revisão bibliográfica, na verificação da estabilidade interna, a avaliação dos esforços solicitantes em cada linha ou camada de reforço, não é uma tarefa simples, pois depende da superfície de ruptura admitida, que por sua vez depende da geometria do talude (inclinação, altura etc) das cargas atuantes, da resistência e deformabilidade do solo e dos grampos.

#### **4.7.2 Verificações para cortina atirantada**

Para a cortina atirantada, além das verificações realizadas neste trabalho é recomendado analisar os seguintes itens: verificação da capacidade de carga da fundação; ruptura do painel de concreto projetado e deformação excessiva. Essas verificações não foram realizadas pois esses itens não fazem parte da análise de estabilidade geral desse sistema de estabilização de talude.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível realizar um compilado da literatura sobre os sistemas de estabilização de taludes denominados solo grampeado e cortina atirantada, discorrer sobre métodos de dimensionamento, métodos de análise de estabilidade interna e métodos de análise de estabilidade externa (global), atingindo assim o objetivo de melhorar a compreensão do funcionamento dos sistemas comumente utilizados para estabilização de talude corte em meios urbanos. Em seguida, aplicou-se os conhecimentos adquiridos a dois casos reais com auxílio de um software adequado, de forma que houve consolidação dos conhecimentos adquiridos durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, com os dados coletados foi feito um estudo da aplicabilidade dos tipos de contenções citados, além da análise comparativa do uso da solução mista dos casos com a escolha da utilização isolada de cada sistema de estabilização.

Em suma, os resultados mostraram que há uma grande influência do espaçamento entre os tirantes e entre os grampos na estabilidade do talude, e o valor da sobrecarga utilizada é inversamente proporcional ao valor de FS. Verificou-se também que o espaçamento dos tirantes influencia mais que o espaçamento dos grampos nos resultados obtidos para o Fator de Segurança. Outro resultado importante foi verificar que o uso de grampos não seria suficiente para garantir a estabilidade dos cortes, já o uso de um sistema de estabilização com tirantes garantiria a segurança do talude, porém elevaria o custo da obra. Assim, nos casos analisados, o uso de soluções mistas foram mais adequados para aliar segurança e viabilidade financeira.

O uso de soluções mistas evitou a desapropriação de lotes e evitou grandes deslocamentos de terra, medidas que elevam significativamente o custo de obras de estabilização de cortes de taludes em áreas urbanas.

Para trabalhos futuros seria viável realizar as análises de estabilidade externa (global) aqui realizadas em outros softwares para comparação com o GEO5. Além disso, seria interessante realizar as análises da cortina atirantada no viés de estabilidade interna, capacidade de carga da fundação, ruptura do painel projetado e deformação excessiva. Para o solo grampeado, seria importante analisar a estabilidade interna, verificação do deslizamento, tombamento e capacidade de carga

da fundação, além da verificação da resistência estrutural do paramento, punção e estabilidade local entre os grampos junto a face de deslizamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33p.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5629**: Tirantes ancorados no terreno – Projeto e execução. Rio de Janeiro, 2018. 38p.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16920**: Muros e taludes em solos reforçados. Parte 1: solos reforçados em aterros. Parte 2: solos grampeados. Rio de Janeiro, 2021, 27p.

ABRAMENTO, M.; KOSHIMA, A.; ZIRLIS, A. C. Reforço do terreno. *In*: VÁRIOS AUTORES. **Fundações**: teoria e prática, 2ª ed. São Paulo: Pini, 1998, cap. 18, p.641-690.

CLOUTERRE. **Recommendations Clouterre 1991. Soil mailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing**. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chausseés, Presses de l'ENPC. English Language Translation, 1991. 302p.

CONSÓRCIO TRANSOCEÂNICO. **Memória de Cálculo – Projeto Executivo das Contenções - Etapa 05**. Salvador, 2019.

DUTRA, V. A. S.. **Projeto de Estabilização de Taludes e Estruturas de Contenção englobando Dimensionamento Geotécnico e Estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

FHWA-NHI-14-007. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION.– **Geotechnical Engineering Circular No. 7 - Soil Nail Walls - Reference Manual**. Washington: Federal Highway Administration, 2015, 385p.

FINE SOFTWARE. **Análise da capacidade de suporte dos grampos**. Disponível em: <https://www.finesoftware.com.br/ajuda-online/geo5/pt/analise-da-capacidade-de-suporte-dos-grampos-01/>. Acesso em 21 fev 2021.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 122f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

FRANÇA, F. A. N. DE. **Ensaio de arrancamento em solo grampeado executados em laboratório**. 2007. 125f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GEORIO - Secretaria Municipal de Obras. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEORIO). **Manual Técnico de Encostas: Análise e Investigação**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2000.

GERSCOVICH, D., DANZIGER, B.R. e SARAMAGO, R. **Contenções – teoria e aplicações em obras**. Editora de Textos, 2016, 319p.

GONDIM, A. **Dimensionamento Geotécnico de solo grampeado**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, 2018, 70p.

IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas. Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo. **Manual de geotecnia: Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas**. São Paulo, 1991.

LIMA, A.P. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss**, 2007, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 431p.

MAGALHÃES, T. A.; AZEVEDO, C. P. B. Análise Técnica e Econômica de Estruturas de Contenção de Taludes. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 18., 2016, Belo Horizonte. Anais eletrônicos.* Disponível em: <http://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobramseg2016/ArquivosCOBRAMSEG2016.zip> Acesso em 08 jun. 2020

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M.; ZIRLIS A. C. Experience with soil nailing in Brazil: 1970-1994. **Geotechnical Engineering**, v.113, p. 93-106, abr. 1995.

PITTA, C. A.; SOUZA G. J. T. DE; ZIRLIS, A. C. Alguns detalhes da prática de execução do solo grampeado. **Fundações e obras geotécnicas**, São Paulo, v.4 n°39, dez 2013.

RANZINI, S. M. T.; NEGRO JR, A. Obras de contenção: Tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas. *In: VÁRIOS AUTORES. Fundações: teoria e prática, 2ª ed.* São Paulo: Pini, 1998, cap. 13, p. 497-516.

SAES, J. L.; STUCCHI F. R.; MILITISKY J. Concepção de obras de contenção. *In: VÁRIOS AUTORES. Fundações: teoria e prática, 2ª ed.* São Paulo: Pini, 1998, cap. 14, p. 517-536.

SILVA, D.P. **Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaio de arrancamento realizados em campo e laboratório**. Tese de Doutorado, EESC/USP, 2009, 313p.

SPRINGER, F. O. **Ensaio de Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaiss**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-RIO, 2006, 309p.

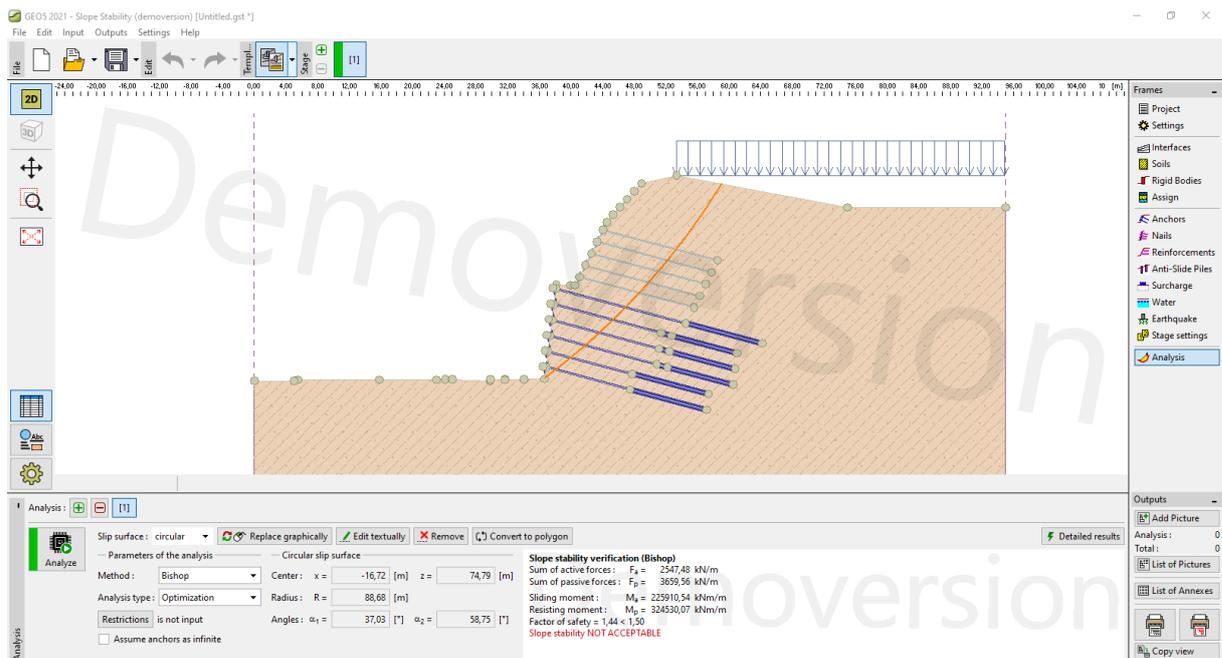
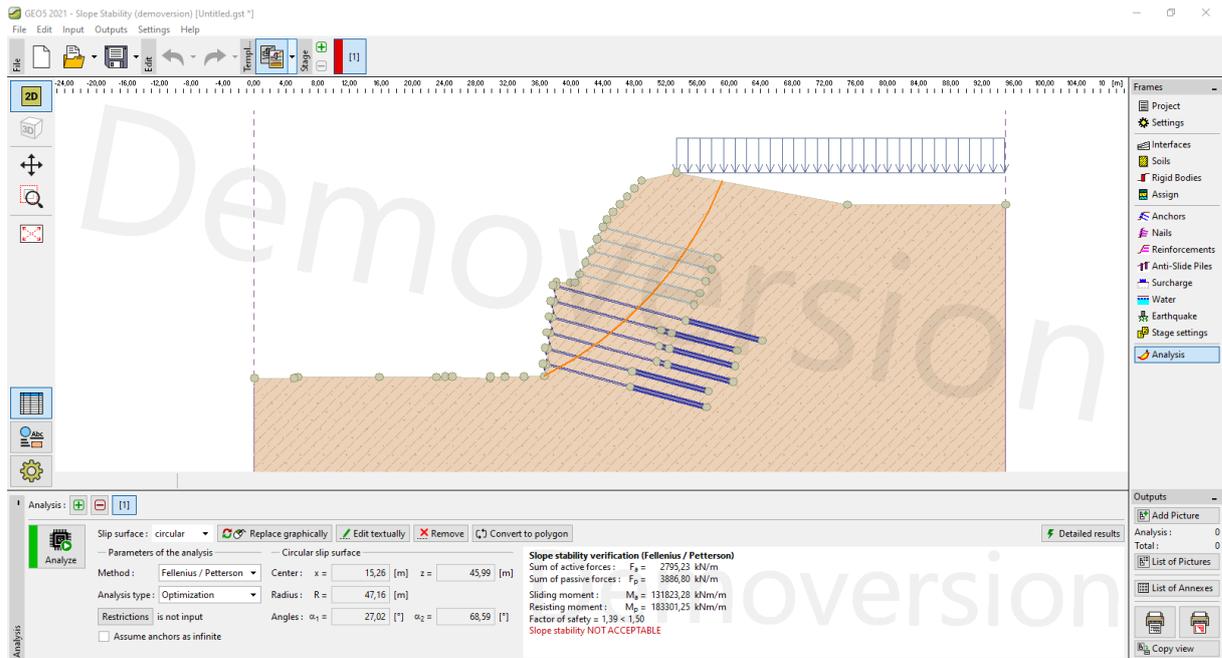
SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA LTDA. **Manual de serviços geotécnicos solotrat**. 6ª ed. São Paulo, 2018.

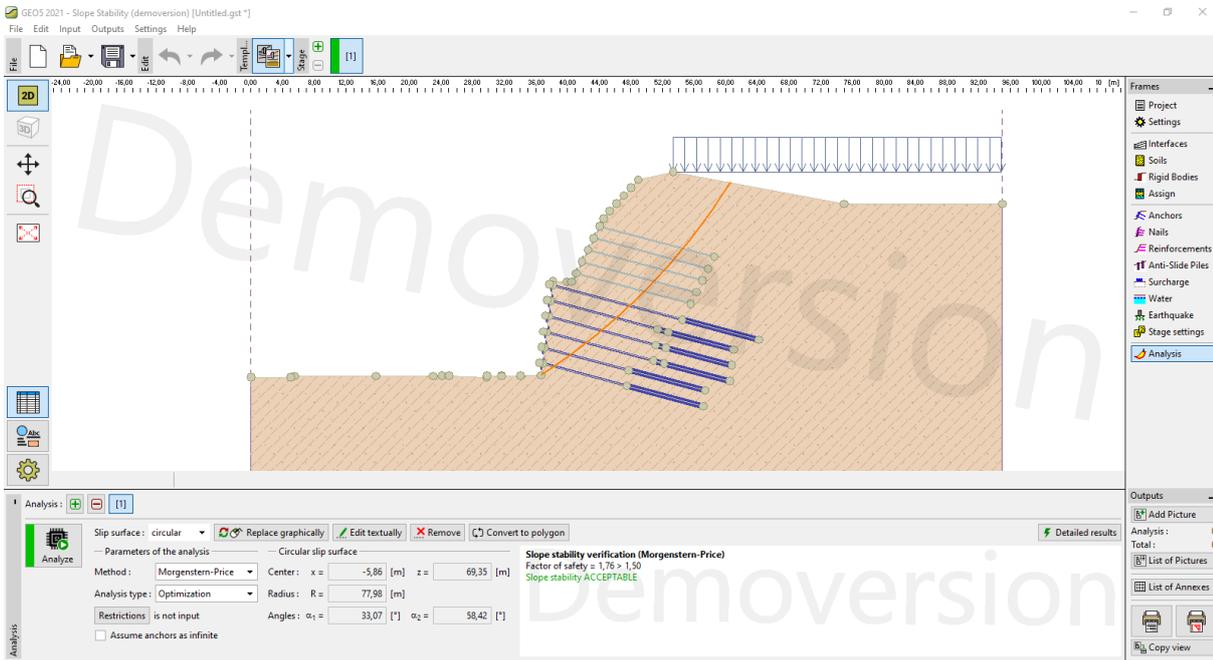
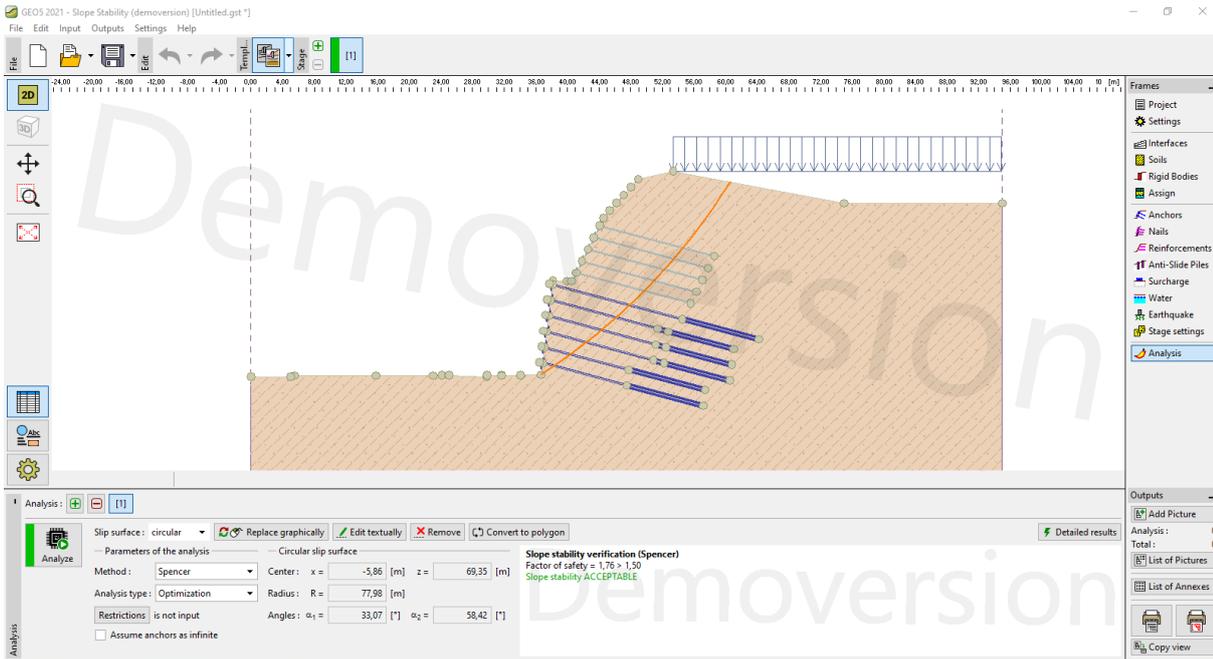
TALUS ENGENHARIA. **O que é a cortina atirantada?** Disponível em: <http://talusengenharia.com.br/o-que-e-a-cortina-atirantada/>. Acesso em 24 jun. 2020.

VILAR, O. M.; BUENO, B DE S. **Mecânica dos Solos: volume II**. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.

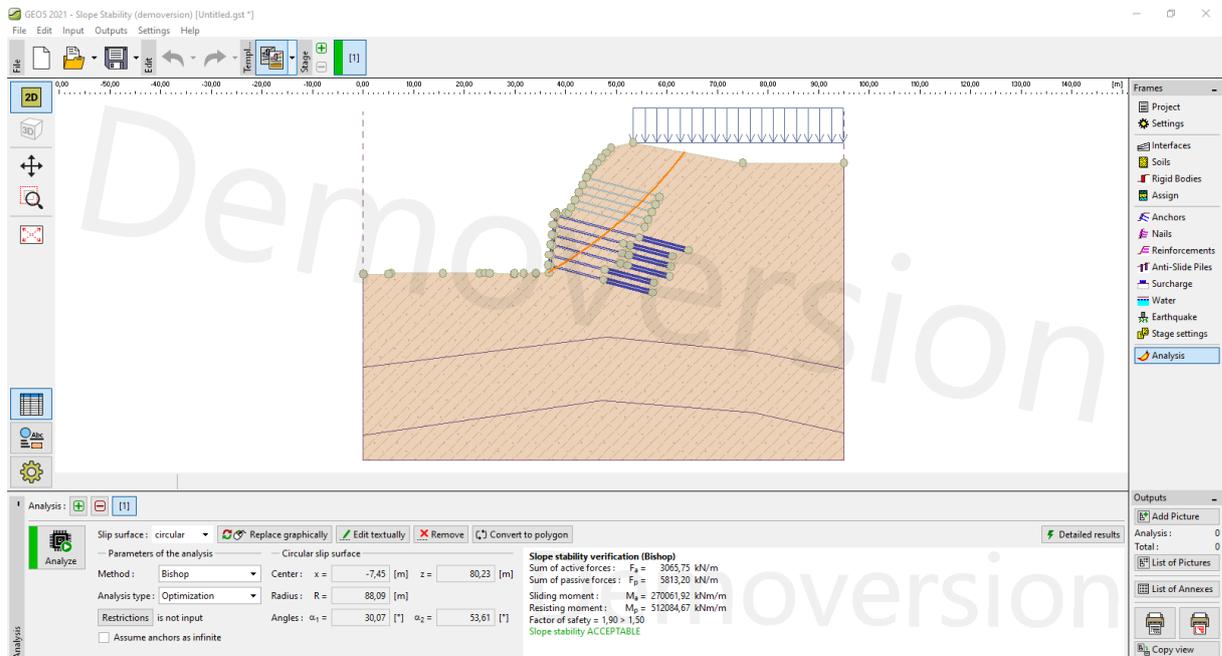
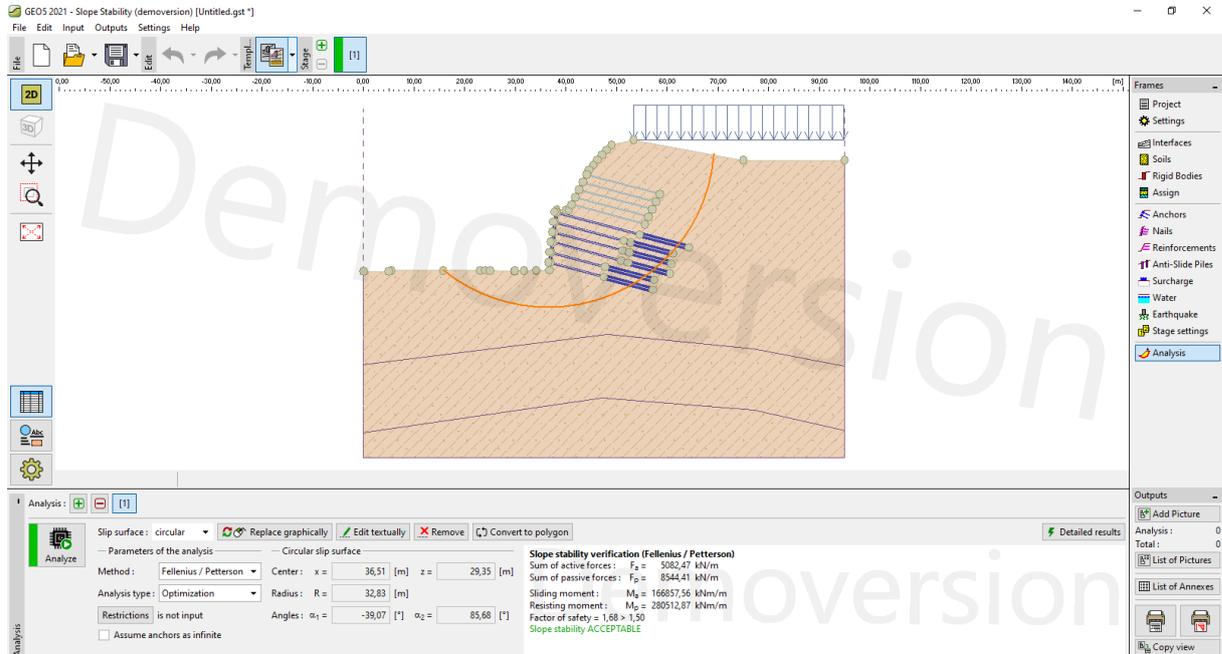
## APÊNDICE

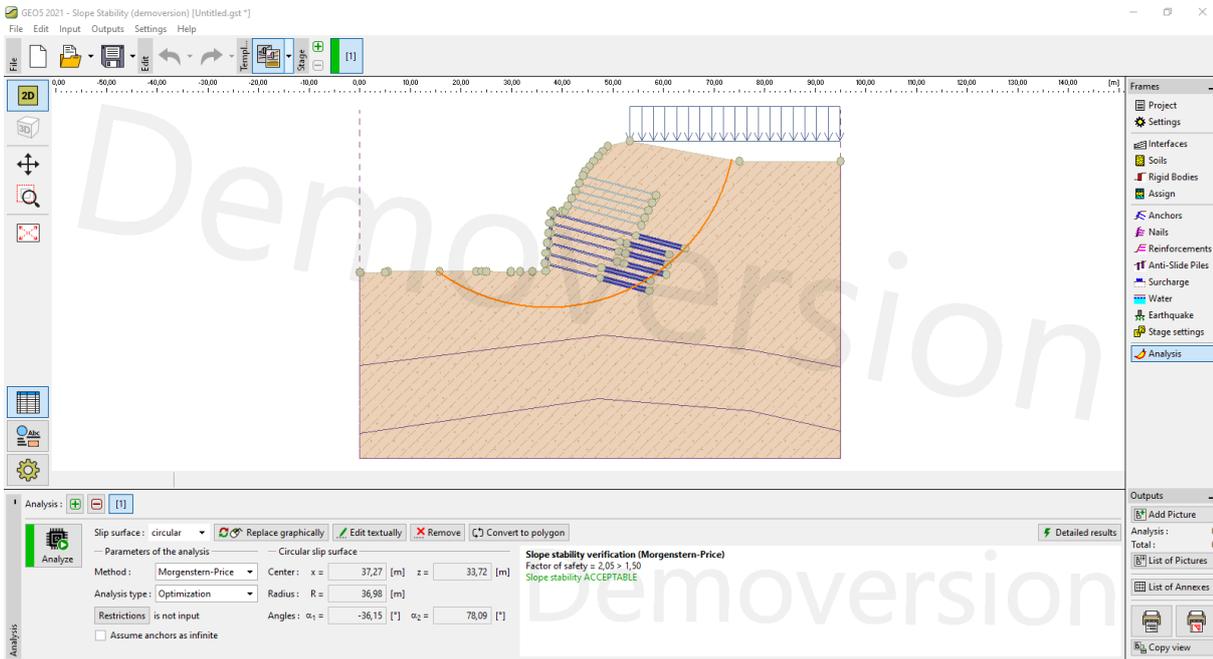
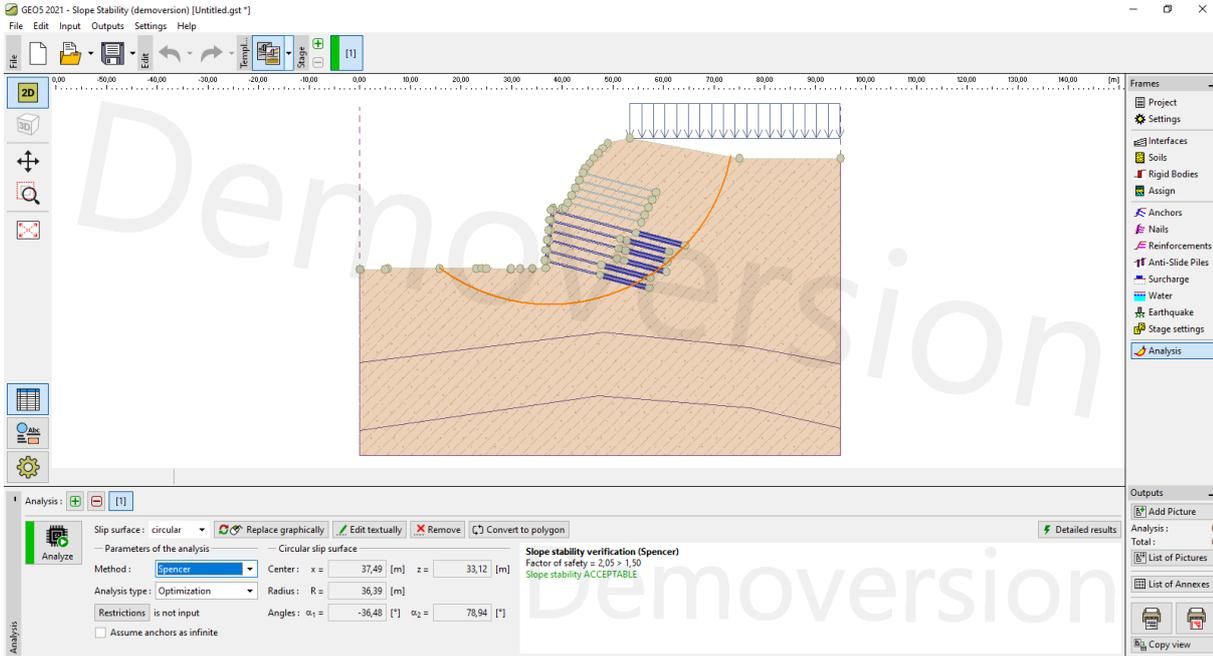
APÊNDICE A – Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7, caso 1 da Tabela 2, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. (também referenciado na Tabela 1 e Tabela 3)



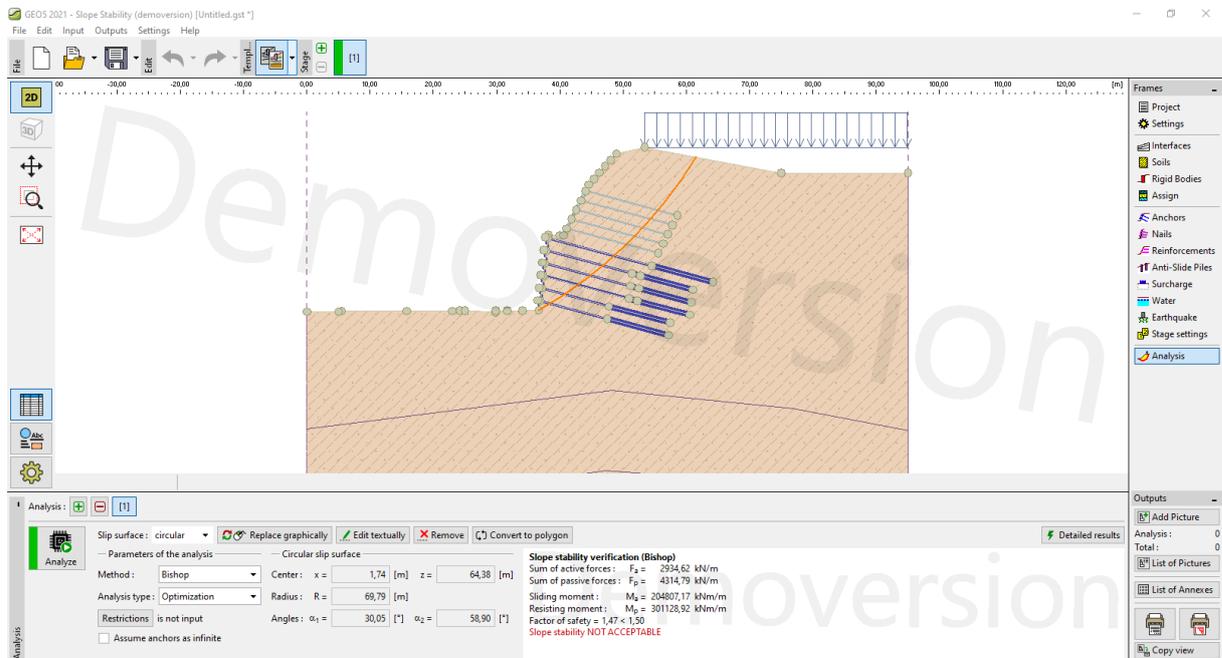
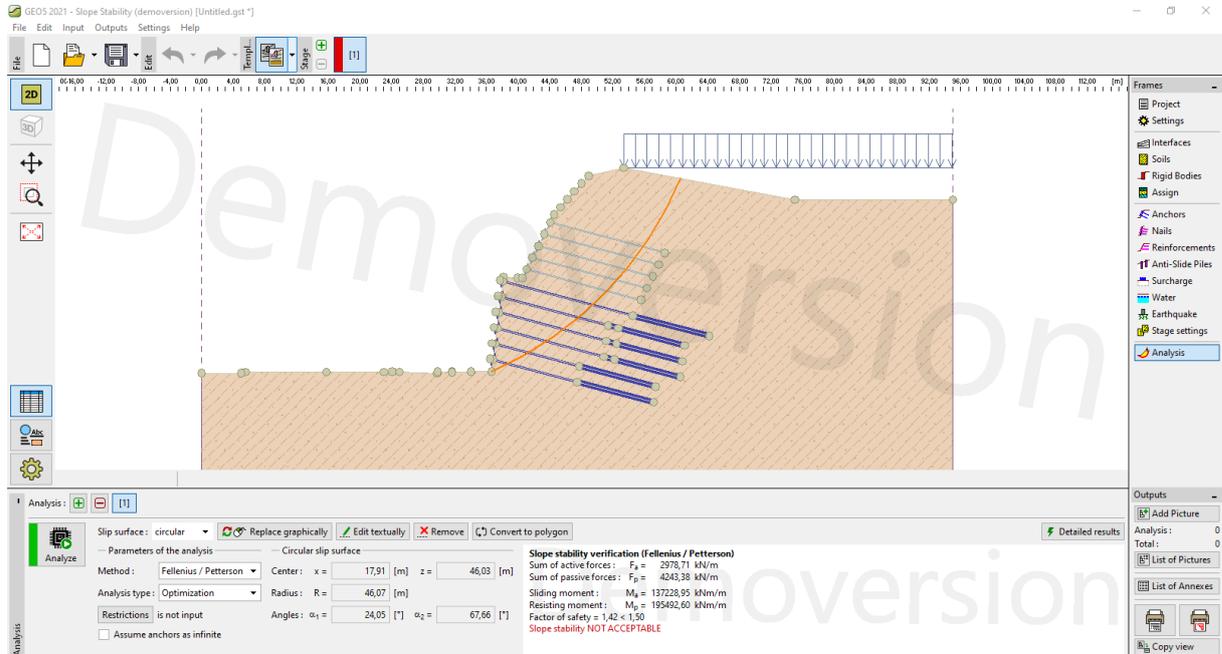


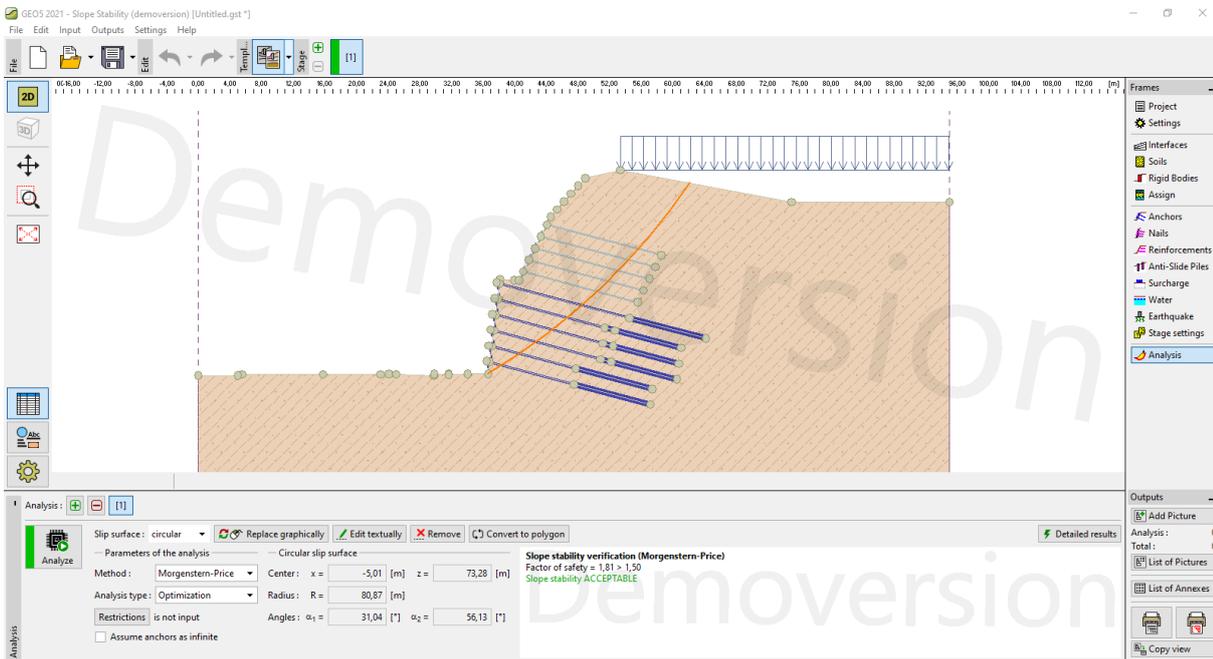
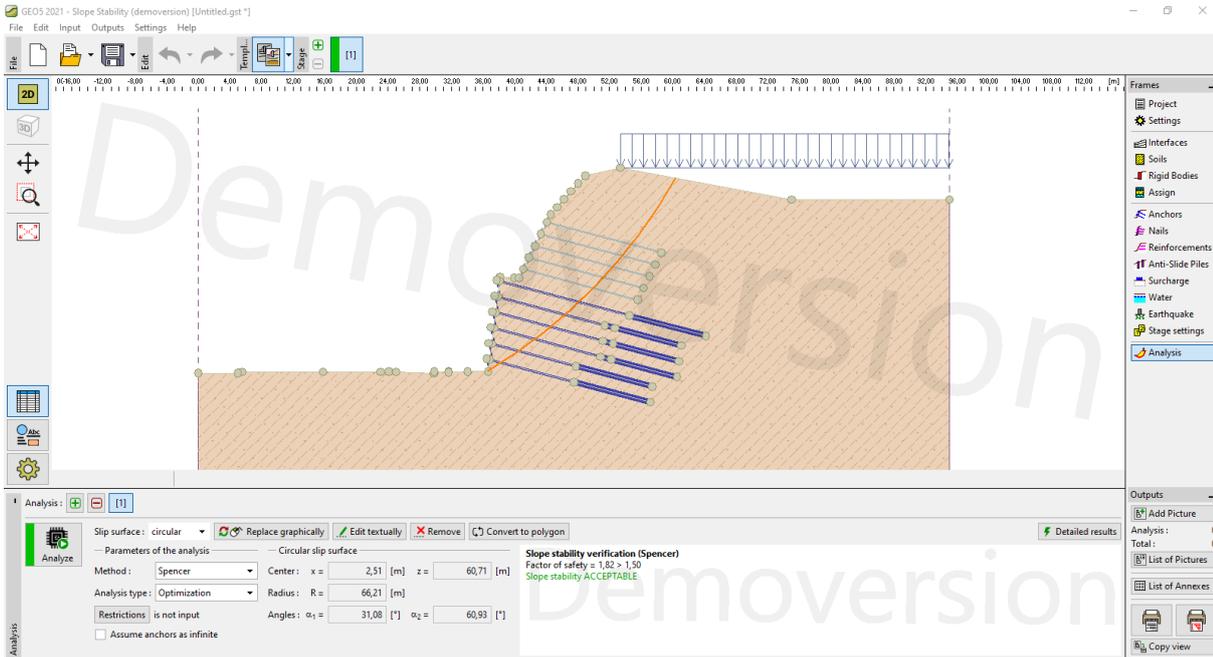
APÊNDICE B – Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7, caso 2 da Tabela 2, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.



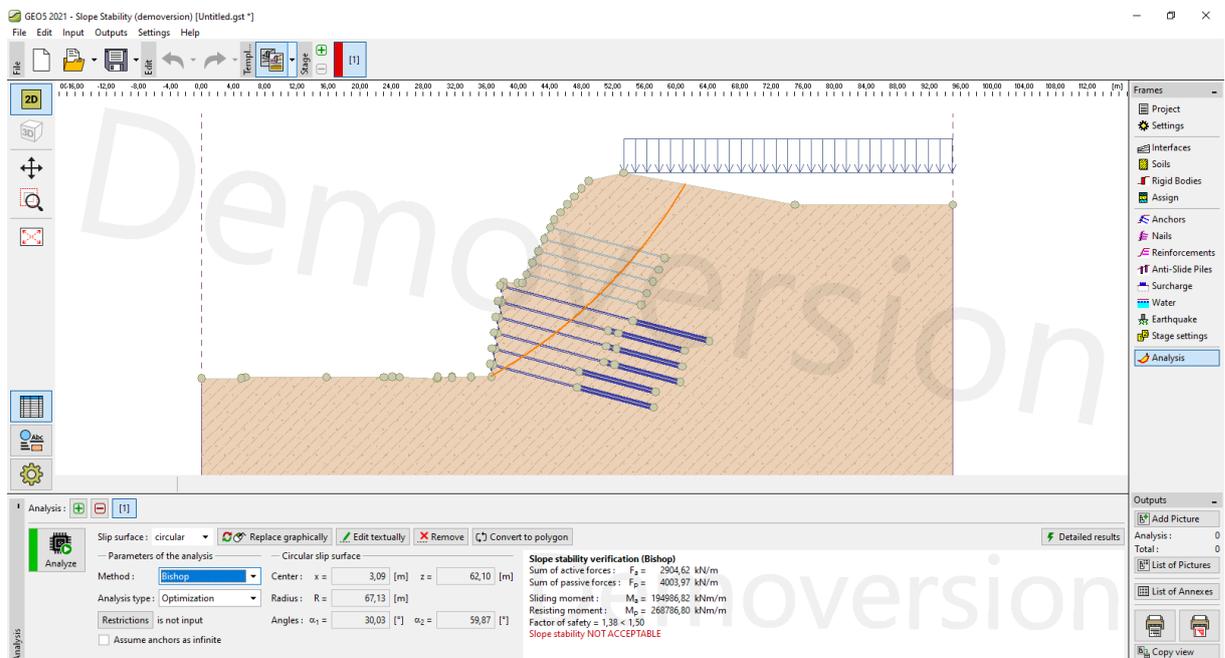
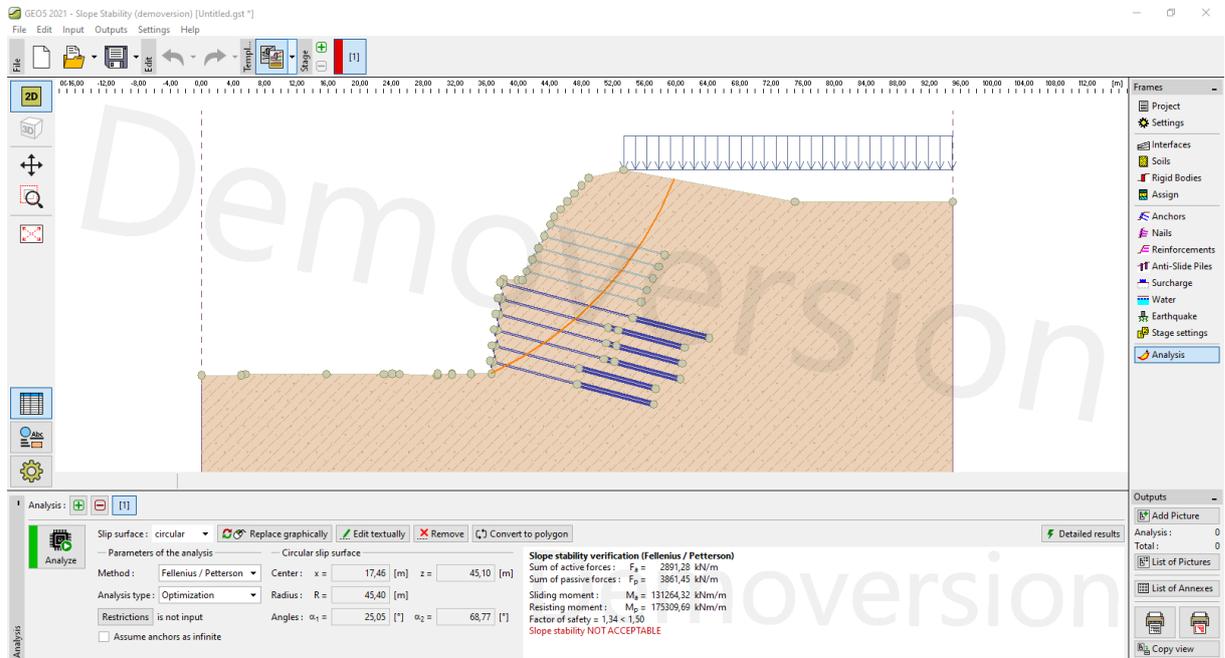


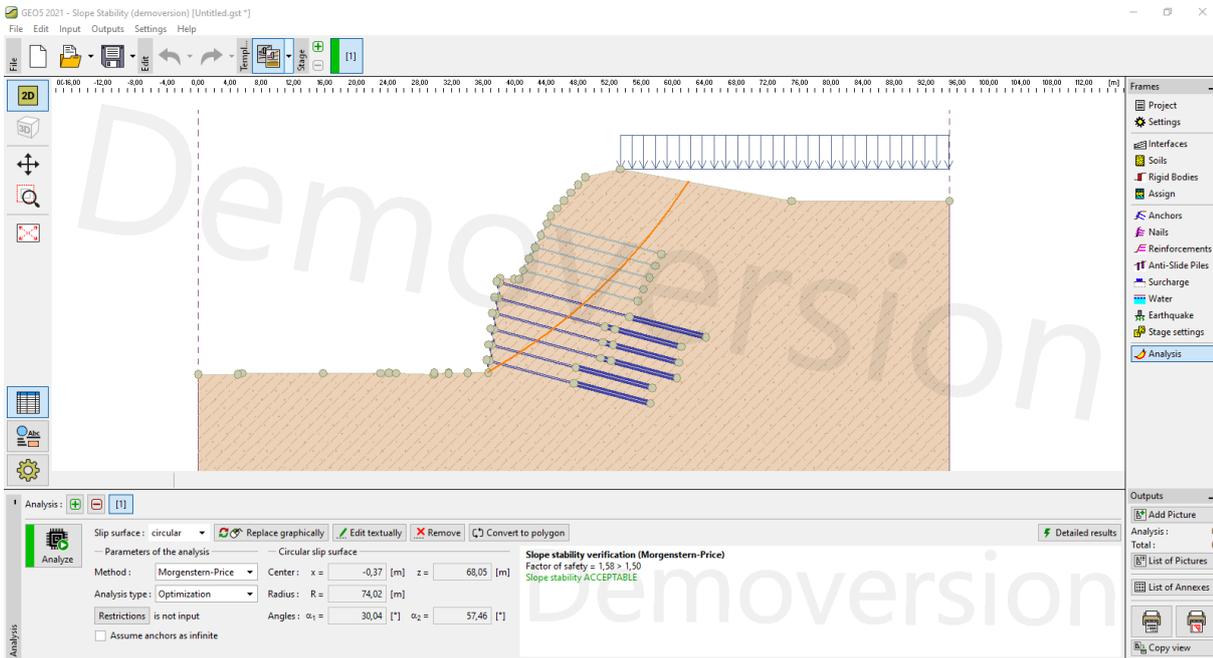
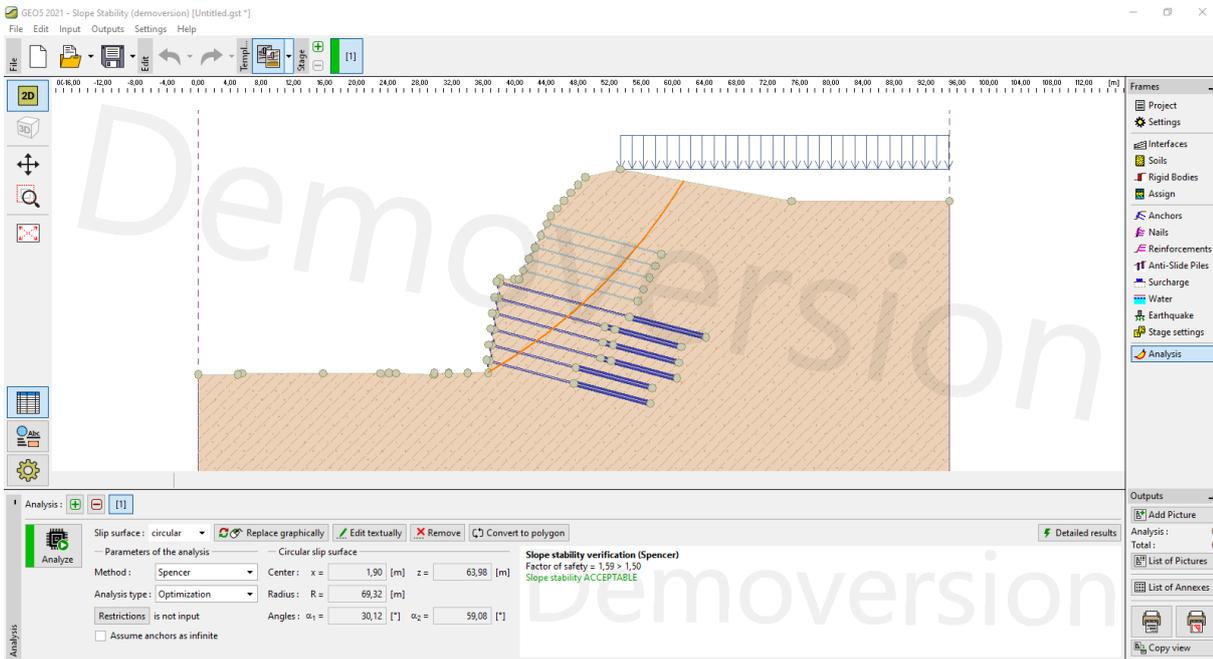
APÊNDICE C – Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7, caso 3 da Tabela 2, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.



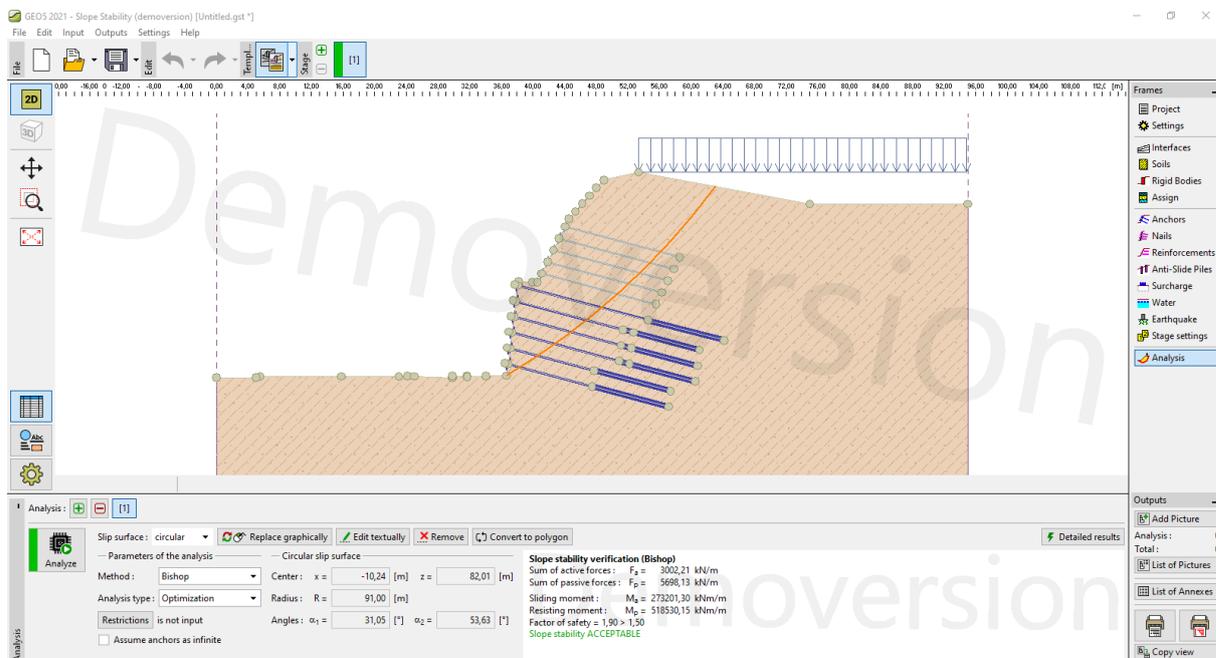
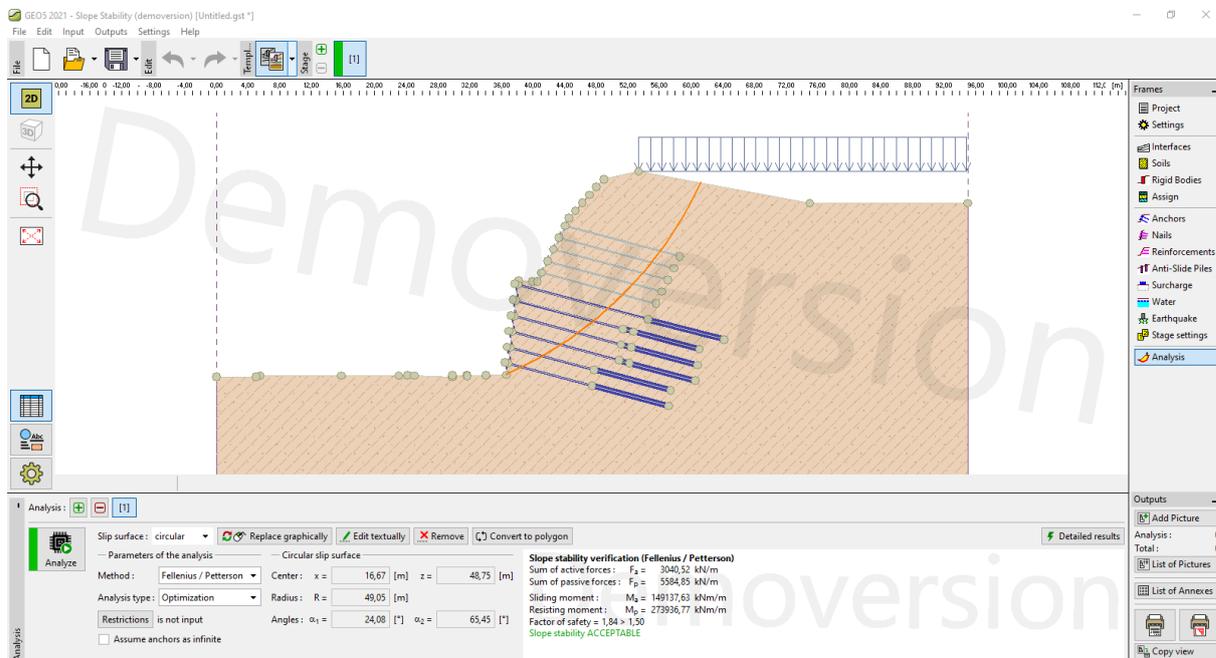


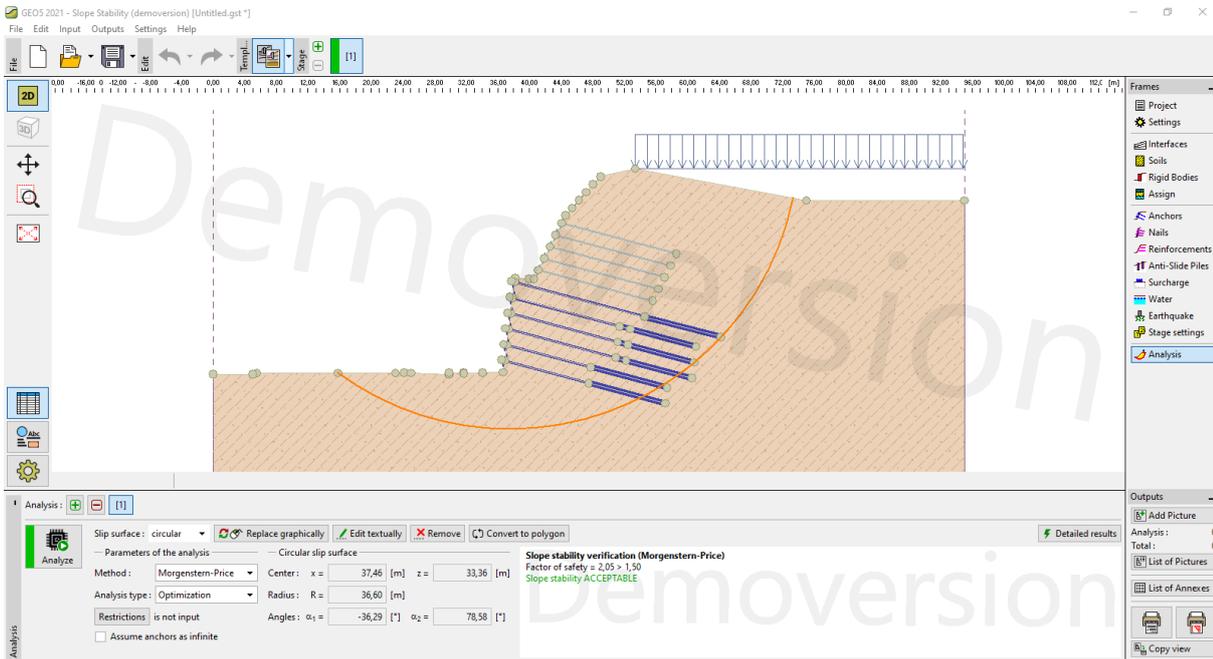
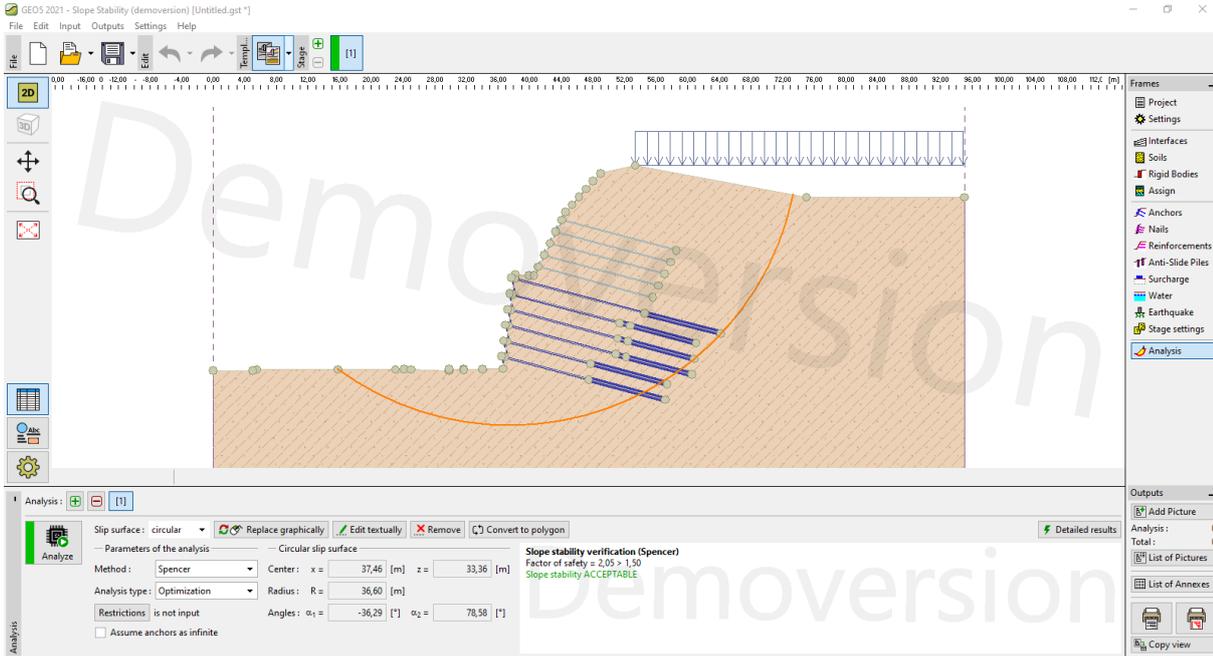
APÊNDICE D - Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7, caso 4 da Tabela 2, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.



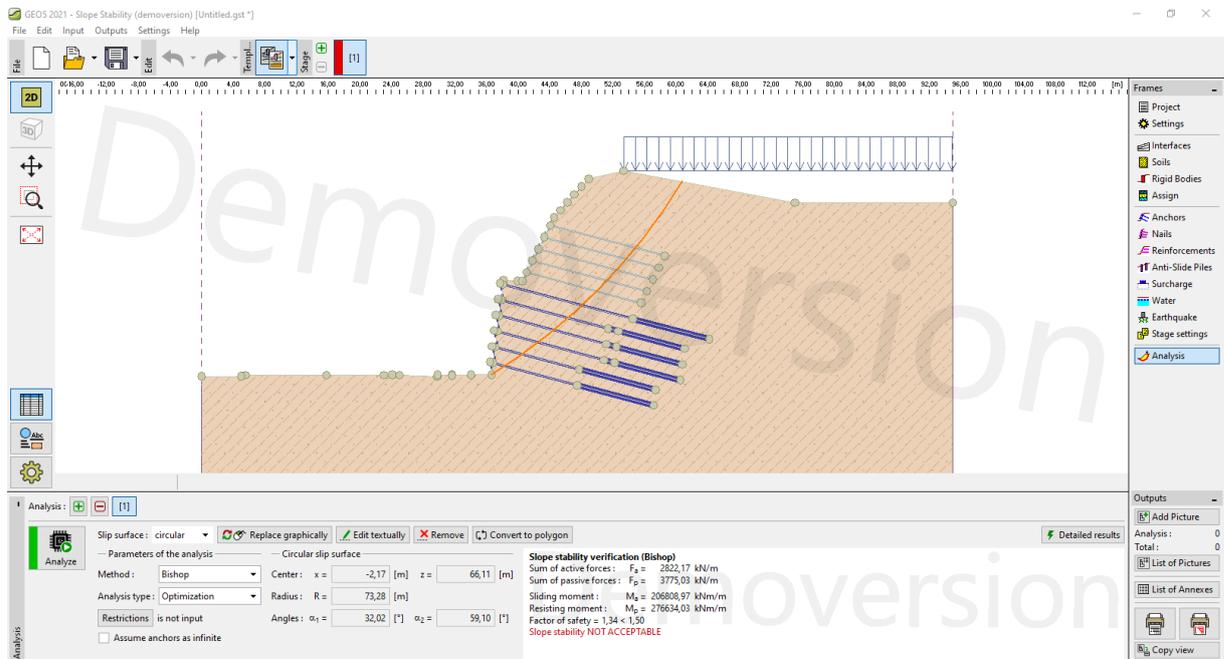
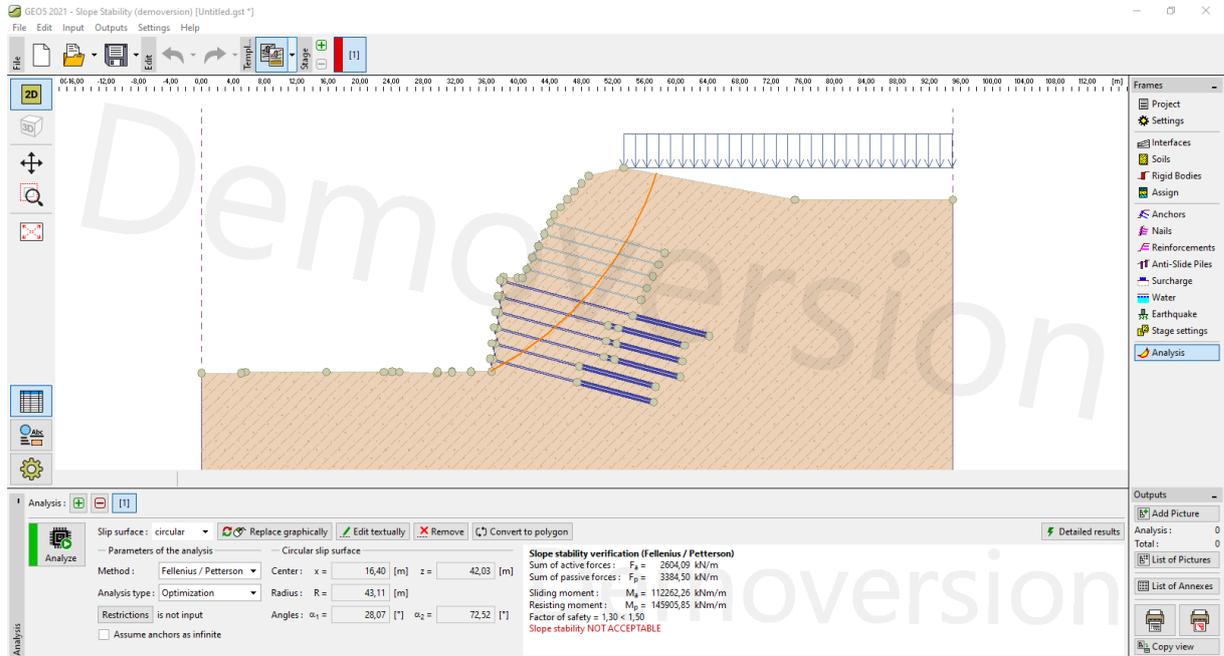


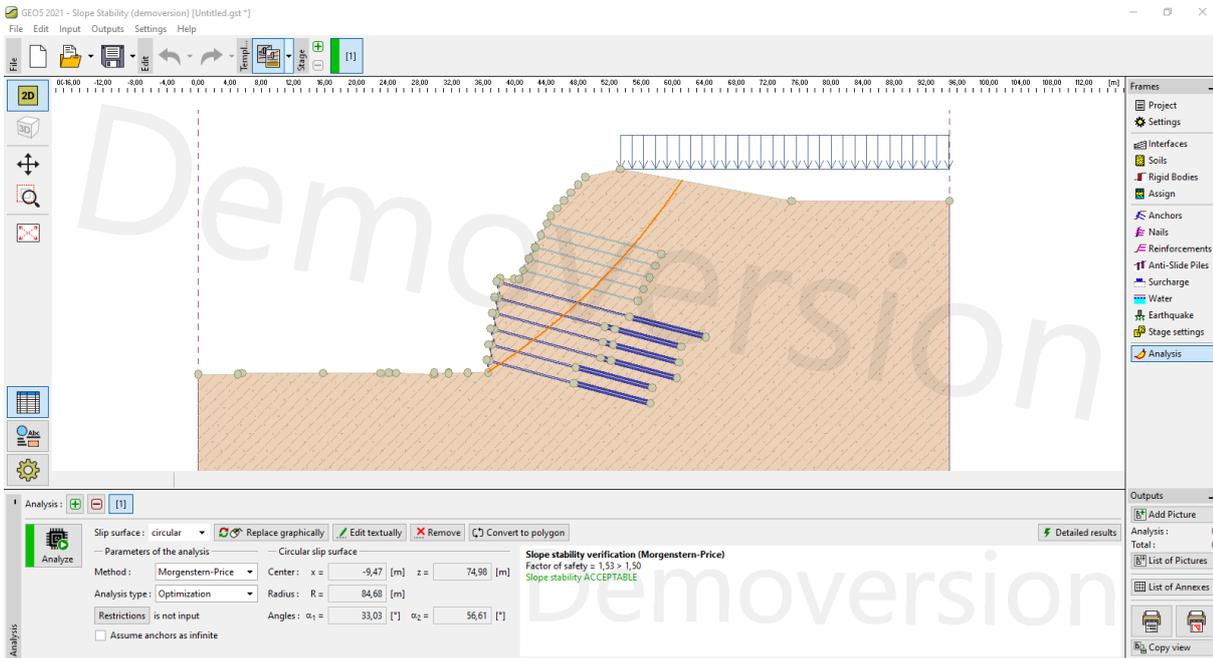
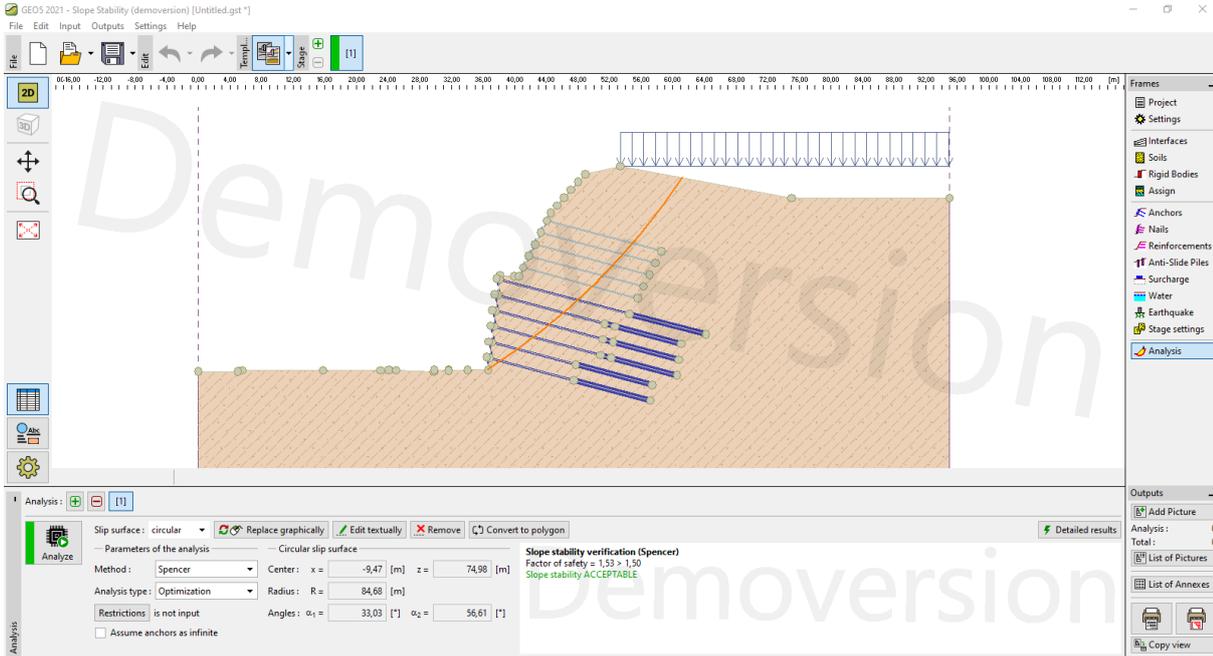
APÊNDICE E - Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7, caso 5 da Tabela 2, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.



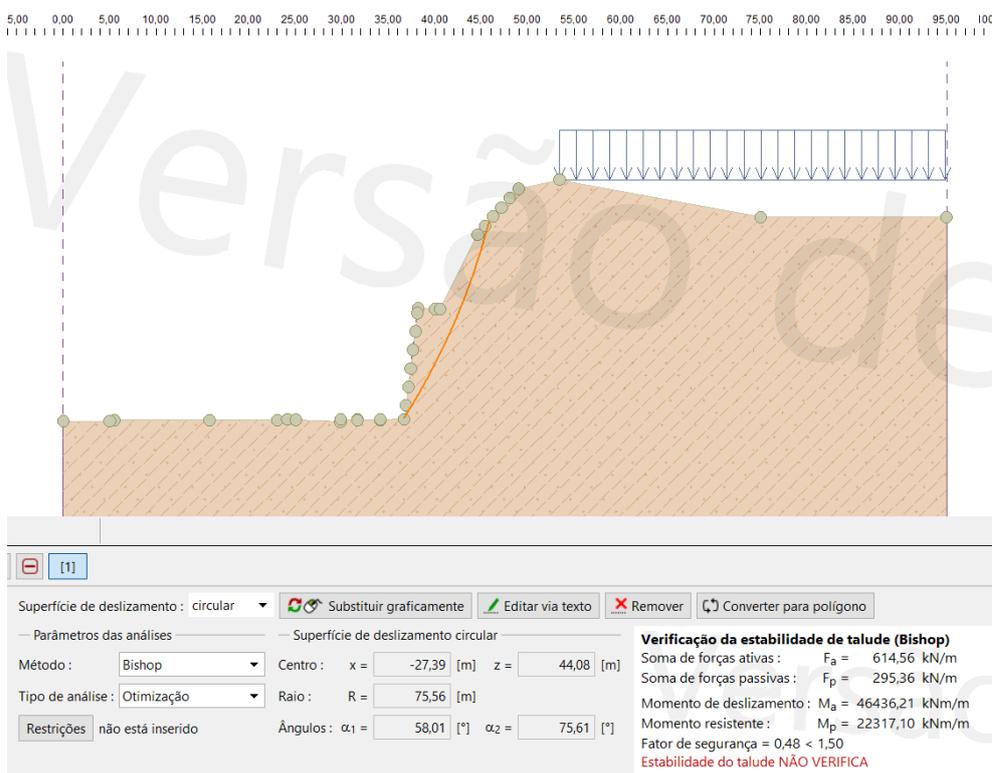
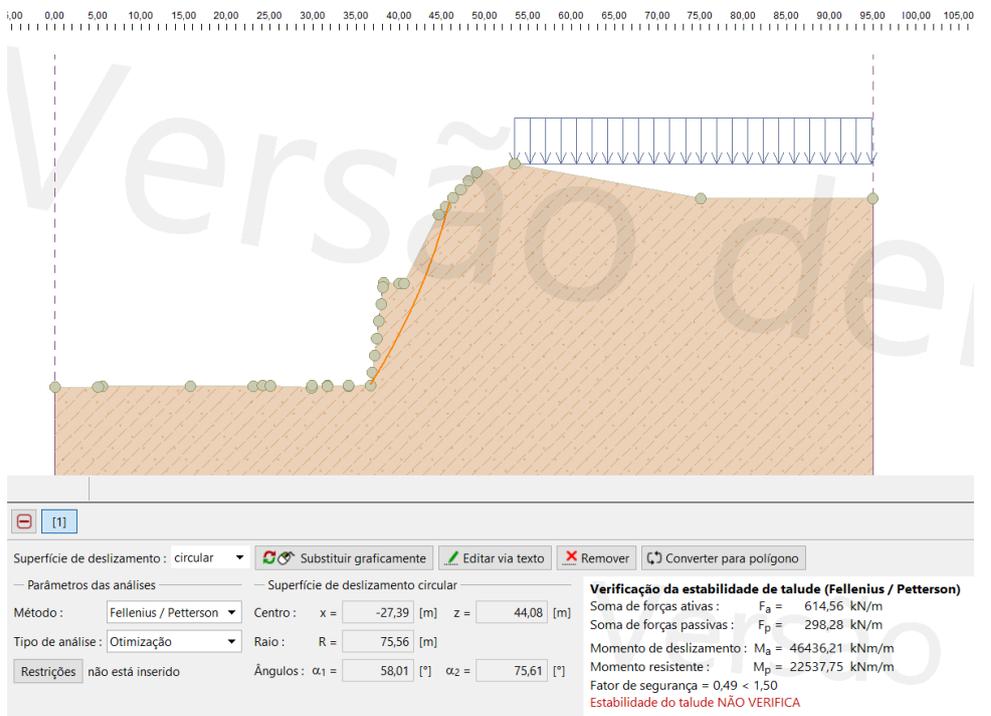


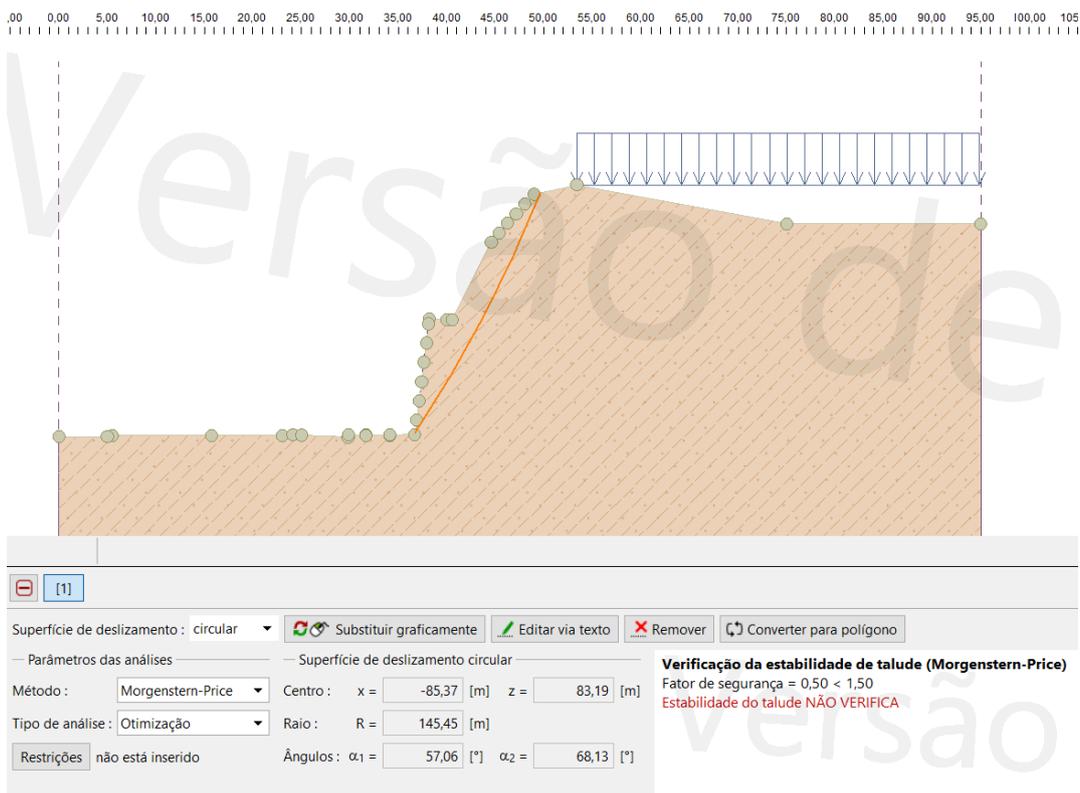
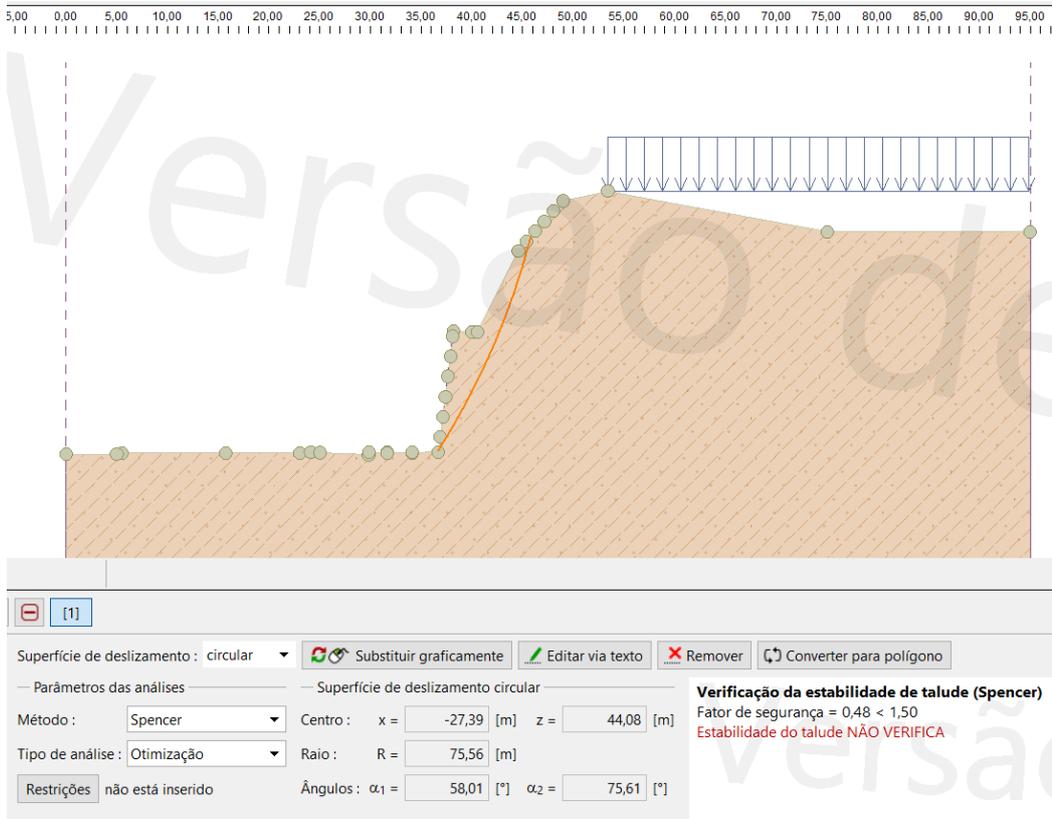
APÊNDICE F - Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7, caso 6 da Tabela 2, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.



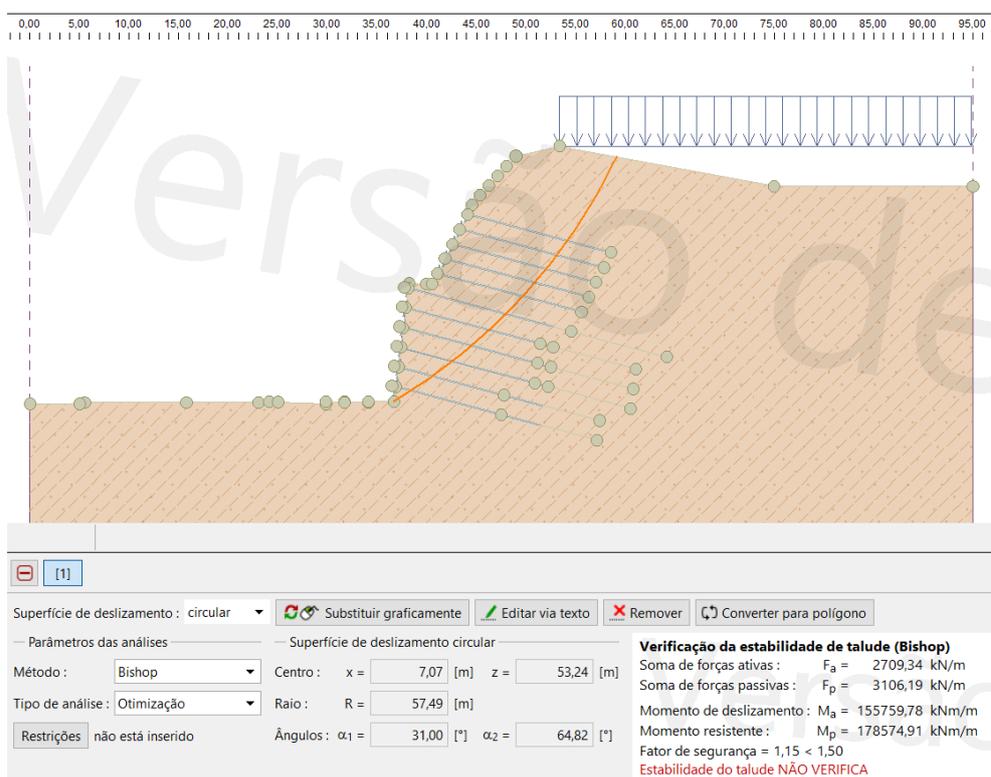
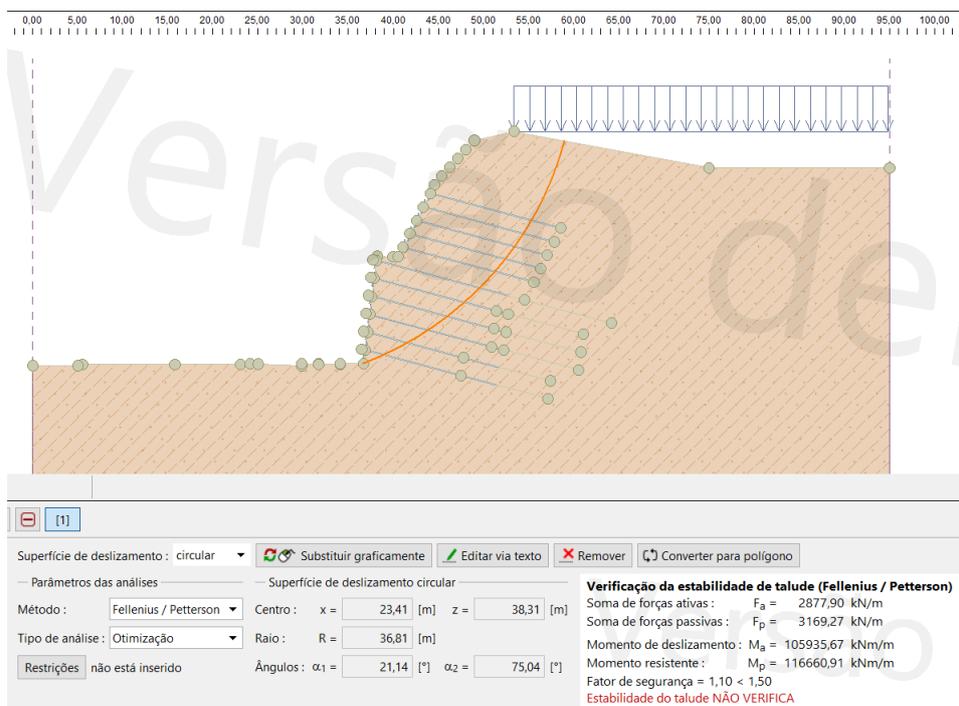


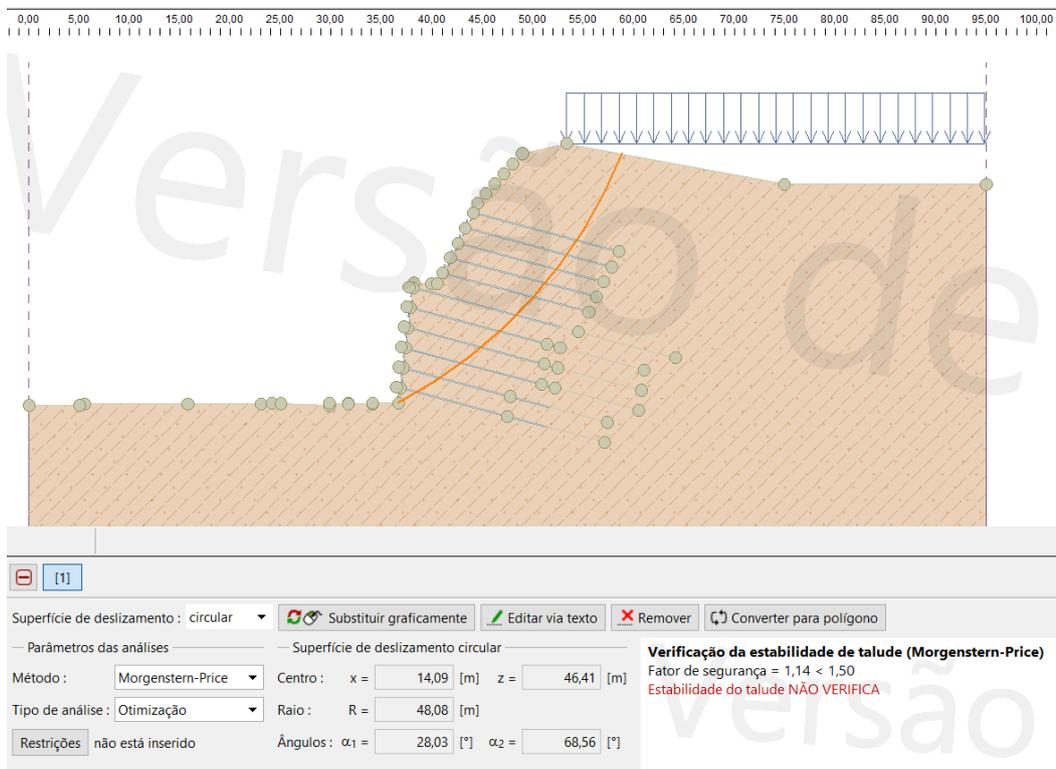
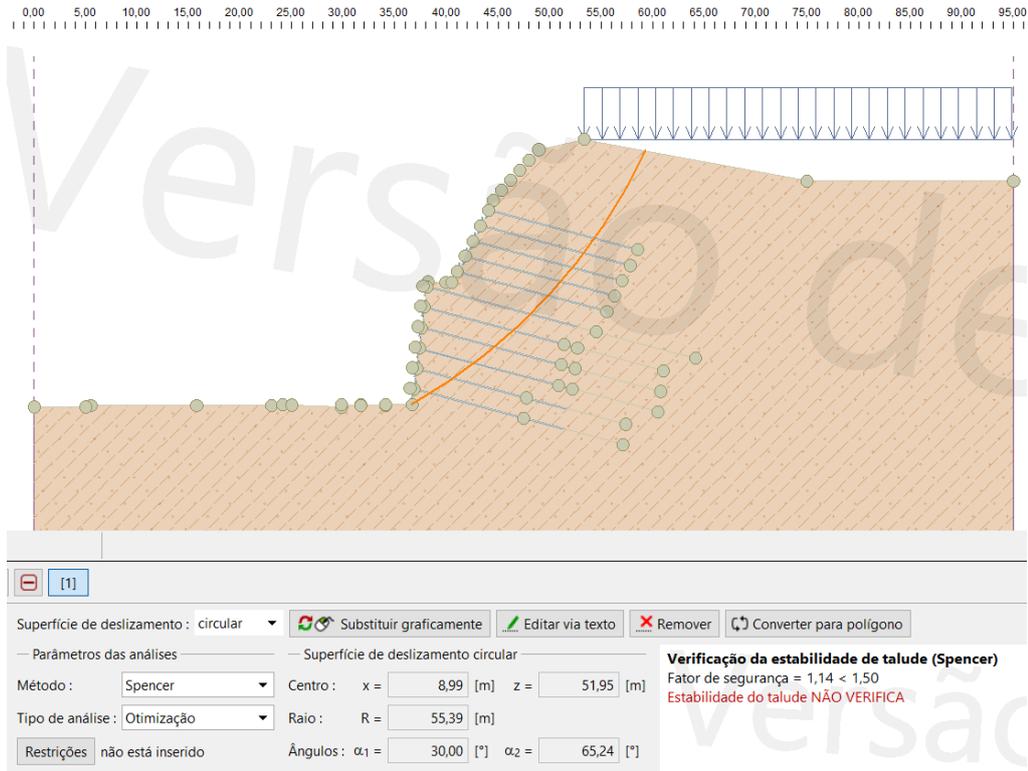
APENDICE G - Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7 sem aplicação de grampos e sem tirantes, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price, referente a Tabela 3.



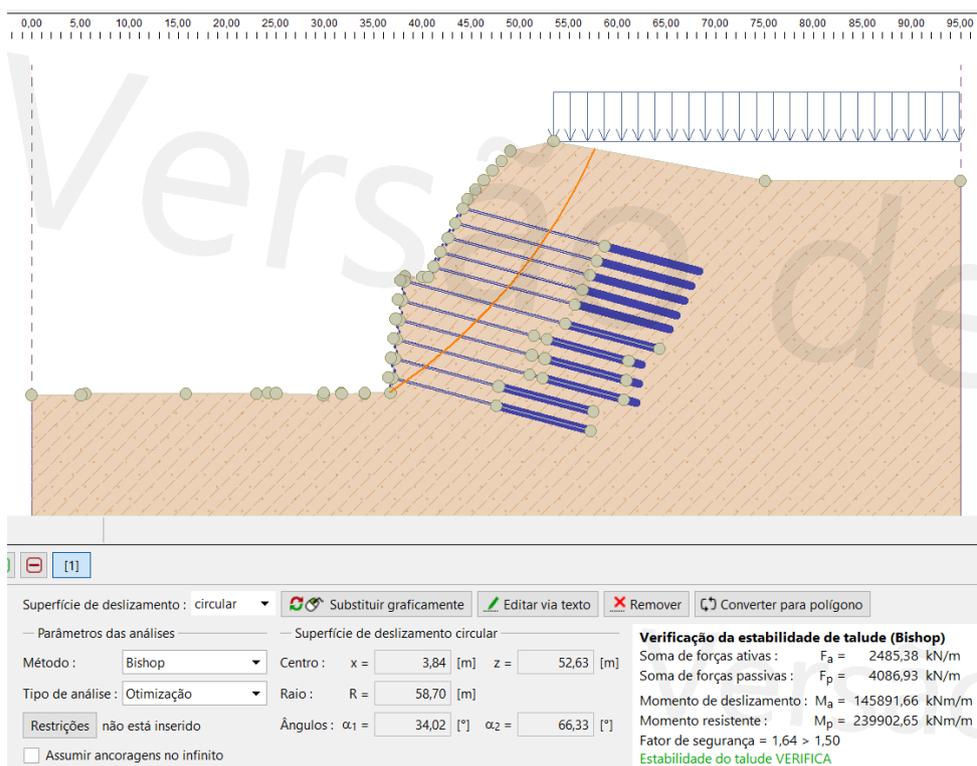
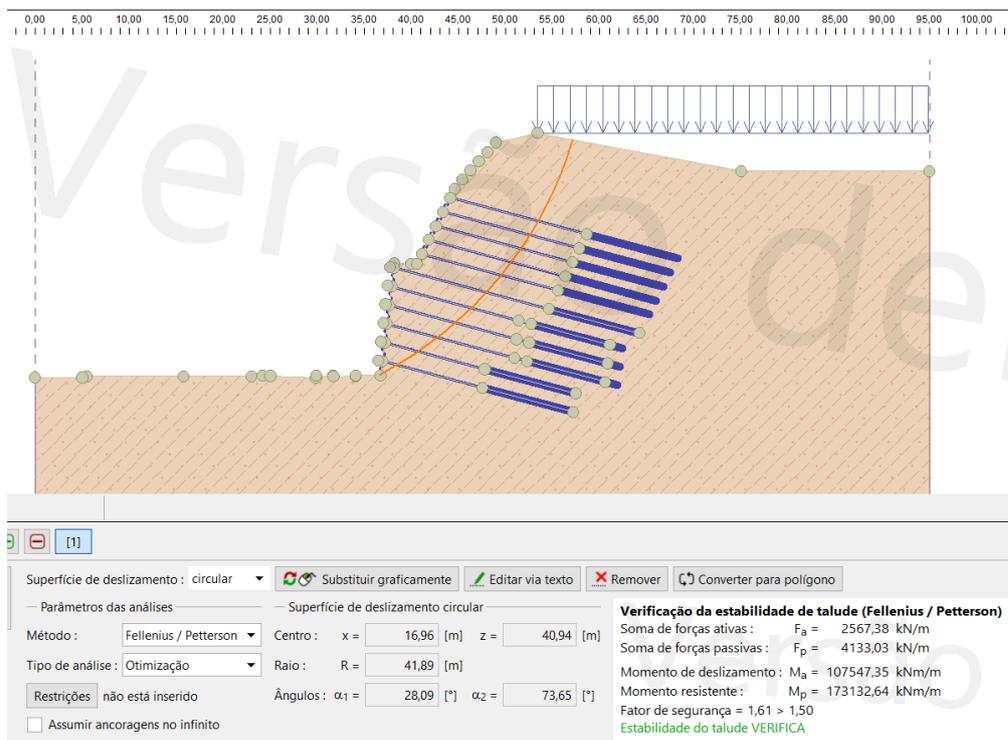


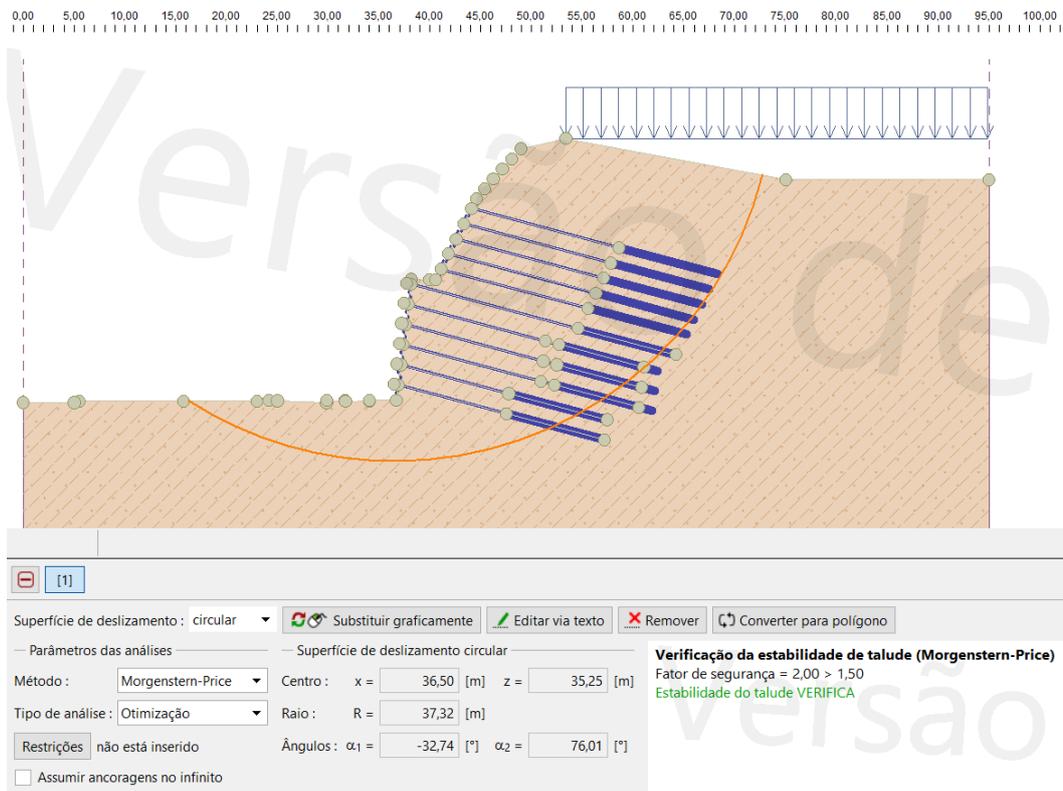
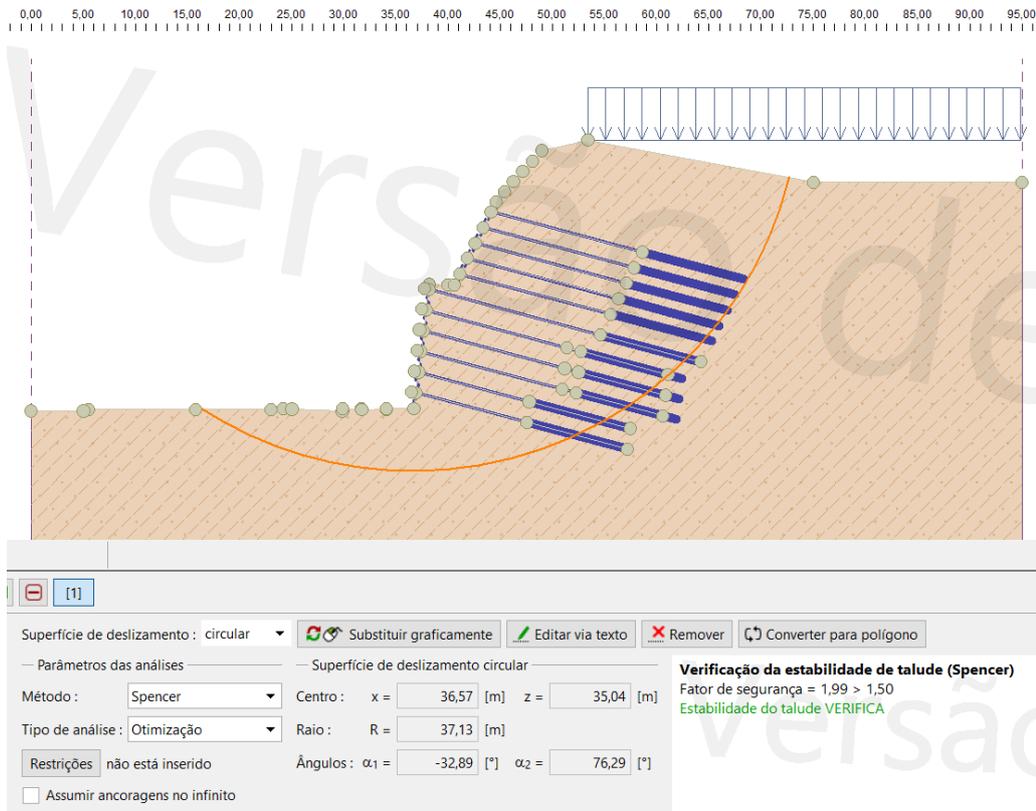
APÊNDICE H - Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7 substituindo a aplicação de tirantes por grampos, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price, ou seja, caso do talude só com grampos da Tabela 3.



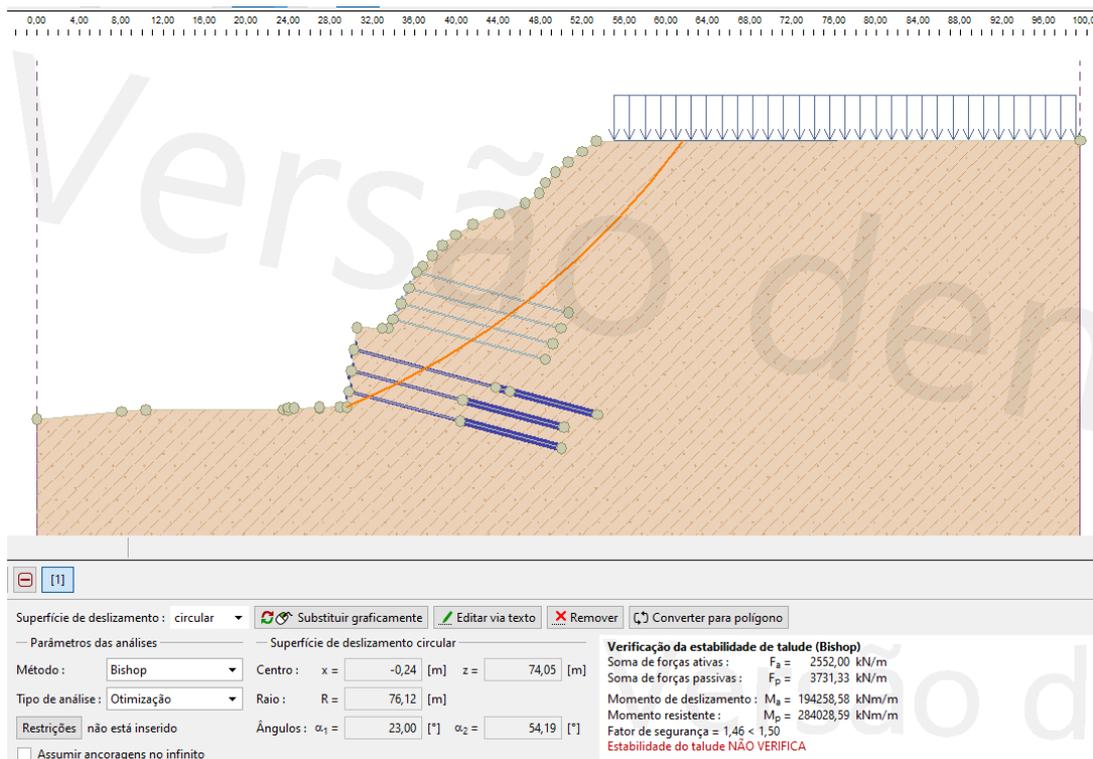
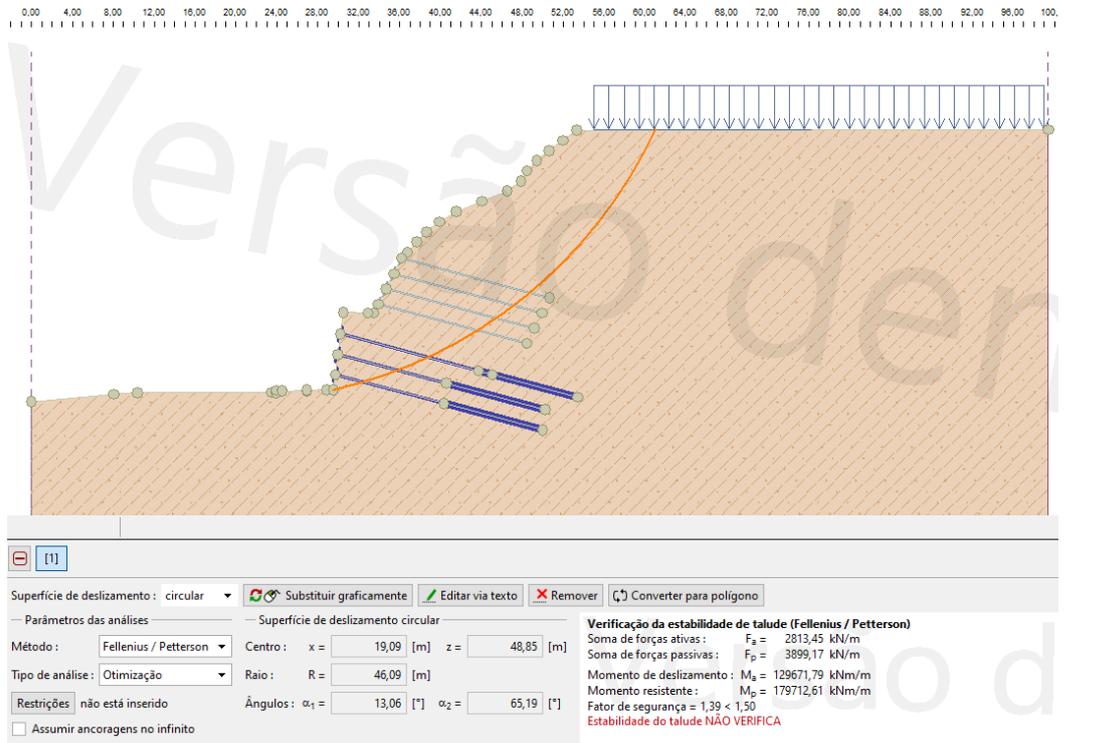


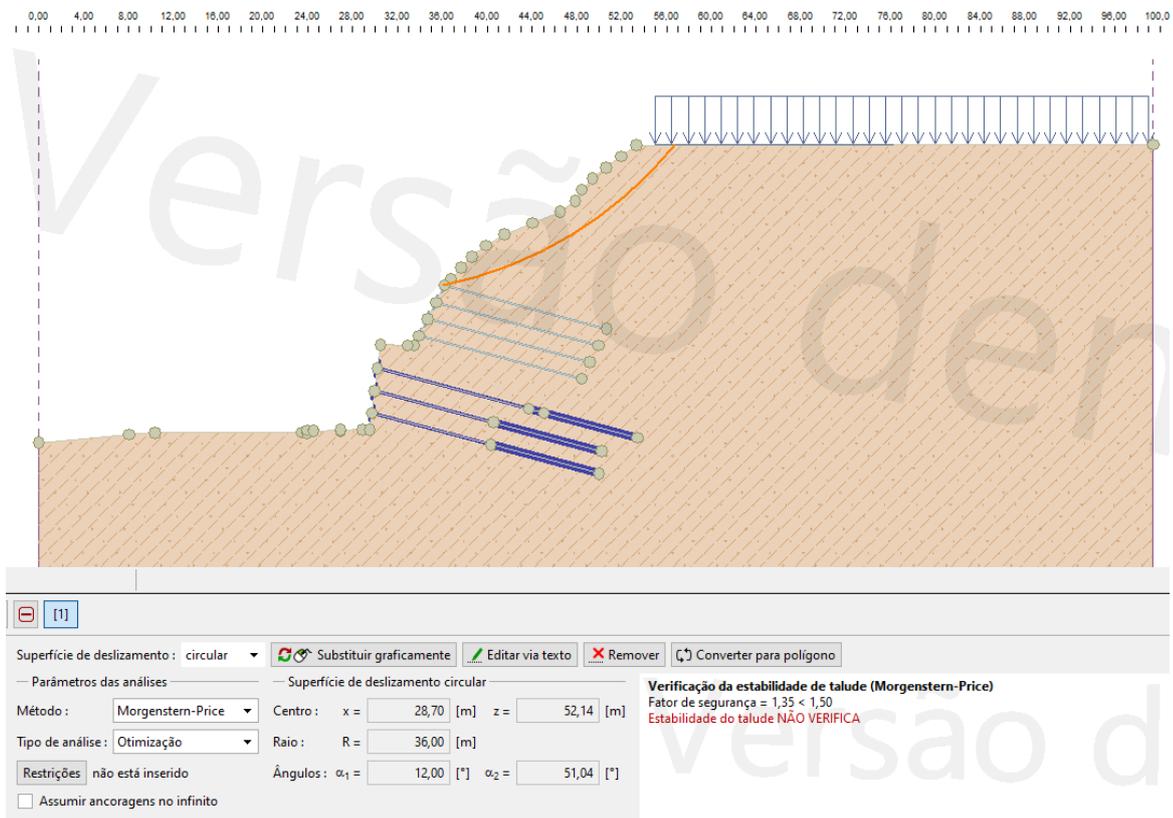
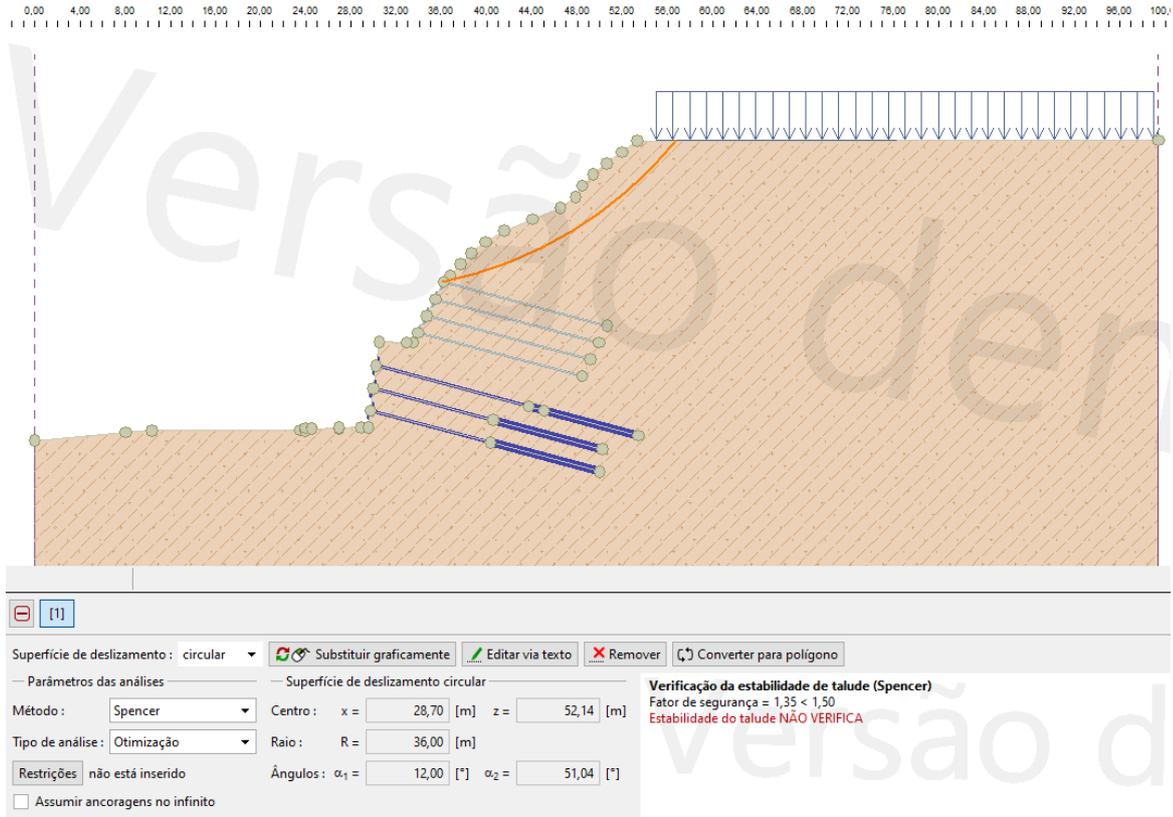
APÊNDICE I - Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 7 substituindo a aplicação de grampos por tirantes, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price, ou seja, caso do talude só com tirantes da Tabela 3.

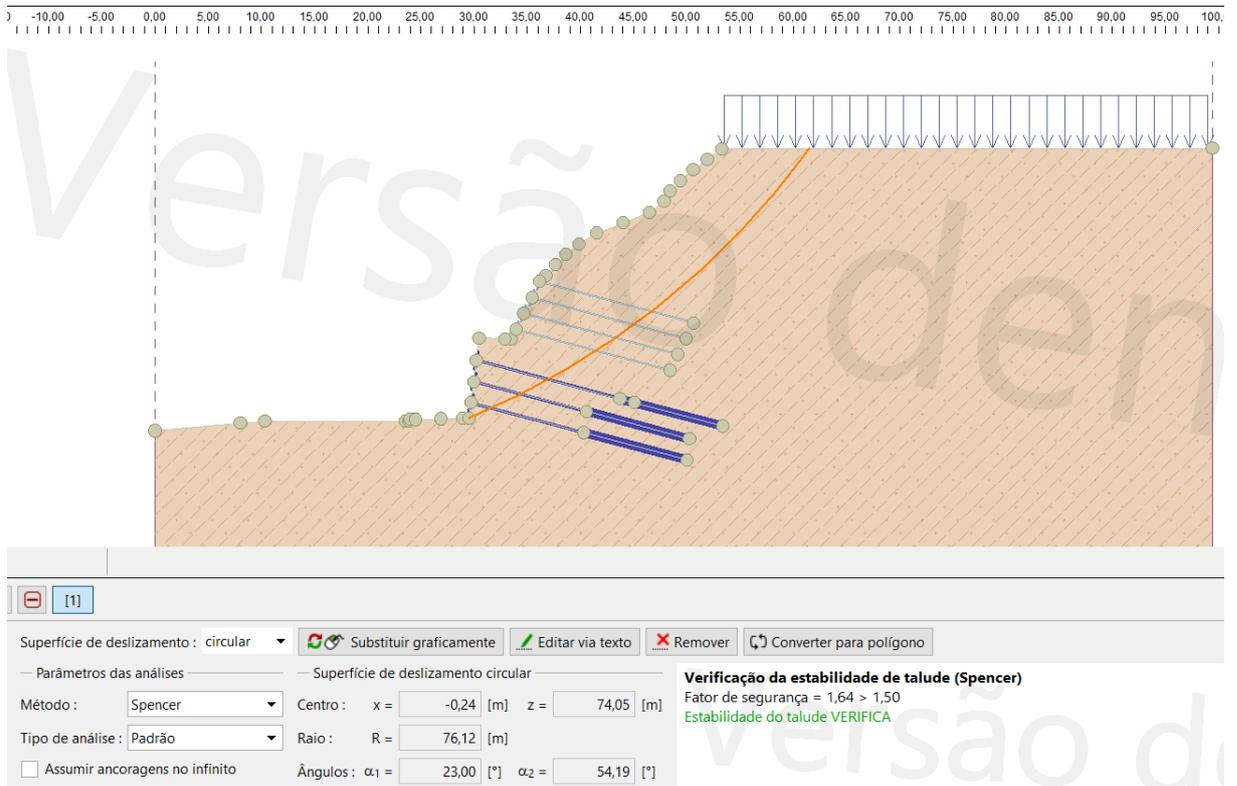
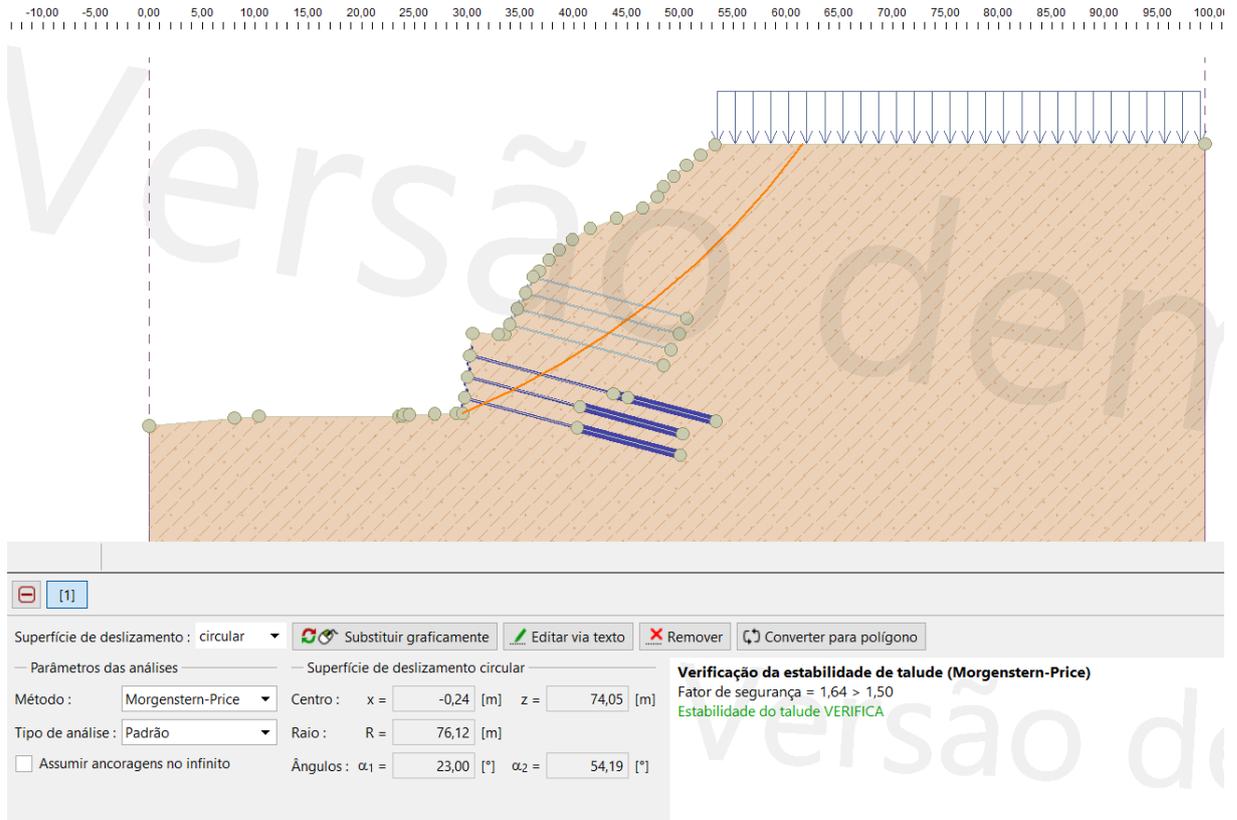




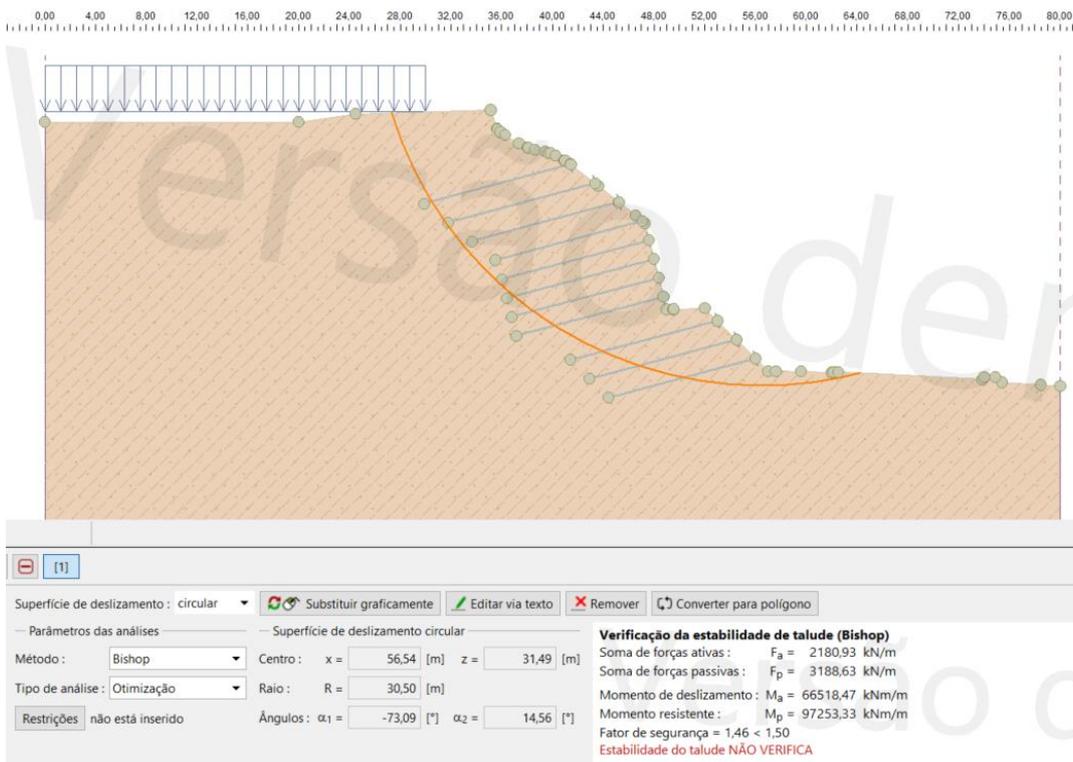
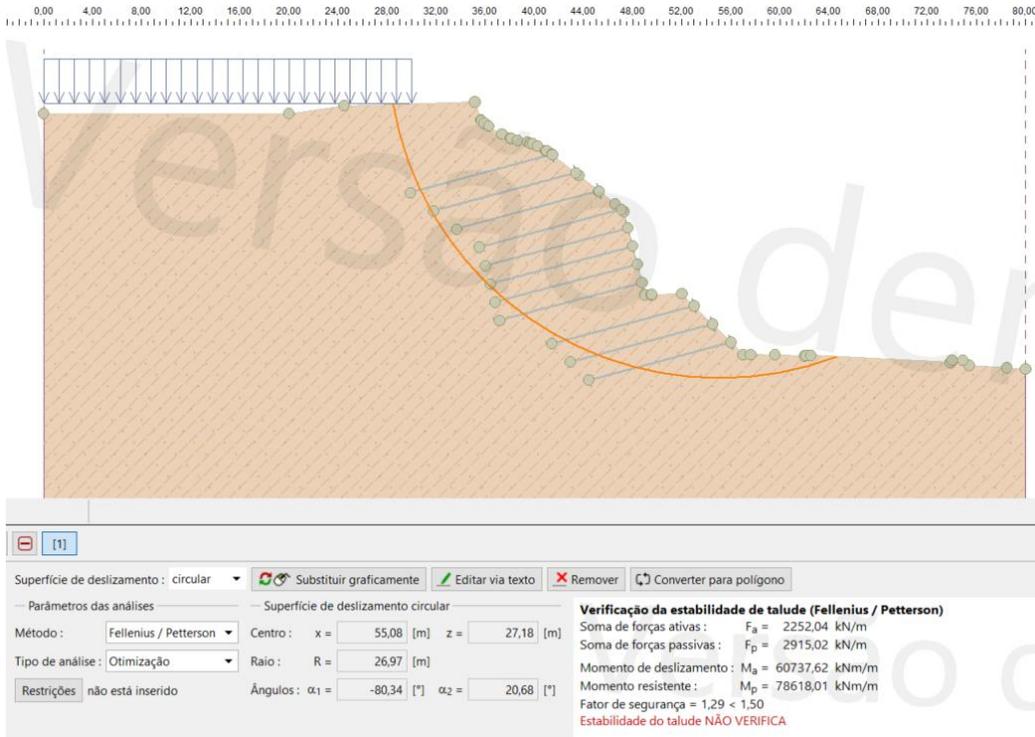
APÊNDICE J - Estabilidade global da seção transversal 11 do corte 7, referente a Tabela 4, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Em seguida, Spencer e Morgenstern-Price com mesma superfície crítica do Bishop simplificado.

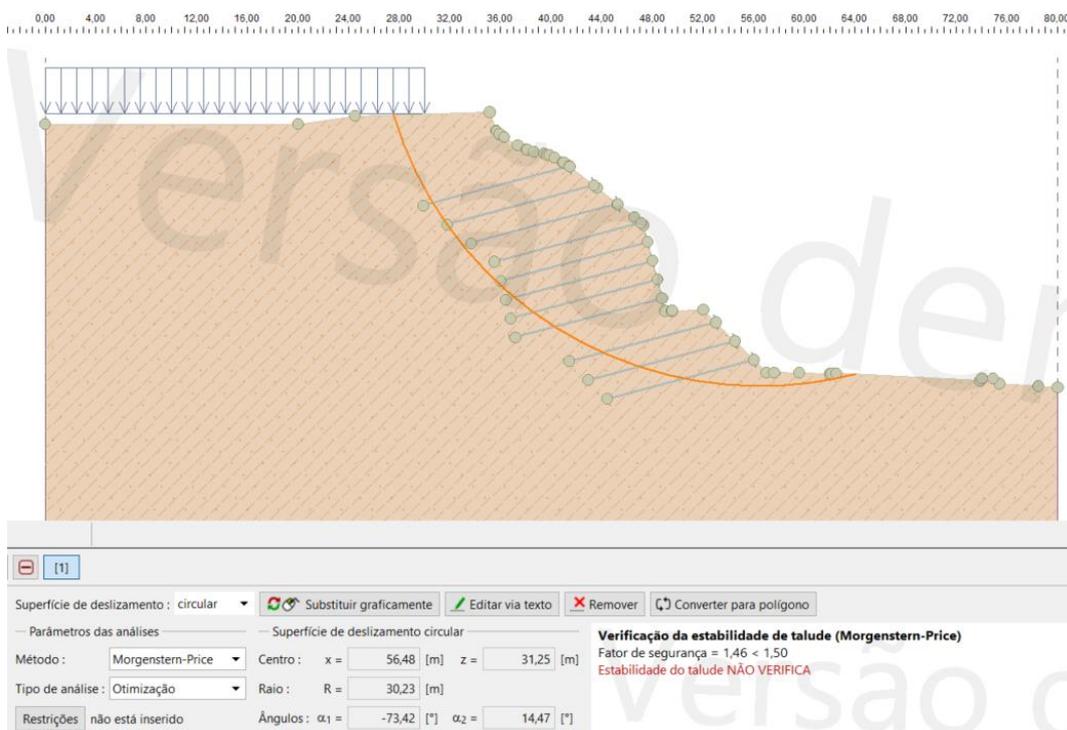
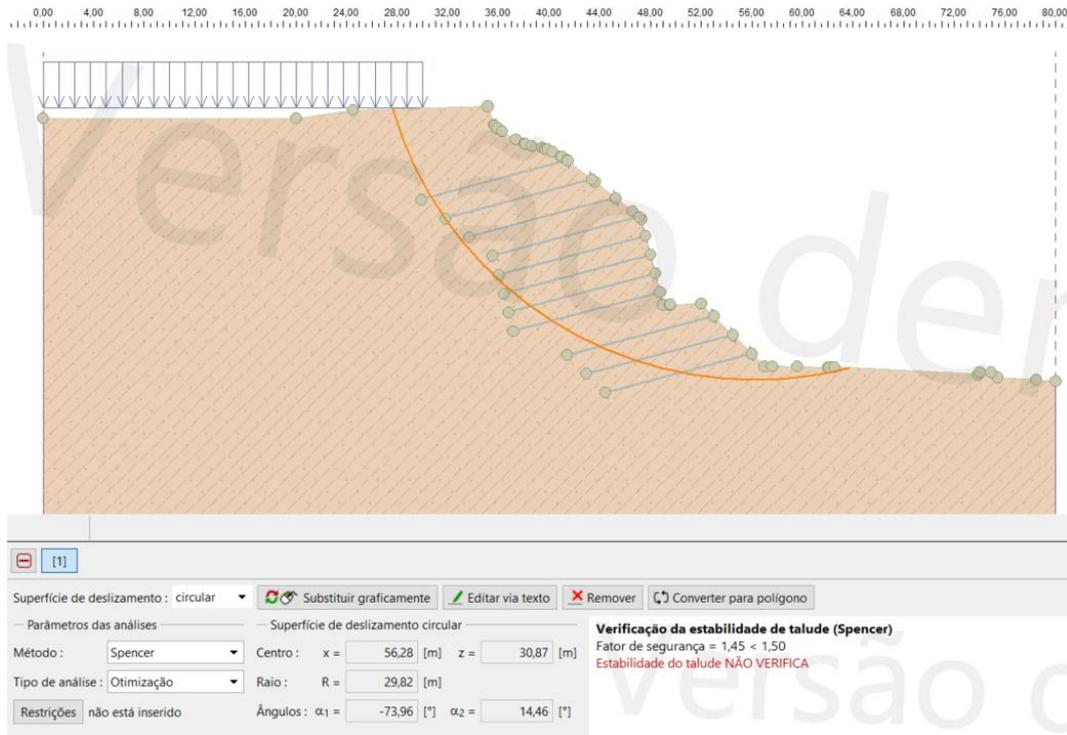




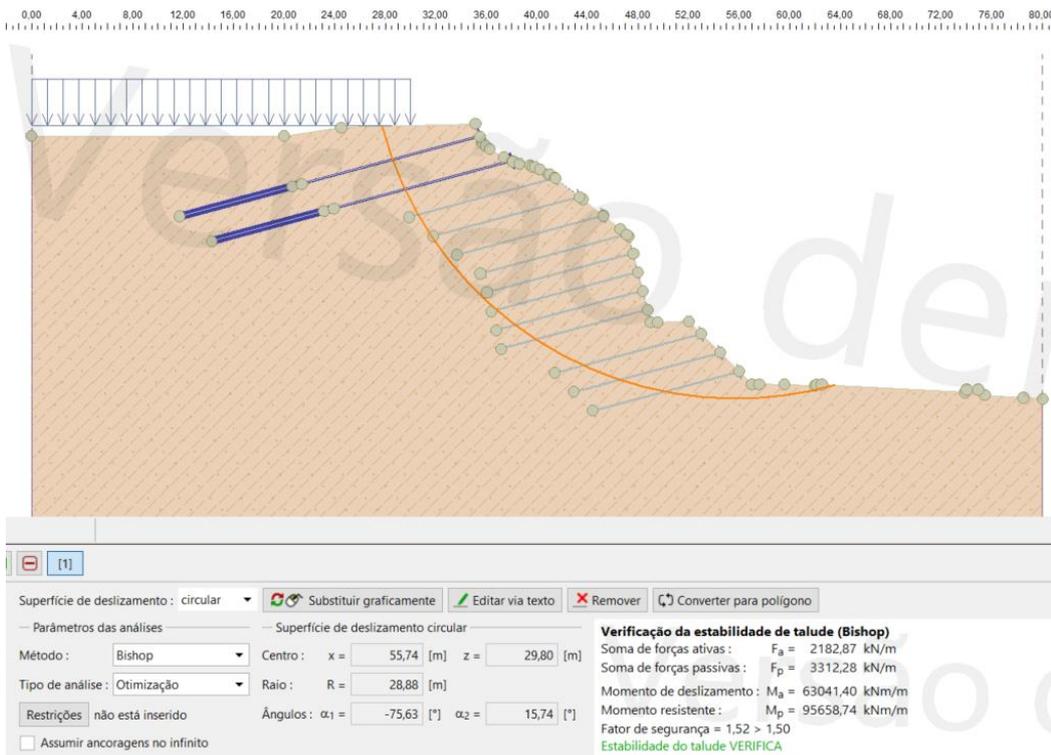
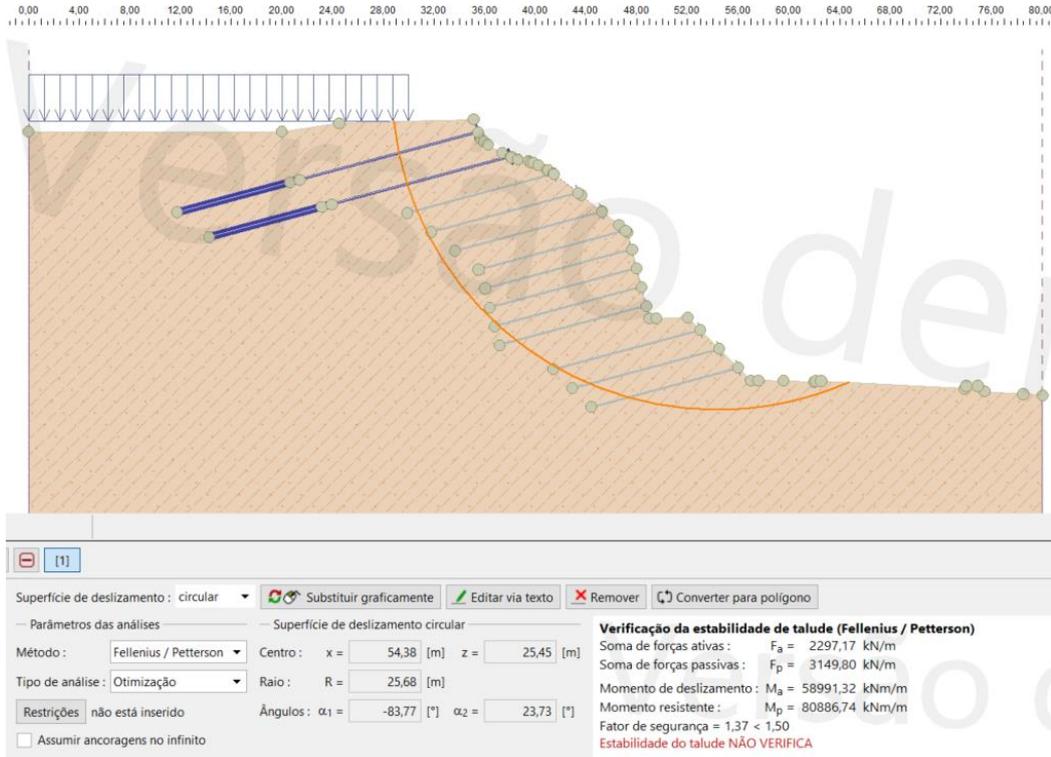


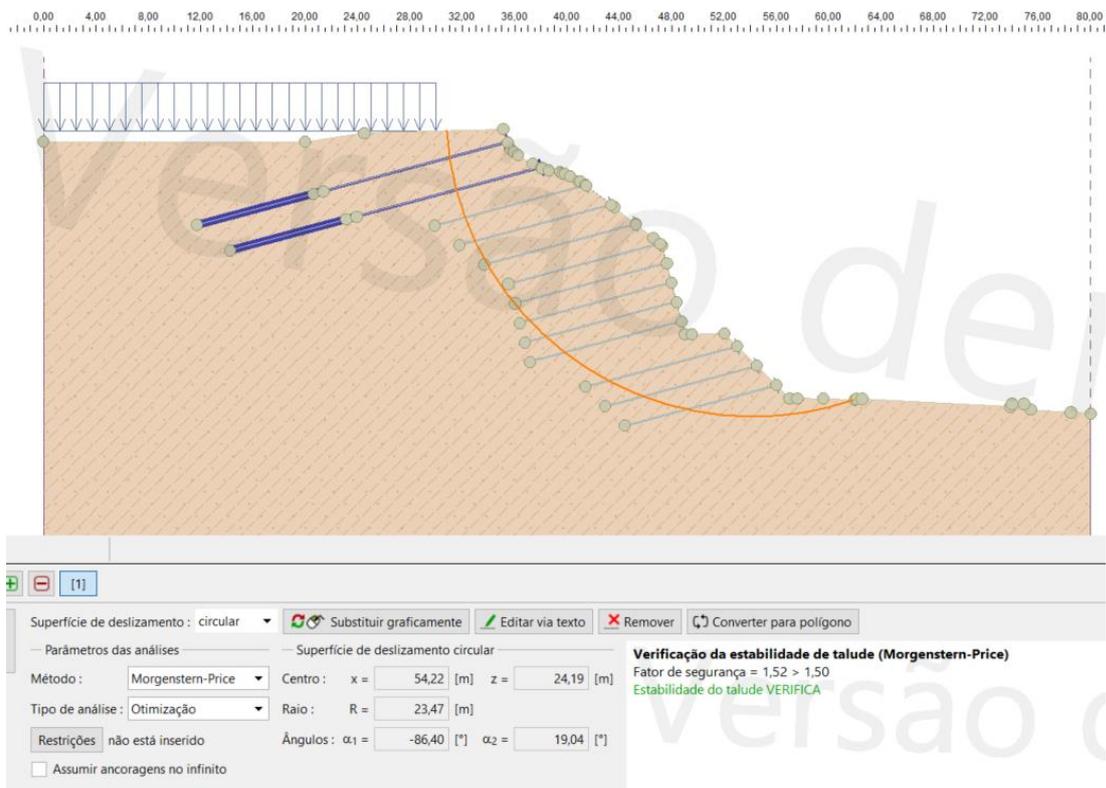
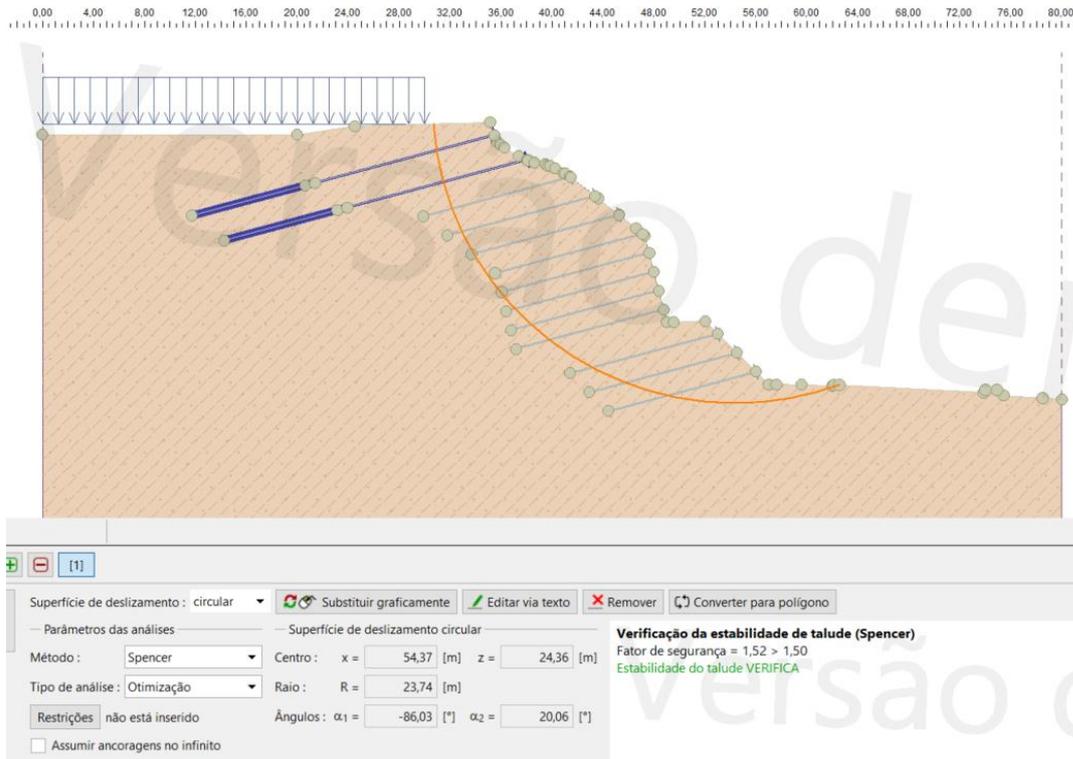
APÊNDICE K – Estabilidade global da seção transversal 5 do corte 8 sem considerar tirantes, referente a Tabela 5, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.



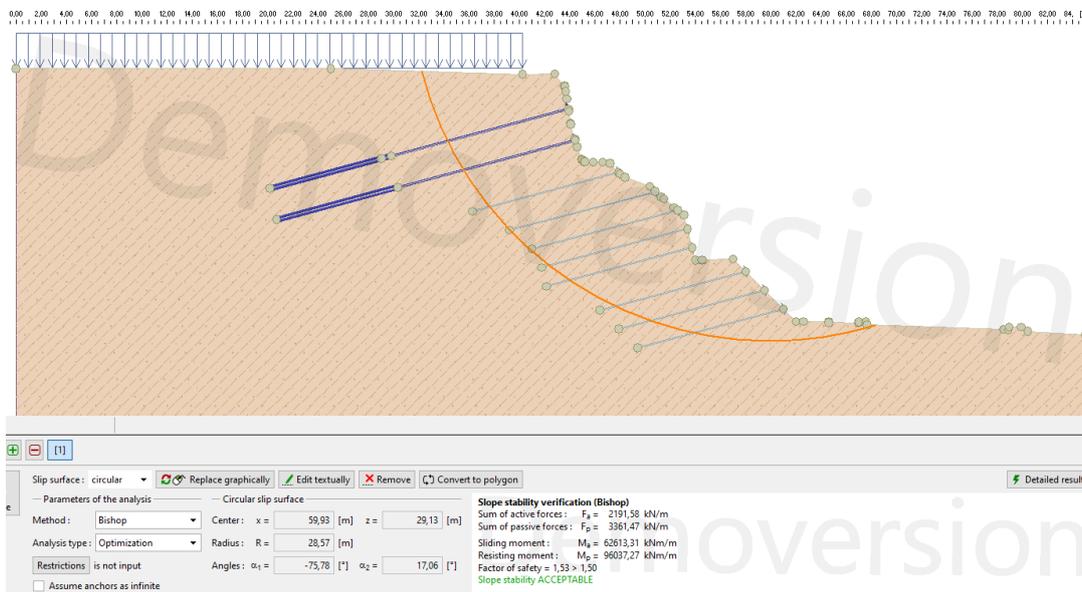
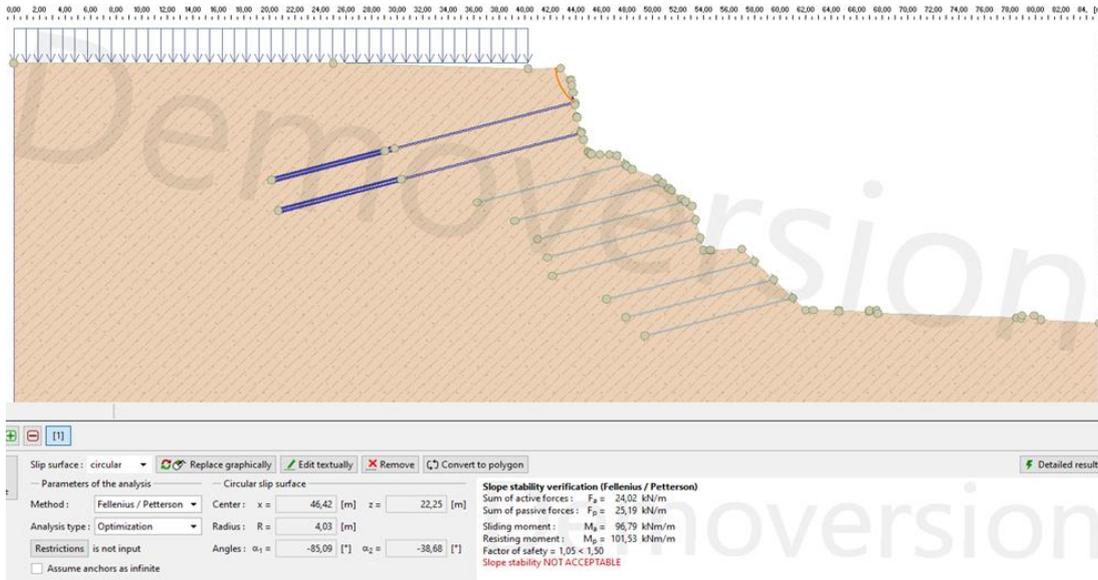


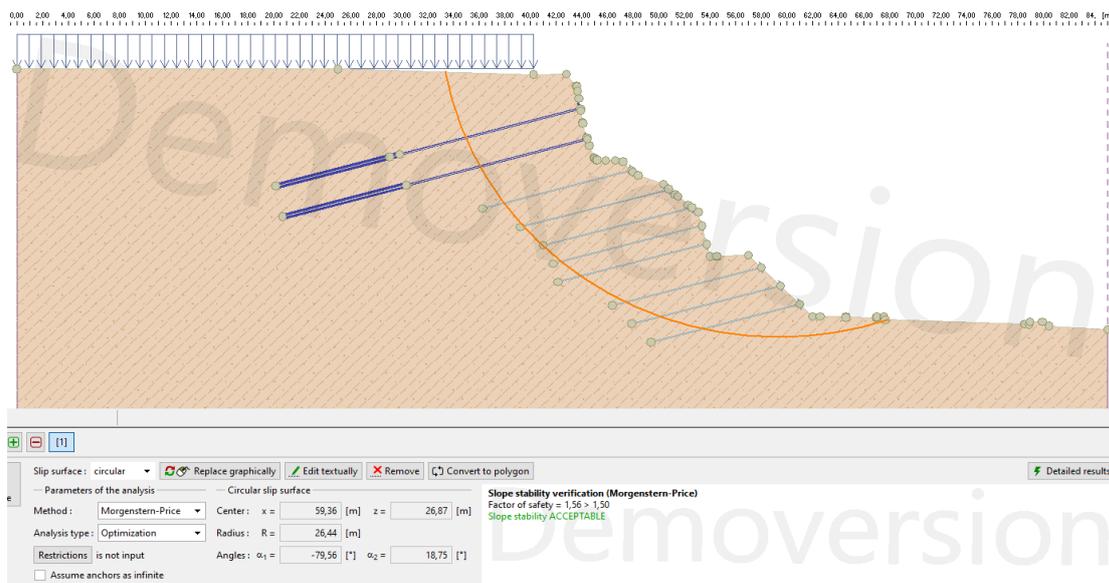
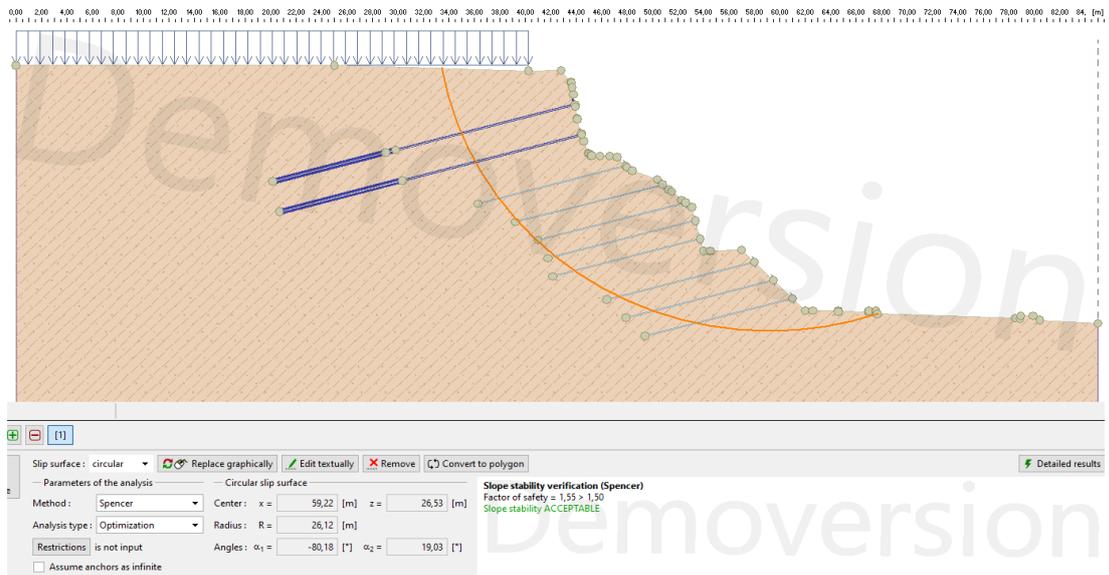
APÊNDICE L – Estabilidade global da seção transversal 5 do corte 8 considerando reforço com tirantes, referente a Tabela 6, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.

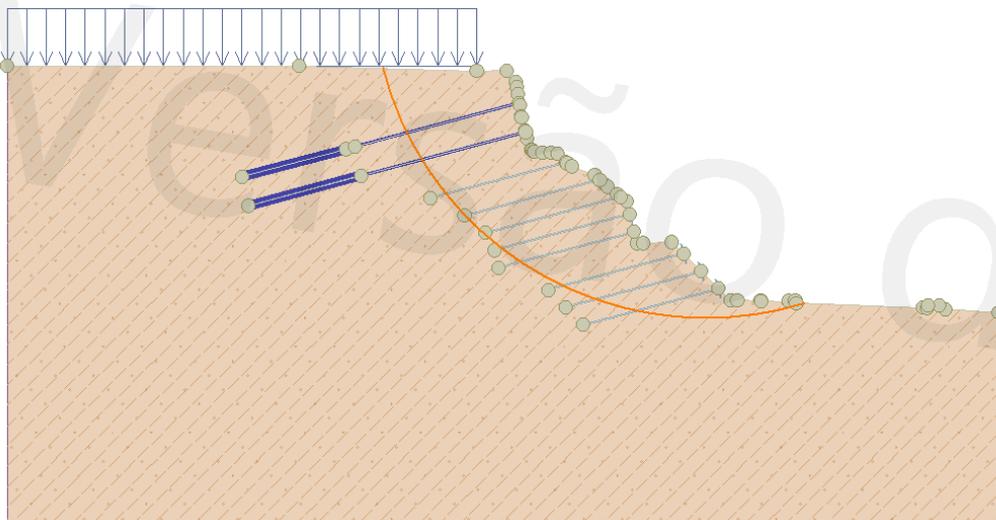




APÊNDICE M – Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 8 considerando reforço com tirantes, referente a Tabela 7, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Em seguida, Fellenius com mesma superfície crítica do Bishop simplificado.







[1]

Superfície de deslizamento : circular Substituir graficamente Editar via texto Remover Converter para polígono

— Parâmetros das análises — Superfície de deslizamento circular

Método : Fellenius / Petterson Centro : x = 59,93 [m] z = 29,13 [m]

Tipo de análise : Padrão Raio : R = 28,57 [m]

Assumir ancoragens no infinito Ângulos :  $\alpha_1 = -75,78$  [°]  $\alpha_2 = 17,06$  [°]

**Verificação da estabilidade de talude (Fellenius / Petterson)**  
 Soma de forças ativas :  $F_a = 2191,14$  kN/m  
 Soma de forças passivas :  $F_p = 3050,64$  kN/m  
 Momento de deslizamento :  $M_a = 62600,79$  kNm/m  
 Momento resistente :  $M_p = 87156,75$  kNm/m  
 Fator de segurança =  $1,39 < 1,50$   
 Estabilidade do talude **NÃO VERIFICA**

APÊNDICE N – Estabilidade global da seção transversal 7 do corte 8 considerando a região dos tirantes como sobrecarga, referente a Tabela 8, segundo os métodos de Fellenius, Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.

