



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



MÁRIO-VAM GONÇALVES PEREIRA

**EMPREGO DE TIRANTES PARA DIMINUIÇÃO DOS  
DESLOCAMENTOS EM CONTENÇÃO EXECUTADA  
EM SOLO GRAMPEADO.**

Uberlândia

2018

MÁRIO-VAM GONÇALVES PEREIRA

**EMPREGO DE TIRANTES PARA DIMINUIÇÃO DOS  
DESLOCAMENTOS EM CONTENÇÃO EXECUTADA  
EM SOLO GRAMPEADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jean Garcia

UBERLÂNDIA

2018

MÁRIO-VAM GONÇALVES PEREIRA

**EMPREGO DE TIRANTES PARA DIMINUIÇÃO DOS  
DESLOCAMENTOS EM CONTENÇÃO EXECUTADA  
EM SOLO GRAMPEADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em sessão pública e aprovado em \_\_\_\_\_, pela banca examinadora composta pelos membros:

---

Prof. Dr. Jean Garcia (Orientador)

---

Prof. Dr. Arquimedes Ciloni (Examinador)

---

Prof. Dr. Joaquim Acerbi (Examinador)

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, por toda a força e iluminação concedida nas horas de dificuldade e por me guiar por caminhos seguros.

Ao meu orientador, Prof. Jean Rodrigo Garcia, que me despertou o interesse pelo tema sugerido. Por sua contribuição, incentivo e tolerância no decorrer desta caminhada. Seu zelo e dignidade com a Engenharia, assim como a responsabilidade para com a docência.

Aos meus familiares, por todo o apoio que me deram ao longo destes últimos 7 anos e por fazerem de tudo para que eu conseguisse concluir meu curso superior.

A todos os docentes por ensinamentos concedidos que me preparam para vida e me tornaram o que sou hoje. Em especial ao professor Arquimedes Diogenes Ciloni por toda dedicação, disponibilidade, por estar sempre nos incentivando e acreditando em nós.

A Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de obter um ensino gratuito e de qualidade. Por proporcionar experiências que contribuíram muito para a minha formação.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram durante a faculdade, em especial ao Marcell Godoy Sivelli, Ruan Sousa Dotta e Rodrigo Rossi por toda ajuda e parceria ao longo do curso.

## RESUMO

O presente trabalho tem como intuito analisar a diminuição de deslocamentos nas estruturas de contenção em solo grampeado, a partir da introdução de tirantes. Sabe-se que este tipo de contenção é largamente utilizado pelo fato de ser economicamente viável e de fácil execução. Porém, embora possua várias vantagens, a contenção em solo grampeado apresenta deslocamentos que nem sempre são aceitáveis devido ao local onde será executada. Outro tipo muito comum de estrutura de contenção é a cortina atirantada. Porém, este tipo de contenção é mais difícil de ser executada e também mais onerosa, mas apresenta deslocamentos menores. Portanto, a ideia deste trabalho é adicionar tirantes (elementos ativos, principais elementos da técnica de cortina atirantada) a contenção em solo grampeado (feita com elementos passivos) para analisar o impacto na redução e/ou controle dos deslocamentos. Foram analisados quatro casos. Um deles foram introduzidos tirantes após a execução da estrutura. Os outros três casos os tirantes foram executados em conjunto com a técnica de solo grampeado, variando a altura de instalação, no intuito de obter a posição mais eficiente para introdução da ancoragem ativa. Verificou-se também, mediante análise numérica, a estabilidade desta estrutura mista, atendendo as especificações da ABNT NBR 11682:2009. Concluiu-se que a adição de tirantes é uma solução eficaz para a redução dos deslocamentos, aumentando a segurança com relação a estruturas vizinhas. Além disso, aumenta também o fator de segurança com relação a estabilidade local e global da estrutura, diminuindo ainda mais a chance de ruína.

Palavras chave: solo grampeado, tirantes, estruturas de contenção, estrutura mista, deslocamentos.

## **ABSTRACT**

This undergraduate thesis has the purpose of analyzing the displacement reduction of soil nailing retaining structures, by adding ground anchors. It is known that this type of retaining structure is largely used due to the fact of being economically viable and being easy to do. Another common type of retaining structure is anchored walls. Despite the fact that this kind of structure is harder to execute and more expensive as well, it shows smaller displacements. Therefore, this thesis' idea is to add ground anchors (main elements of the anchored walls structures) to the soil nailing structure in order to reduce the displacements. Four cases were evaluated. The first one, ground anchors were introduced after finishing the soil nailing structure. The other three, ground anchors were introduced together with the nails while building the structure, varying the height of installation. The slope stability was also verified by numerical analyzes, according to the active Brazilian standard ABNT NBR 11682:2009. Thus, the conclusion was that adding ground anchors is a great way to reduce displacements and increase the security of the surrounding structures. In addition to that, it also increases the security factor related to global and local stability, decreasing even more the chances of failure.

Key words: Soil nailing, ground anchors, retaining structures, displacements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fases construtivas do chumbador.....	14
Figura 2- Ilustração da sequência típica de construção da técnica de solo grampeado. ....	16
Figura 3- Método do NATM para galerias: princípio e comportamento. ....	18
Figura 4 - Partes constituintes dos grampos.....	20
Figura 5- Detalhe da aplicação do concreto projetado com fibras.....	21
Figura 6- Ilustração de todos os componentes que fazem parte do sistema de drenagem. ....	23
Figura 7- Resultado dos testes de arrancamento realizados.....	26
Figura 8- Etapas construtivas do sistema de cortina atirantada. ....	29
Figura 9- Elementos característicos dos tirantes que compõe a cortina atirantada.....	35
Figura 10- Aspectos do dimensionamento das cortinas atirantadas.....	37
Figura 11- Modos de falha que podem ocorrer.....	41
Figura 12- Demonstração dos deslocamentos que ocorrem na estrutura.....	43
Figura 13- Distorção angular. ....	44
Figura 14- Relação entre distorção angular e danos causados as estruturas.....	45
Figura 15- Contenção em solo grampeado com introdução de tirante.....	46
Figura 16- Perfil de escavação e camadas que compõe o talude. ....	48
Figura 17- Resultados da verificação da estabilidade para $L/H=0,8$ e $L$ constante. ....	49
Figura 18- Deslocamentos horizontais de acordo com cada etapa de execução.....	49
Figura 19- Deslocamentos horizontais após finalizar a estrutura. ....	50
Figura 20- Deslocamentos horizontais antes da execução dos tirantes.....	53
Figura 21- Deslocamentos horizontais caso 1 (após execução dos tirantes). ....	53
Figura 22- Gráfico dos deslocamentos horizontais das situações acima. ....	54
Figura 23- Deslocamentos horizontais do caso 2.....	55
Figura 24- Deslocamentos horizontais no caso 3.....	56
Figura 25- Deslocamentos horizontais no caso 4.....	56
Figura 26- Deslocamentos horizontais apresentados nos casos 2, 3 e 4. ....	57
Figura 27- Caso 3 simulado com diferentes espaçamentos horizontais entre os tirantes. ....	58
Figura 28- Fatores de segurança para o caso 3. ....	60
Figura 29- Deslocamentos verticais totais. ....	60
Figura 30- Tensões na estrutura de paramento. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Profundidade limite das faixas de escavação na técnica de solo grampeado. (Gassler, 1990) .....	13
Tabela 2- Número mínimo de ensaios que devem ser executados de acordo com a área da contenção a ser feita. ....	25
Tabela 3- Coeficiente de ancoragem $K_f$ .....	39
Tabela 4- Valor do coeficiente utilizado na equação do cálculo da distância de influência.....	43
Tabela 5- Parâmetros definidos para cada tipo de tirantes.....	50
Tabela 6- Parâmetros do solo.....	51
Tabela 7- Valores de resistência da interface solo-bulbo.....	52

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 SOLO GRAMPEADO .....	12
2.1.1 Definição .....	12
2.1.2 Etapas de execução .....	12
2.1.2.1 Escavação .....	12
2.1.2.2 Perfuração e instalação dos chumbadores .....	13
2.1.2.3 Execução do sistema de drenagem.....	15
2.1.2.4 Proteção de face .....	15
2.1.2.5 Construção dos níveis subsequentes .....	16
2.1.3 Origem .....	17
2.1.4 Componentes.....	19
2.1.4.1 Elementos de reforço .....	19
2.1.4.2 Proteção de face .....	20
2.1.4.3 Elementos de drenagem .....	21
2.1.5 Dimensionamento dos grampos .....	23
2.1.5.1 Ensaio de arrancamento.....	24
2.1.6 Modos de falha.....	27
2.1.7 Vantagens e desvantagens.....	27
2.2 CORTINA ATIRANTADA .....	28
2.2.1 Definição .....	28
2.2.2 Método executivo.....	29
2.2.2.1 Execução dos tirantes .....	30
2.2.2.1.1 Preparação dos tirantes.....	30
2.2.2.1.2 Perfuração .....	30
2.2.2.1.3 Instalação.....	31
2.2.2.1.4 Injeção .....	31
2.2.2.1.5 Protensão e ensaios .....	32
2.2.3 Elementos constituintes.....	32

2.2.3.1 Cortina de contenção .....	32
2.2.3.2 Tirantes.....	33
2.2.4 Dimensionamento .....	36
2.2.4.1 Dimensionamento da cortina de concreto armado .....	36
2.2.4.2 Dimensionamento dos tirantes .....	36
2.2.4.3 Dimensionamento do bulbo .....	38
2.2.5 Modos de ruptura .....	39
<b>3 ESTRUTURA MISTA .....</b>	<b>41</b>
3.1 DESLOCAMENTOS .....	41
3.2 SOLUÇÃO EM ESTRUTURA MISTA .....	43
<b>4 CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>46</b>
4.1 PARÂMETROS DE PROJETO .....	47
4.1 DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE .....	48
4.3 DESLOCAMENTOS .....	49
<b>5 DIMENSIONAMENTO .....</b>	<b>50</b>
5.1 TIRANTES .....	50
5.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS .....	51
5.4 DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS.....	52
5.4.1 Caso1 1 .....	52
5.4.2 Caso 2.....	55
5.4.3 Caso 3.....	55
5.4.3 Caso 4.....	56
5.4.4 Análise dos deslocamentos .....	57
5.4.4 Otimização do caso escolhido.....	58
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A execução de contenções em escavações ou em taludes naturais é um serviço muito comum nas obras civis. Destaca-se por exemplo a ocupação de morros e lugares de topografia acidentada, onde são locais que podem vir a ocorrer acidentes devido a sua instabilidade. Verifica-se sua ocorrência também em áreas limitadas, como nas obras urbanas de modo geral, rodovias, ferrovias, loteamentos, etc. As estruturas de reforço do solo têm como propósito garantir a segurança de todos que passam próximo ao local e também de restringir as deformações nos maciços.

Dentre várias técnicas de contenção existentes, o uso do solo grampeado destaca-se, principalmente por sua agilidade e pelo baixo custo se comparado com métodos similares. Mais comumente utilizado em solos escavados, a execução do solo grampeado atua reforçando o talude à medida que o solo é escavado. A escavação do solo normalmente é feita em camadas de 1 a 2 metros de profundidade, variando de acordo com o material (CLOUTERRE, 1991). Após cada camada o solo é “grampeado” com a introdução de elementos passivos que atuam principalmente a tração, porém também podem ser submetidos a flexão composta. Sua função é minorar os deslocamentos do maciço terroso pelo acréscimo de forças internas contrárias ao sistema natural de acomodação de massa (Silva et al., 2001).

Outra técnica de contenção de taludes bastante utilizada é a cortina atirantada. A cortina atirantada possui aplicação semelhante à do solo grampeado, porém as duas técnicas são bem diferentes no que diz respeito ao funcionamento. A cortina atirantada consiste em uma “cortina” de contenção pressionada por tirantes contra as encostas. As cortinas podem ser confeccionadas com painéis de diversos tipos de materiais. Principais componentes da cortina atirantada, os tirantes têm como função básica transmitir os esforços externos de tração para o terreno através do bulbo (YASSUDA & DIAS, 1998). Ou seja, eles são responsáveis por fazer a ligação entre o bulbo ancorado no interior do solo e o painel de contenção na parte externa da encosta.

Sabe-se que apesar de uma ótima solução, barata e fácil de executar, o método de solo grampeado apresenta deslocamentos que nem sempre são aceitáveis devido as construções ao redor. Logo, o presente trabalho tem como objetivo a análise da redução de deslocamentos da contenção em solo grampeado. Esta análise será feita a partir da introdução de uma linha de tirantes intermediária ou da substituição de uma linha de grampos por uma linha de tirantes, na região de maiores

deslocamentos. Será feito também um estudo econômico, estimando os custos da operação e verificando a viabilidade econômica da operação.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Solo Grampeado**

#### 2.1.1 Definição

Define-se solo grampeado como uma técnica de reforço e de contenção de taludes, sejam eles naturais ou artificiais. Este reforço ou contenção acontece através do “grampeamento” do solo, ou seja, da introdução de grampos que restringem os deslocamentos do maciço de solo e transferem os esforços de uma zona potencialmente instável para uma zona segura, resistente. Estes elementos de reforço são posicionados horizontalmente ou inclinados no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (ORTIGÃO et al., 1993). O procedimento de introdução de grampos, comumente é associado a um revestimento de face (parede de concreto projetado com fibras de aço ou armado com tela de aço eletrosoldada) e a um sistema de drenagem adequado.

#### 2.1.2 Etapas de execução

Em caso de taludes naturais ou previamente cortados, o grampeamento do solo pode acontecer de forma descendente ou ascendente. Logo, a construção de todo o sistema consistirá basicamente na introdução dos grampos e a execução da proteção de face. Para a execução da técnica em taludes resultantes de corte, como é o caso deste trabalho, o processo deve acontecer obrigatoriamente de forma descendente e as etapas construtivas iniciam com a escavação de uma faixa de solo, estabilização desta faixa se necessário, e posteriormente a instalação dos grampos.

##### *2.1.2.1 Escavação*

A primeira etapa a se realizar na técnica de solo grampeado são as escavações. Elas devem respeitar a geometria de projeto e são feitas em camadas e repetidas sucessivamente até atingir a altura necessária. As camadas normalmente variam de 1 a 2m de profundidade, variando de acordo com o tipo de solo. O material escavado deve permanecer instável por algumas horas, envolvendo uma fase crítica que diz respeito a instabilidade local, portanto é necessária uma coesão mínima

para que o solo não venha a sofrer colapso (CLOUTERRE, 1991). Caso o solo recém escavado não consiga sustentar pelo tempo necessário, medidas para estabilização devem ser tomadas. Uma alternativa para a execução é a instalação de grampos verticais como uma medida de melhoria de solo, ou então a aplicação de uma camada fina de concreto projetado para evitar o desmoronamento do solo até a instalação dos grampos. Outra alternativa possível seria aplicar uma inclinação na face do talude.

Para cortes verticais, Gässler (1990), indicou profundidades de cada estágio de escavação em função do tipo de solo (Tabela 1).

Tabela 1- Profundidade limite das faixas de escavação na técnica de solo grampeado. (Gassler, 1990)

<b>TIPO DE SOLO</b>	<b>PROFUNDIDADE DE ESCAVAÇÃO</b>		
<b>Pedregulho</b>	0,5m (com coesão aparente)		1,5m (com cimentação)
<b>Areia</b>	1,2m (medianamente compacta com coesão aparente)	1,5m (compacta com coesão aparente)	2,0m (com cimentação)
<b>Silte</b>	1,2m		2,0m (função do teor de umidade)
<b>Argila</b>	1,5m (normalmente consolidada)		2,5m (sobreadensada)

Fonte: Gassler (1990)

### 2.1.2.2 Perfuração e instalação dos chumbadores

Após a escavação, começa o processo de execução dos grampos que se inicia pela abertura dos furos. Este procedimento é realizado por equipamentos leves (pesando entre 50 e 1000kg), que podem ser perfuratrizes manuais elétricas ou mecânicas hidráulicas. Os grampos possuem usualmente inclinação horizontal entre 5° e 30° e diâmetro de perfuração de 75mm. O sistema de perfuração deve ser escolhido tal qual o furo se mantenha estável até a instalação dos chumbadores e preenchimento com graute. Caso isso não seja possível, deve-se prever uma estabilização com lama estabilizante. Porém, deve-se atentar para que este material não interfira no atrito lateral entre o solo e o grampo (Solotrat, 2001).

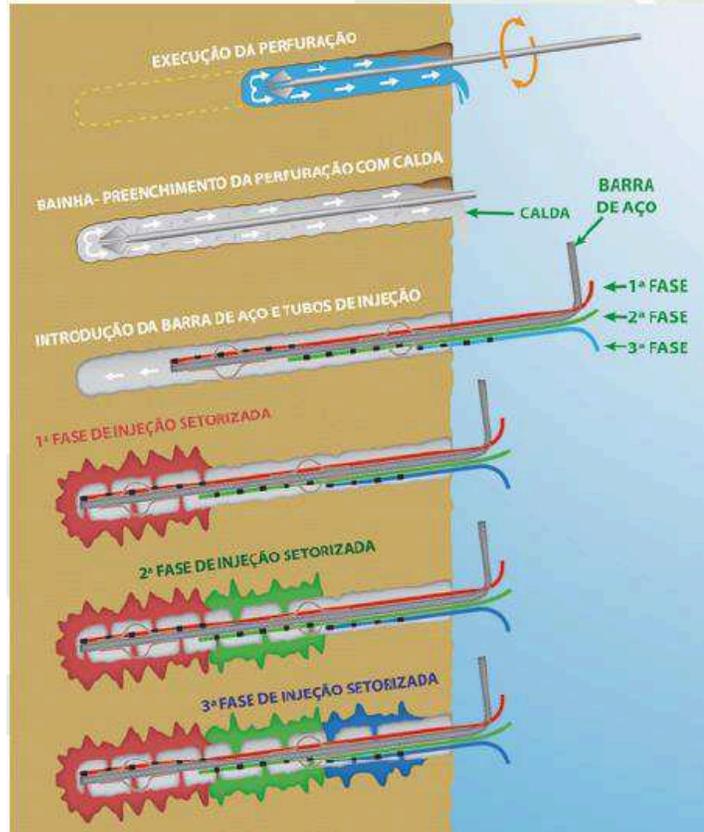
Concluída a perfuração, deve-se realizar a limpeza do furo para a retirada do material solto. Esta operação pode ser feita com ar, água, lama ou nenhuma das opções caso a escolha for realizar com trado helicoidal contínuo.

A instalação das barras é feita logo após a finalização da limpeza. As barras podem ser metálicas, de fibras de vidro resinada ou similares (no caso de barras metálicas, deve ser feito tratamentos anticorrosivo adequado). Ao longo da barra são instalados dispositivos chamados centralizadores, que tem como objetivo centraliza-las e garantir o cobrimento mínimo especificado conforme projeto. Ao longo da barra também são instaladas mangueiras de injeção perdidas, que servirão para a injeção setorizada do fluido cimentante. Em caso de não especificação do projeto, devem ser divididas em pelo menos 3 setores de injeção. Estas mangueiras são feitas normalmente de polietileno e possuem diâmetro entre 8 e 10mm (Zirlis e Pitta, 1992).

A última etapa da execução dos grampos é a injeção da calda de cimento ou da resina, dependendo do tipo de solo (resina para materiais rochosos e calda de cimento para solos). Essa injeção é dividida em duas partes. A primeira parte consiste no preenchimento do furo com calda de cimento através de uma bainha. O chumbador pode ser instalado antes do preenchimento com a calda ou até mesmo posterior a esta etapa

A segunda parte compreende o preenchimento do furo por pressão setorizada. Conforme já mencionado anteriormente, a injeção da calda por setores ocorre por meio de mangueiras perdidas que são instaladas junto a barra. Para cada trecho, deve-se medir o volume e a pressão da calda injetada. Um resumo de todo o processo de execução dos grampos pode ser visto na figura 1 abaixo.

Figura 1- Fases construtivas do chumbador.



Fonte: SOLOTRAT (2001)

### 2.1.2.3 Execução do sistema de drenagem

Depois de prontos os chumbadores e antes de se realizar o revestimento de face, deve-se dar início ao sistema de drenagem. Deve-se realizar todo o sistema de drenagem de face. A drenagem de face consiste na instalação dos drenos lineares contínuos (podem ser canaletas, fitas drenantes) ou com drenos tipo barbacã.

### 2.1.2.4 Proteção de face

Antes de prosseguir com mais um nível de escavação, deve-se realizar a proteção de face. Para o presente estudo, a proteção de face será simulada utilizando concreto projetado com tela eletrosoldada. Uma alternativa adversa a esta é a utilização de blocos pré-moldados de cimento. Os blocos permitem a execução de faces mais elaboradas arquitetonicamente. Portanto, incorporam vantagem estética a obra.

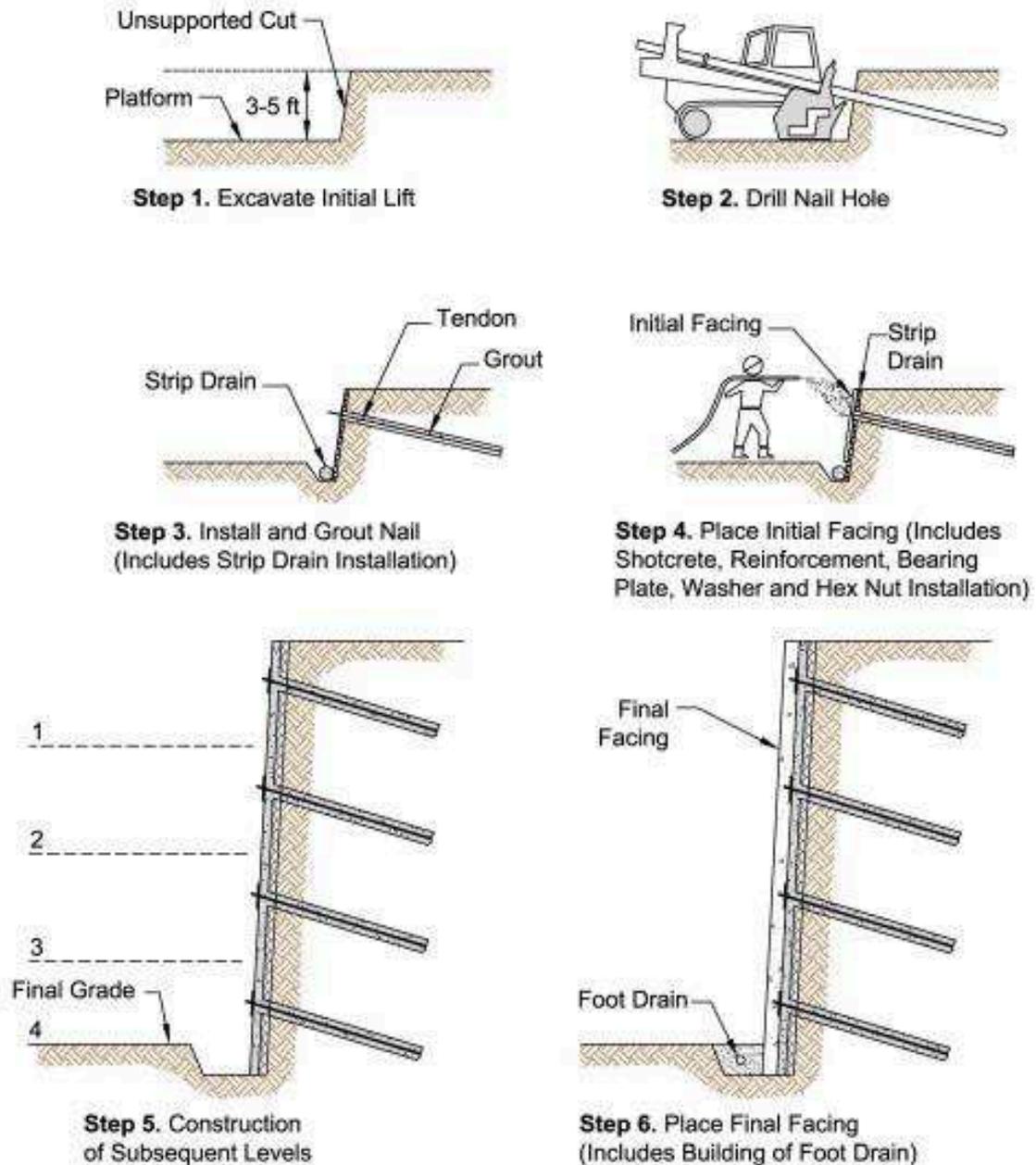
A proteção de face se inicia com a aplicação de uma fina camada de concreto projetado no talude (que já contém o sistema de drenagem). Esta pequena camada possui a função de regularização da face e também de garantir o cobrimento desejado para a malha de aço. A malha de aço pode ser feita em uma ou duas camadas, conforme especificado em projeto. Após a projeção do concreto, instala-se a malha de aço e aplica-se novamente uma nova camada de concreto intermediária. Instala-se a outra malha de aço e depois a camada final de concreto. Vale ressaltar que as malhas de aço podem ser colocadas antes de se realizar o concreto projetado, deve-se apenas tomar cuidado para que as mesmas não funcionem como um anteparo, promovendo vazios atrás de onde situam-se as malhas.

#### *2.1.2.5 Construção dos níveis subsequentes*

Finalizada a proteção de face, todos os passos acima devem executados novamente: escavação, perfuração e instalação dos chumbadores, execução sistema de drenagem e proteção de face. Estes passos devem ser repetidos quantas vezes forem necessárias até que a contenção atinja a altura desejada. A figura 2 a seguir ilustra de forma detalhada cada parte do processo cíclico de execução da técnica de solo grampeado.

Variações dos passos descritos acima podem ser necessárias para acomodar condições específicas de projeto. Um exemplo é a aplicação de concreto assim que a escavação é finalizada, para dar sustentação e evitar o desmoronamento.

Figura 2- Ilustração da sequência típica de construção da técnica de solo grampeado.



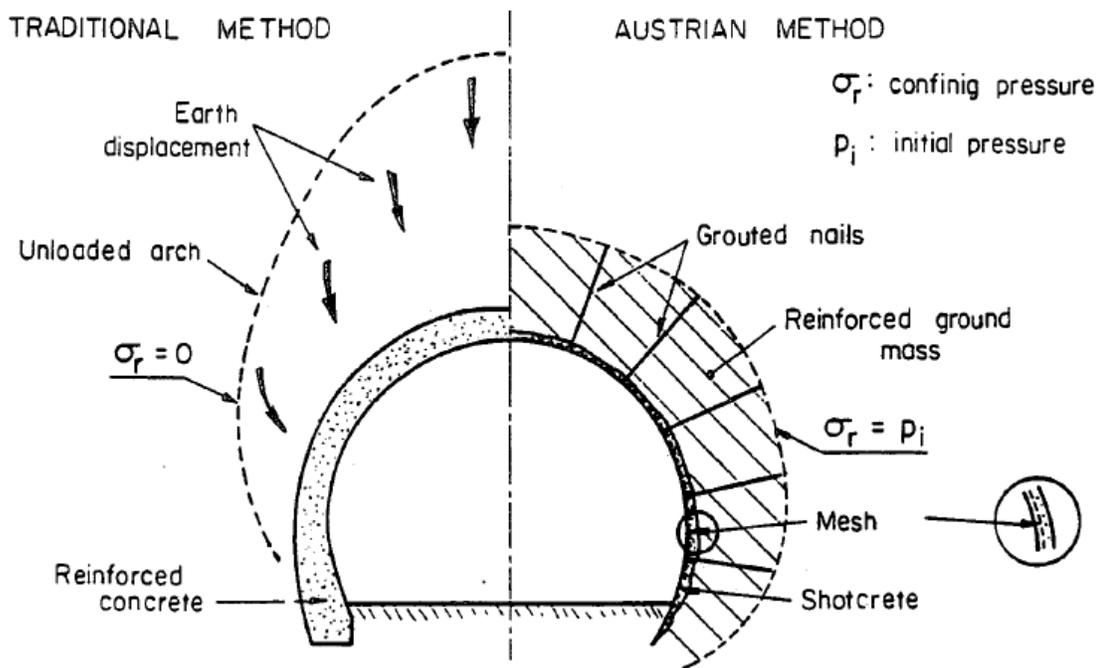
Fonte: FHWA (2001)

### 2.1.3 Origem

A técnica de solo grampeado vem sendo utilizada por mais de quatro décadas. Esta técnica foi desenvolvida pelo professor Landislau Von Rabicewicz em 1945, para prosseguir escavações em tuneis rochosos. A técnica, muito utilizada na engenharia de minas, conhecida como NATM ("New Austrian Tunnel Method") era uma proposta contrária ao até então método convencional

de execução de tuneis, executado com suporte rígido. Este revestimento rígido, impede os deslocamentos e mobiliza no maciço grandes esforços, sendo portanto uma solução mais cara (Artigo do ortigao, zirlis e palmeira). O NATM consiste na aplicação de um suporte flexível, permitindo uma deformação e gerando uma zona plastificada no entorno da escavação, que pode ser reforçada com a utilização de grampos (Figura 3). Após a escavação, a região escavada fica submetida às tensões de confinamento e ao peso de solo e rocha. Esta região instável é estabilizada com concreto projetado, tela metálica e chumbadores radiais introduzidos na zona plástica. Os chumbadores podem ser executados com perfuração e posterior injeção de calda de cimento ou inseridos no maciço por percussão. Em geral eles são instalados com 3 a 6 metros de distância ao longo da galeria (Clouterre, 1991).

Figura 3- Método do NATM para galerias: princípio e comportamento.



Fonte: Clouterre (1991)

Novas experiências foram realizadas em materiais menos resistentes, depois da técnica do NATM em rochas duras, tais como rochas mais brandas e também em solos (areia, silte e pedregulhos). Esta técnica levou o nome de solo grampeado ou pregado (“clouage do sol” em francês; “soil nailing” em inglês).

A técnica de solo grampeado desenvolveu-se então à partir da década de 1970. Uma das primeiras e mais famosa aplicação da técnica ocorreu na França, próximo da cidade de Versailles no ano de 1972. A técnica foi executada por uma empresa que já possuía experiência com o método NATM e foi aplicada em um talude ferroviário utilizando uma alta densidade de grampos, executando a posterior ancoragem com graute. Desde então, países como Alemanha, Estados Unidos, Canadá e outros, apresentaram estudos sobre o grampeamento de solos e começaram a também a utilizar a técnica. Porém, foi em 1986 que o governo francês, junto com várias empresas particulares, resolveu financiar o projeto de pesquisa CLOUTERRE. Finalizado em 1991, o projeto visava fornecer um melhor entendimento sobre a técnica, propor melhorias e sistematizar o método de construção de contenções com solo grampeado (CLOUTERRE, 1991).

No Brasil não existe ao certo um consenso de quando iniciou ao certo a utilização da técnica. Existem evidências da sua utilização desde a década de 70, porém foi na década de 80 que foram executadas obras conhecidas. Um exemplo é contenção feita para a construção de um edifício na cidade de Niterói, RJ. O talude de 35m, foi estabilizado na sua inferior (18m) com tirantes e na parte superior (17m) com a utilização da técnica de solo grampeado, foi grampeada com barras de 6 e 9m de comprimento e 25 mm de diâmetro, injetadas com calda de cimento em furos de 90 mm (GEORIO, 1999).

#### 2.1.4 Componentes

A técnica de solo grampeada consiste em três elementos fundamentais: proteção de face, elementos de reforço (grampos) e o sistema de drenagem (elementos de drenagem). Esses três elementos, se executados da maneira correta e seguindo as premissas de projetos, garantem a estabilidade e a vida útil de toda a estrutura.

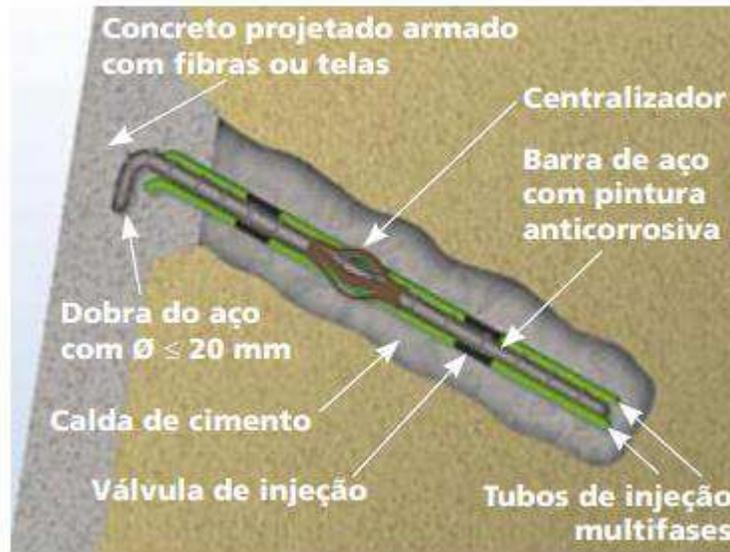
##### *2.1.4.1 Elementos de reforço*

De acordo com a NBR 11682, estes elementos de reforço são ancoragens passivas que, por definição, é qualquer tipo de ancoragem não protendida. Só entra em carga quando atuarem as cargas da estrutura, por deslocamento desta ou do terreno ao qual esteja vinculada.

Existem diversos tipos de execução de grampos, porém o método mais utilizado no Brasil são os grampos moldados in loco (figura 4). São realizadas perfurações no solo onde serão instaladas as armações metálicas. Após instaladas e centralizadas, a armação metálica é fixada com injeção de

calda de cimento sob pressão. O outro trecho da barra é fixado na estrutura de proteção de face (parede de concreto projetado). Para barras com diâmetro menor ou igual 20mm, apenas dobra-se a ponta da barra para garantir a ancoragem. Para barras de diâmetro superior a 20mm, a ancoragem é feita através de porca e placa metálica (SOLOTRAT, 2010).

Figura 4 - Partes constituintes dos grampos.



Fonte: SOLOTRAT (2001)

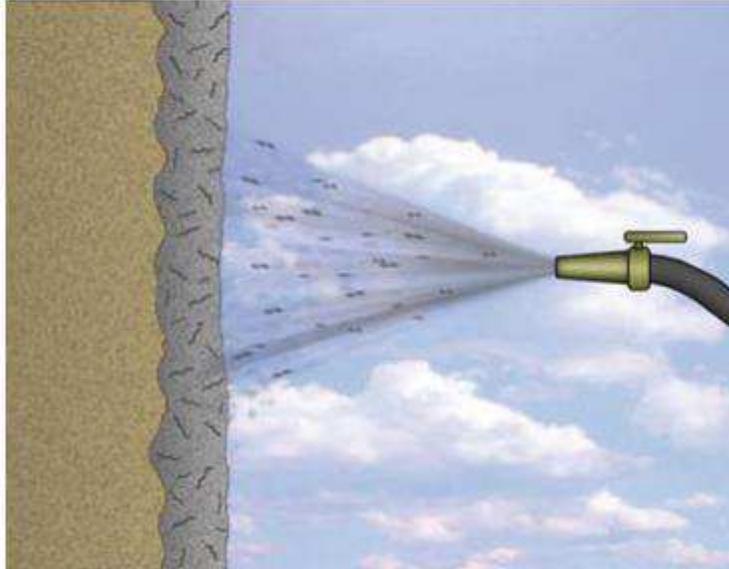
#### 2.1.4.2 Proteção de face

A proteção de face não contribui significativamente para a estabilidade global da estrutura, ela apenas desenvolve um papel importante na estabilidade local durante o processo de escavação. Ou seja, embora não possua função estrutural, a proteção de face desempenha a função de evitar rupturas localizadas e processos erosivos.

O revestimento de face, geralmente é feito com concreto projetado armado com tela de aço eletrosoldada. As telas são instaladas antes da projeção do concreto e deve-se observar se a mesma não está funcionando como um anteparo, gerando vazios na parte de trás. Uma opção alternativa é o uso de fibras de aço ou fibras sintéticas. As fibras sintéticas não exigem nenhum tipo de equipamento especial, formam uma mistura completamente homogênea com o concreto, reduzem o tempo de execução e também a quantidade de mão-de-obra necessária, uma vez que não precisa mais preparo e instalação das telas. As fibras se ajustam perfeitamente ao corte do talude,

reduzindo o uso de concreto e aceitando superfícies irregulares, como pode ser visualizado na figura 5 (SOLOTRAT, 2001).

Figura 5- Detalhe da aplicação do concreto projetado com fibras.



Fonte: SOLOTRAT (2001)

O concreto utilizado possui resistência entre 15MPa e 40MPa. É uma mistura de areia, pedrisco, cimento, água e aditivos (ainda podem ser adicionados ao traço as fibras ou outros componentes), conduzidos até o local de aplicação (o talude) por ar comprimido utilizando de equipamento adequado. A aplicação do concreto pode ser feita por via úmida (preparado e conduzido até o local da aplicação com água) ou via seca (a adição da água é feita instantes antes da aplicação do concreto, no bico de projeção).

#### *2.1.4.3 Elementos de drenagem*

Na técnica de solo grampeado e/ou outras técnicas de contenção de taludes, os elementos de drenagem (sistema de drenagem) possuem um papel muito importante. O sistema evita a infiltração da água na estrutura de proteção de face, fato que poderia causar deslizamento ou ruptura de solo, além da deterioração dos grampos devido ao carreamento de substâncias corrosivas provenientes de vazamentos em tubulações de esgoto. Logo, deve-se utilizar sistema de drenagem adequado conforme projeto, que é instalado antes de realizar a proteção de face.

O sistema de drenagem consiste basicamente em dois tipos, a drenagem profunda e a drenagem de superfície. A drenagem profunda é feita por meio dos drenos sub-horizontais profundos (DHP). Os drenos horizontais profundos, são tubos drenantes de plástico que são introduzidos no solo paralelo aos grampos. Estes tubos geralmente possuem diâmetro entre 40 e 50mm e são instalados em perfurações feitas no solo de 60 a 70mm. Os tubos possuem ranhuras e são instalados envoltos em manta geotêxtil ou tela de nylon. Pode-se usar também tubos com microrranhuras (menores que 0,4mm) que dispensam o recobrimento por material específico. Eles possuem entre 6 e 18m de comprimento e tem a função de captar a água distante do talude, antes que ela possa atingir o paramento. A água captada é conduzida para as canaletas (SOLOTRAT, 2001).

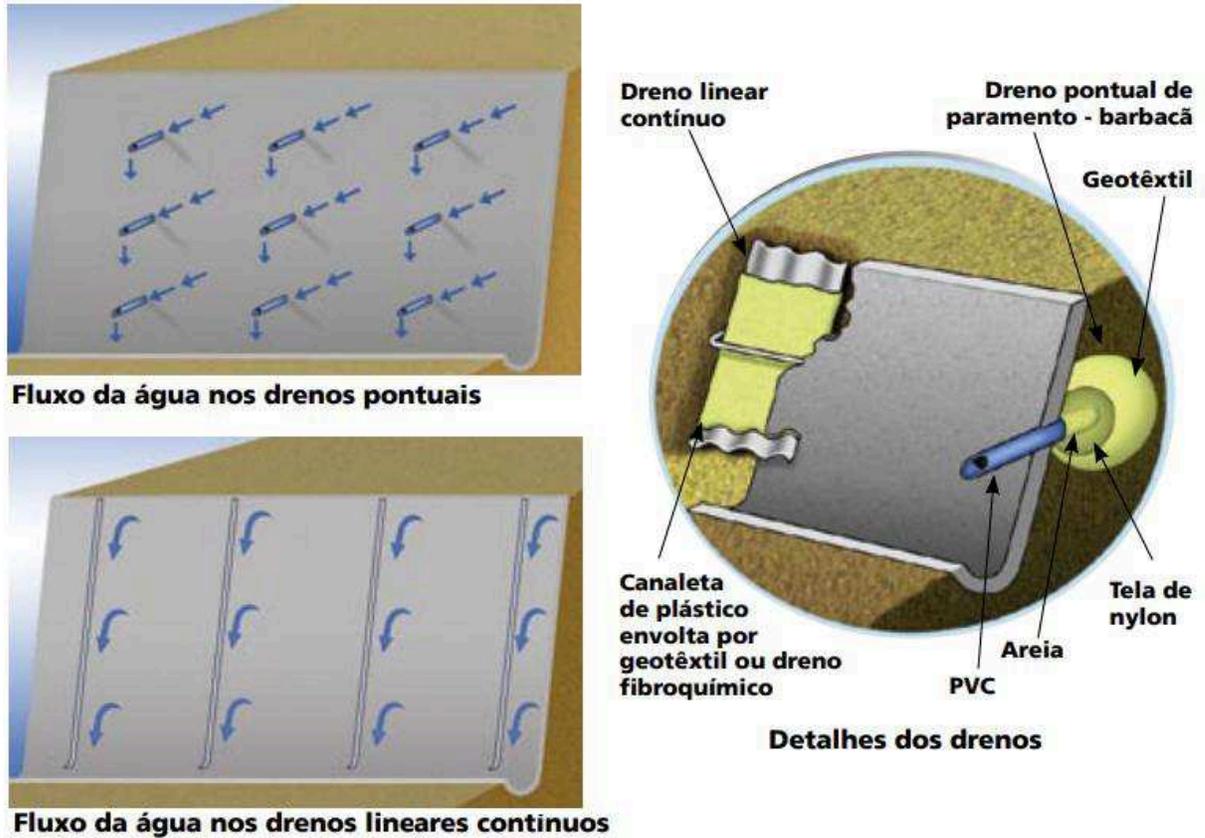
Os drenos de superfície constituem-se de drenos de paramento e canaletas. Para dreno de paramento, recomenda-se o uso de drenos verticais (também chamados de drenos lineares contínuos) e drenos barbacãs.

Os drenos verticais são executados a partir da instalação de dreno pré-fabricado ou de calhas plásticas drenante envoltas em manta geotêxtil não tecido. Este elemento se estende por todo o comprimento vertical do talude e deságua na canaleta instalada na base da escavação.

Os drenos barbacãs são executados escavando-se uma cavidade com aproximadamente 20x20x20cm que é preenchida com material arenoso e envolta também com manta geotêxtil não tecido. A conexão entre a cavidade arenosa e a atmosfera é feita através de um tubo PVC perfurado e também encoberto com material adequado. O tubo possui uma inclinação decrescente e recomenda-se o diâmetro de aproximadamente 100mm e comprimento de 0,30 a 0,50m com espaçamentos iguais (MITCHELL e VILLET, 1987).

Por fim, é necessário atentar-se as para a drenagem superficial. As calhas de crista e de pé desempenham este papel de forma satisfatória. Elas são moldadas in loco e revestidas com concreto projetado. Devem ser analisadas caso a caso. Todo este conjunto que compõe o sistema de drenagem pode ser visualizado na figura 6 a seguir.

Figura 6- Ilustração de todos os componentes que fazem parte do sistema de drenagem.



Fonte: SOLOTRAT (2001)

### 2.1.5 Dimensionamento dos grampos

Não existem no Brasil normas que regulamentem a execução, dimensionamento e o monitoramento desse tipo de estrutura, apesar de largamente utilizada e muito incentivada por profissionais da área. Porém, existem vários estudiosos do assunto, tanto nacionais como internacionais que apresentam conteúdos e recomendações sobre o assunto que podem ser utilizados para a realização de projetos.

Existem vários parâmetros que devem ser levados em conta na hora do dimensionamento de uma estrutura, como por exemplo o ângulo de instalação, comprimento e o espaçamento entre os grampos. Esses parâmetros devem assegurar as condições de estabilidade interna e externa da estrutura, evitando que a mesma venha a ruína. Esses parâmetros dependem de fatores como altura e inclinação do talude, tipos de grampos e etc. Por exemplo, foram feitos ensaios de arrancamento

em grampos variando o ângulo entre 0 e 20°. Chegou-se à conclusão de que os grampos instalados a 15° foram os que suportaram os maiores esforços (CLOUTERRE, 1991).

Para realizar o dimensionamento, o solo é dividido em duas regiões ou zonas: ativa e passiva. A zona ativa é a zona mais perto do paramento, ela é a região do solo que tende a se romper por não haver coesão suficiente para suportar sozinha o peso próprio e demais sobrecargas atuantes. Ela é separada da zona passiva por meio da superfície de ruptura, a qual pode possuir diferentes formas, dependendo do método de análise empregado, da geometria do sistema, dos carregamentos aplicados e ainda da deformabilidade dos elementos de reforço. Os métodos existentes para cálculo da estrutura, diferem-se basicamente no tipo de superfície de ruptura adotada como premissa para o projeto, para cálculo do equilíbrio das forças.

De acordo com França (2007):

Os métodos de equilíbrio limite apresentam como uma boa solução quando utilizados com ferramentas computacionais. Este método consiste no cálculo da estabilidade interna e externa da obra. Para a verificação da estabilidade externa, a obra é considerada como um bloco monolítico e se analisa a probabilidade de ocorrência de quatro fenômenos: deslizamento, tombamento, ruptura da fundação e ruptura global. Na verificação da estabilidade interna dimensionam-se os grampos para que suportem os esforços, em geral de tração, aos quais serão submetidos para que não ocorra o arrancamento do reforço dentro da zona passiva, sempre baseado numa dada distribuição de grampos.

#### *2.1.5.1 Ensaios de arrancamento*

Os ensaios de arrancamento de grampos são utilizados para obter a resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo, ou seja, do contato da calda de cimento com o solo. O resultado apresenta a tensão de cisalhamento média necessária para que um grampo seja arrancado. Este ensaio mostra também o deslocamento devido a carga aplicada. Durante todo o teste, estas duas variáveis (força e deslocamento) são monitoradas.

A resistência ao cisalhamento de interface pode ser afetada, principalmente, pelo tipo e condição do solo, diâmetro e rugosidade do furo onde os grampos serão instalados, pela técnica de escavação e preenchimento do furo utilizadas e do tempo que este permanece aberto antes de ser preenchido (FHWA, 1998).

O projeto CLOUTERRE (1991) sugere, baseado na área de construção da contenção, um número mínimo de ensaios que devem ser realizados para a obtenção dos parâmetros. Esta informação pode ser visualizada na tabela 2 abaixo:

Tabela 2- Número mínimo de ensaios que devem ser executados de acordo com a área da contenção a ser feita.

Área da face (m <sup>2</sup> )	Número de ensaios
Até 800	6
De 800 a 2000	9
De 2000 a 4000	12
De 4000 a 8000	15
De 8000 a 16000	18
De 16000 a 40000	25

Fonte: Clouterre (1991)

Para este ensaio são instalados grampos protótipos. Estes grampos não têm funcionalidade estrutural e consistem de uma única barra de aço. O grampo teste (ensaiado) se diferencia do grampo estrutural pela exigência de um trecho livre entre o trecho ancorado e o faceamento, desta forma não se carrega o faceamento, este também possui uma dimensão menor. Embora esses grampos possuam características um pouco distintas, aplica-se a mesma técnica construtiva dos grampos de função estrutural.

A aderência na interface solo-grampo ( $q_s$ ) é obtida pela equação 1 abaixo:

$$q_s = \frac{T}{\pi D L_i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

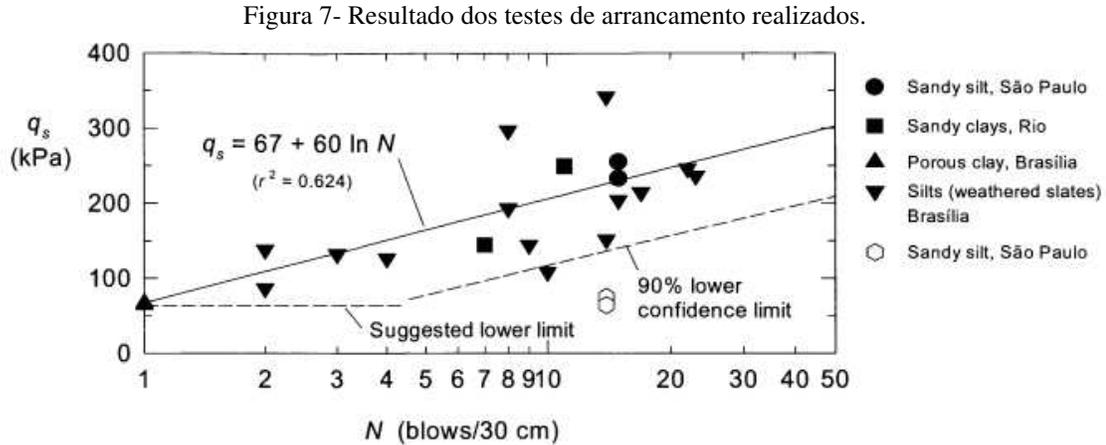
$q_s$ =aderência no contato solo grampo (KN/m<sup>2</sup>)

T= carga aplicada no grampo no momento da ruptura (KN).

D= diâmetro da perfuração em metros.

$L_i$ = comprimento injetado do grampo em metros.

Ortigão e Sayao (2004) propôs outra forma de se obter a resistência de aderência através do N<sub>spt</sub> do solo. A equação 2 proposta por eles correlaciona o N<sub>spt</sub> do solo com sua resistência de aderência. Essa correlação foi resultado de vários ensaios de arrancamento realizados. O limite mínimo sugerido para q<sub>s</sub> é de 50 kPa, mesmo para solos fracos com N<sub>SPT</sub> igual a 1. Pode-se visualizar o resultado dos ensaios na figura 7 abaixo:



$$q_s = 67 + 60 \ln N_{spt} \quad \text{Equação 2}$$

Como em todo tipo de projeto, a tensão admissível é o resultado da divisão da tensão por um fator de segurança. Logo a equação 3 a seguir mostra  $q_{adm}$ =

$$q_{adm} = \frac{q_s}{FS} \quad \text{Equação 3}$$

Através da tensão admissível obtém-se a resistência de aderência unitária (t). Este parâmetro refere-se a força de arrancamento gerada por metro de grampo. A equação 4 abaixo demonstra como pode ser calculada:

$$t = q_{adm} \times \pi \times D \quad \text{Equação 4}$$

D - Diâmetro (m)

### 2.1.6 Modos de falha

De acordo com Clouterre (1991), foram realizados vários experimentos em laboratórios em escalas reduzidas, levando-os até a falha para a observação desses fenômenos. Esses experimentos evidenciaram quatro tipos de falhas que podem ocorrer:

- ruptura dos grampos;
- falta de atrito entre o solo e o grampo;
- instabilidade durante as fases de escavações;
- escorregamento geral da zona de solo reforçada (zona ativa);

Todos os modos de falhas citados acima envolvem deslizamento de massas quando o solo deforma, exceto quando há ruptura dos grampos. Os três primeiros exemplos ocorrem devido estabilidade interna, apenas o último ocorre devido estabilidade externa.

Essas potenciais superfícies de falha são as principais causas que levam a analisar a estabilidade dos quatro modos de falha.

### 2.1.7 Vantagens e desvantagens

A técnica de solo grampeado possui é uma técnica muito utilizada devido sua gama de vantagens que ela oferece. Ela vem ganhando força com os projetistas e nas últimas três décadas vem sendo utilizada com maior frequência em território brasileiro (Saré, 2007). Segue abaixo algumas das vantagens que a técnica oferece:

- **facilidade e velocidade na execução** – os equipamentos utilizados são facilmente encontrados e são de fácil manuseio. Destaca-se também, a execução dos grampos, ela dispensa tempo de cura e a proteção de face com concreto projetado garante agilidade ao processo.
- **baixo custo** – esta técnica apresenta custo mais baixo que as similares. Ela apresenta um uso reduzido de equipamentos, caracterizados ainda por serem equipamentos de pequeno porte. Além disso, a proteção do talude pode ser feita de várias formas e podem permitir uma considerável economia.
- **versatilidade** – a técnica pode ser utilizada até mesmo em áreas sísmicas ou com cargas dinâmicas. Ela também permite uma solução conjunta com outros tipos de contenção.

Embora possua vantagens que são pontos muito fortes, esta técnica como todas as outras também possuem desvantagens que devem ser consideradas na fase de pré-projeto:

- **nível d'água** – uma das limitações do método é a presença de água. Portanto, caso isso ocorra, deve ser previsto o rebaixamento do lençol freático para que possa ocorrer as escavações.
- **deslocamentos** – devido ao princípio de funcionamento dos grampos (elementos passivos), deve-se tomar cuidado com os deslocamentos horizontais e verticais durante e após a execução. Portanto é importante o monitoramento desses deslocamentos para que esses recalques não prejudiquem as edificações vizinhas.
- **solo adequado** – o solo necessita de uma coesão mínima para se manter estável até que sejam instalados os grampos.

## 2.2 Cortina Atirantada

### 2.2.1 Definição

Outra técnica de contenção de taludes bastante utilizada é a cortina atirantada. A cortina atirantada possui aplicação semelhante a do solo grampeado, porém as duas técnicas são bem diferentes no que diz respeito ao funcionamento. Possuem grande destaque dentre as estruturas de contenção devido à sua eficácia e versatilidade, podendo ser usadas em quaisquer situações geométricas, porém possuem um custo elevado. É o método mais indicado quando se procura conter os elevados esforços horizontais advindos de escavações de grandes alturas, com um mínimo de deslocamentos do maciço de solo e das estruturas localizadas nas vizinhanças.

A cortina atirantada consiste em uma “cortina” de contenção pressionada por tirantes contra as encostas. As cortinas podem ser confeccionadas com painéis de diversos tipos de materiais, como por placas de concreto armado, parede diafragma, estacas-pranchas, estacas-raiz e perfis metálicos intercalados por vigotas de madeira ou por concreto armado pré-moldado. Porém, para o presente trabalho, será considerada uma contenção feita de concreto armado.

Principais componentes da cortina atirantada, os tirantes têm como função básica transmitir os esforços externos de tração para o terreno através do bulbo (YASSUDA & DIAS, 1998). Ou seja, eles são responsáveis por fazer a ligação entre o bulbo ancorado no interior do solo e o painel de

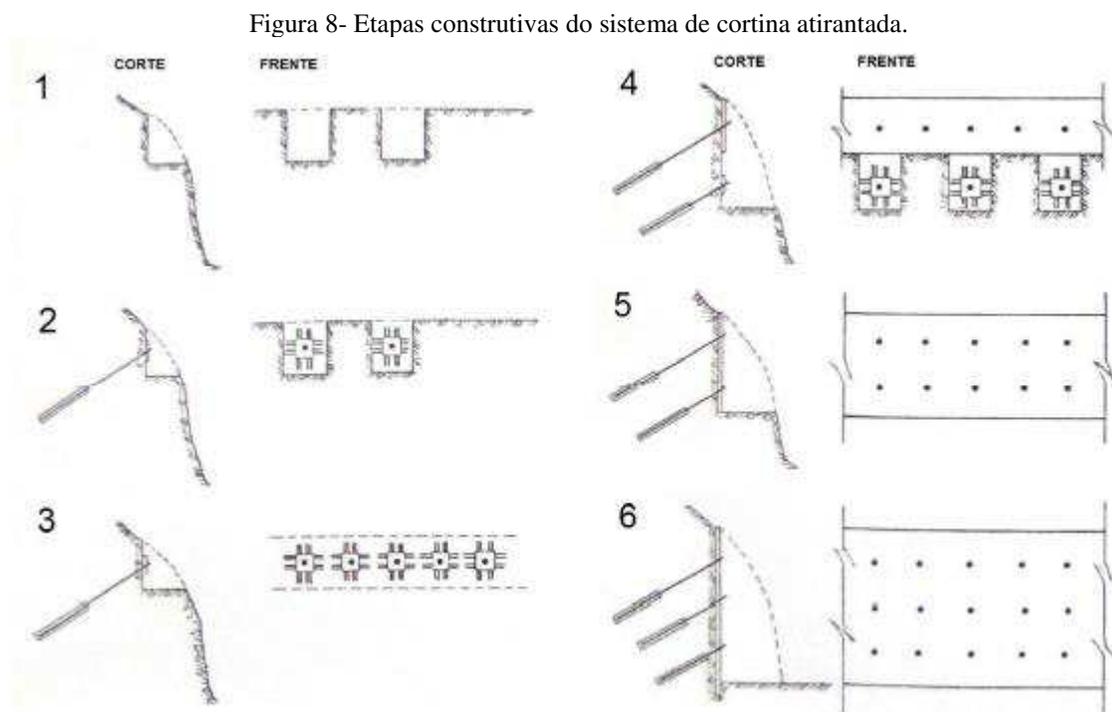
contenção na parte externa da encosta. Os tirantes são compostos por três partes: a cabeça, o trecho livre e o trecho ancorado.

### 2.2.2 Método executivo

De acordo com Cerqueira (1978), o processo executivo da técnica de cortina atirantada pode ser subdividido em seis grandes etapas:

- etapa 1 – escavação de nichos para colocação dos tirantes alternados (1ª fileira);
- etapa 2 – execução dos tirantes;
- etapa 3 – repetição das operações das etapas 1 e 2, com relação as placas alternadas da primeira fileira;
- etapa 4 – concretagem da cortina referente a primeira fileira, repetição das etapas 1 e 2 para a execução da 2 fileira;
- etapa 5 – repetição das operações executadas na fase 3 na segunda fileira e posterior concretagem da cortina referente a segunda fileira.
- etapa 6 – repetição de todas as etapas acima quantas vezes forem necessárias para atingir-se a altura desejada da contenção.

A figura 8 abaixo ilustra todo o esquema de execução:



Fonte: Cerqueira (1978)

De acordo com a Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro (2000), esse processo pode ser simplificado a somente 4 etapas:

- 1ª etapa – execução dos tirantes;
- 2ª etapa – escavação ou reaterro, de acordo com o tipo de contenção a ser executada, dependendo se é ascendente ou descendente;
- 3ª etapa – execução da cortina de concreto armado (formas, armadura e concretagem)
- 4ª etapa – testes e protensão nos tirantes até atingir carga de projeto.

#### *2.2.2.1 Execução dos tirantes*

##### *2.2.2.1.1 Preparação dos tirantes*

Esta etapa compreende todas as adequações e modificações que devem ser feitas nos elementos resistentes a tração. É a etapa que compreende os cortes das barras ou as emendas para atingir o comprimento necessário de projeto. As emendas devem ser feitas dentro ou mais próximas possíveis do bulbo, evitando fazê-las no trecho livre. Deve-se prever também o comprimento adicional necessário para a instalação do macaco hidráulico durante a fase de protensão. As placas de ancoragem merecem uma atenção especial no que diz respeito a suas dimensões, pois placas com dimensões pequenas podem causar o efeito de punção na cortina. Outro ponto de atenção são cunhas que não levem a ortogonalidade da cabeça com o eixo do tirante, fato que pode causar flexão composta no aço que pode ser crítica em elementos submetidos a elevadas forças de tração (YASSUDA & DIAS, 1998).

A NBR 5629 (2006) exige que deve ser feita a proteção anticorrosiva no aço a ser utilizado. Esta medida tem como objetivo assegurar o bom desempenho do tirante durante a vida útil para qual foi projetado. O tipo de proteção depende do tipo de ambiente que irá atuar. Elementos como classificação de agressividade do ambiente, técnicas de proteção e outros podem ser consultados na norma.

##### *2.2.2.1.2 Perfuração*

A perfuração é uma etapa muito importante na execução, é necessário que o furo seja retilíneo, e possua as características especificadas em projeto (comprimento necessário, diâmetro e inclinação). De acordo com a NBR 5629 (2006), qualquer método de perfuração é aceitável desde

que atenda as premissas de projeto e que o furo permaneça estável até a injeção do aglutinante. Para tal, pode-se optar pela utilização de camisas ou de fluido estabilizante, desde que seja inerte ao aço e não comprometa o atrito na interface solo concreto.

#### 2.2.2.1.3 Instalação

A instalação consiste somente na inserção das barras no furo anteriormente executado. Porém, antes deve-se conferir se a proteção está em boas condições e também conferir a condição das emendas, que devem ser corrigidas se necessário. Deve-se verificar também os dispositivos de fixação que compõe a cabeça. Uma vez instalados, inicia-se a etapa de injeção.

#### 2.2.2.1.4 Injeção

A injeção é a fase em que ocorre o preenchimento do bulbo com o aglutinante especificado (normalmente utiliza-se calda de cimento, como é o caso deste trabalho). Esta injeção pode ocorrer em estágio único ou em múltiplos estágios, a escolha vai de acordo com a opção do projetista responsável.

No caso da injeção em estágio único, ela ocorre antes da instalação dos tirantes. Primeiro ocorre a lavagem do furo para a retirada de detritos do solo ou do fluido estabilizante. Em seguida ocorre o preenchimento do furo com a nata de cimento através de uma mangueira de injeção. Por fim, instala-se o tirante no furo.

No caso de execução em múltiplos estágios, primeiro instala-se os tirantes e posteriormente ocorre o preenchimento do bulbo. Deve-se prever tubos de injeção de PVC paralelos aos tirantes, através do qual serão feitas as injeções. No primeiro momento ocorre o preenchimento do furo com a calda sob baixa pressão. Após a pega do concreto, cerca de 10 horas, ocorre a segunda injeção de nata também conhecido como estágio primário. Os tubos de PVC possuem válvulas que consistem em furos que são recobertos com borracha flexível. Inicialmente, a pressão exercida deve ser suficiente para ocasionar a abertura da válvula, sendo em seguida monitorado o volume de calda injetada e a pressão atuante, até que seja atingida pressão suficiente para que a calda infiltre-se no solo (YASSUDA & DIAS, 1998).

### 2.2.2.1.5 Protensão e ensaios

O último passo da execução dos tirantes é a protensão. Ela é executada contra a estrutura a ser suportada e é realizada através de um conjunto composto de macaco hidráulico, bomba e manômetro. A norma vigente NBR 5629 (2006) descreve que todos os tirantes devem ser submetidos a ensaios de protensão, sendo esses ensaios:

- Ensaio básico: ensaio realizada para verificar a se o tirante foi executado de maneira correta. São observados itens como a centralização dos tirantes no bulbo, a definição do comprimento livre no tirante, a qualidade de injeção e principalmente a conformação do bulbo de ancoragem.
- Ensaio de qualificação: este ensaio permite verificar a capacidade de carga do tirante e seu deslocamento sob carga, avaliar os comprimentos livres e ancorados e o atrito no trecho livre.
- Ensaio de recebimento: sua finalidade é controlar a capacidade de carga e o comportamento de todos os tirantes de uma obra. São previstos quatro tipos de carregamentos, conforme a utilização do tirante e sequência de execução, sendo que todos os ensaios devem partir da carga inicial  $F_0$ , e 18 atingir a carga máxima prevista, retornar à carga inicial  $F_0$  e recarregar até a carga de trabalho  $F_t$  com medições de deslocamentos da cabeça, tanto nas fases de carga como na de descarga.
- Ensaio de fluência: o ensaio de fluência tem como objetivo verificar o desempenho dos tirantes sob uma carga de longa duração. O ensaio consiste na aplicação constante de cargas durante intervalos de tempos determinados e a verificação dos deslocamentos de acordo com o máximo permitido.

### 2.2.3 Elementos constituintes

#### 2.2.3.1 Cortina de contenção

Parede ou cortina de contenção é todo elemento ou estrutura plana, geralmente vertical, destinado a contrapor-se a tensões geradas por empuxos de solo e/ou água em um maciço de solo, cuja condição de equilíbrio foi alterada por algum tipo de escavação ou eventual reaterro, que tenha ocorrido em um de seus lados, sendo caracterizada pela pequena deslocabilidade. Contudo, há

distinção no que se refere aos tipos de estruturas de contenção, podendo elas ser divididas, basicamente, em estruturas massivas ou estruturas delgadas (TACITANO, 2006)

De acordo com Ranzini e Negro Junior (1998), a técnica de cortina atirantada pode ser executada com cortinas feitas de:

- concreto armado atirantadas;
- estacas justapostas;
- estacas prancha;
- perfil metálico cravado;
- estacas do tipo 'raiz' ;
- estacas escavadas com arco de concreto projetado
- paredes-diafragma;

Porém, para o presente trabalho, como mencionado anteriormente, será analisada a cortina feita de concreto armado. Esta opção foi feita por facilitar e tornar mais real a comparação com a técnica de solo grampeado.

#### 2.2.3.2 *Tirantes*

Os tirantes, principais elementos do método de cortina atirantada, definem-se basicamente como dispositivo responsável por absorver os esforços horizontais provenientes do empuxo do solo. Eles transmitem esses esforços para uma região resistente do solo através do bulbo de ancoragem (ENGESOL, 2014; JUNIOR, 2007). A NBR 5629 (2006), referente a execução de tirantes ancorados no terreno, define os tirantes como:

[...] peças especialmente montadas, tendo como componente principal um ou mais elementos resistentes à tração, que são introduzidos no terreno, em perfuração própria, nas quais, por meio de injeções de calda de cimento (ou outro aglutinante) em partes dos elementos, forma um bulbo de ancoragem que é ligado à estrutura através do elemento resistente à tração e da cabeça do tirante (NBR 5629, 2006, p. 1).

Os componentes dos tirantes são:

- Cabeça:

Define-se a cabeça do tirante como o dispositivo que tem como função transferir a carga do tirante a estrutura a ser ancorada. Existem várias configurações para esta parte dependendo do tipo de tirante a ser executado, porém no geral ela se constitui de placa de apoio, cunha de grau e bloco de ancoragem.

Bloco de ancoragem é a peça que prende o tirante na região da cabeça. Estas peças podem ser de três tipos: a) cunhas em tirantes com múltiplos fios; b) porcas, usadas em barras roscáveis; c) botões, onde a ponta de cada fio é prensada num macaco hidráulico.

A placa de apoio age distribuindo a carga de protensão dos tirantes na superfície da cortina. Além disso, sua utilização também tem como intuito diminuir o efeito de punção sobre a cortina de concreto armado. Esta chapa é dimensionada de acordo com a carga do tirante.

A cunha de grau, por sua vez, permite o alinhamento do tirante em relação a cabeça através de um cilindro ou chapas paralelas de aço.

- Trecho ancorado:

É o trecho em que o tirante (barras, fios, cordoalhas) ficam em contato com a nata de cimento que é injetada sobre pressão. Essa região forma o bulbo de ancoragem. O bulbo de ancoragem é responsável por transmitir os esforços normais de tração suportados pelo trecho livre, para uma região de solo mais estável. Essa transmissão de esforços acontece mediante atrito gerado entre o bulbo e o solo.

- Trecho livre

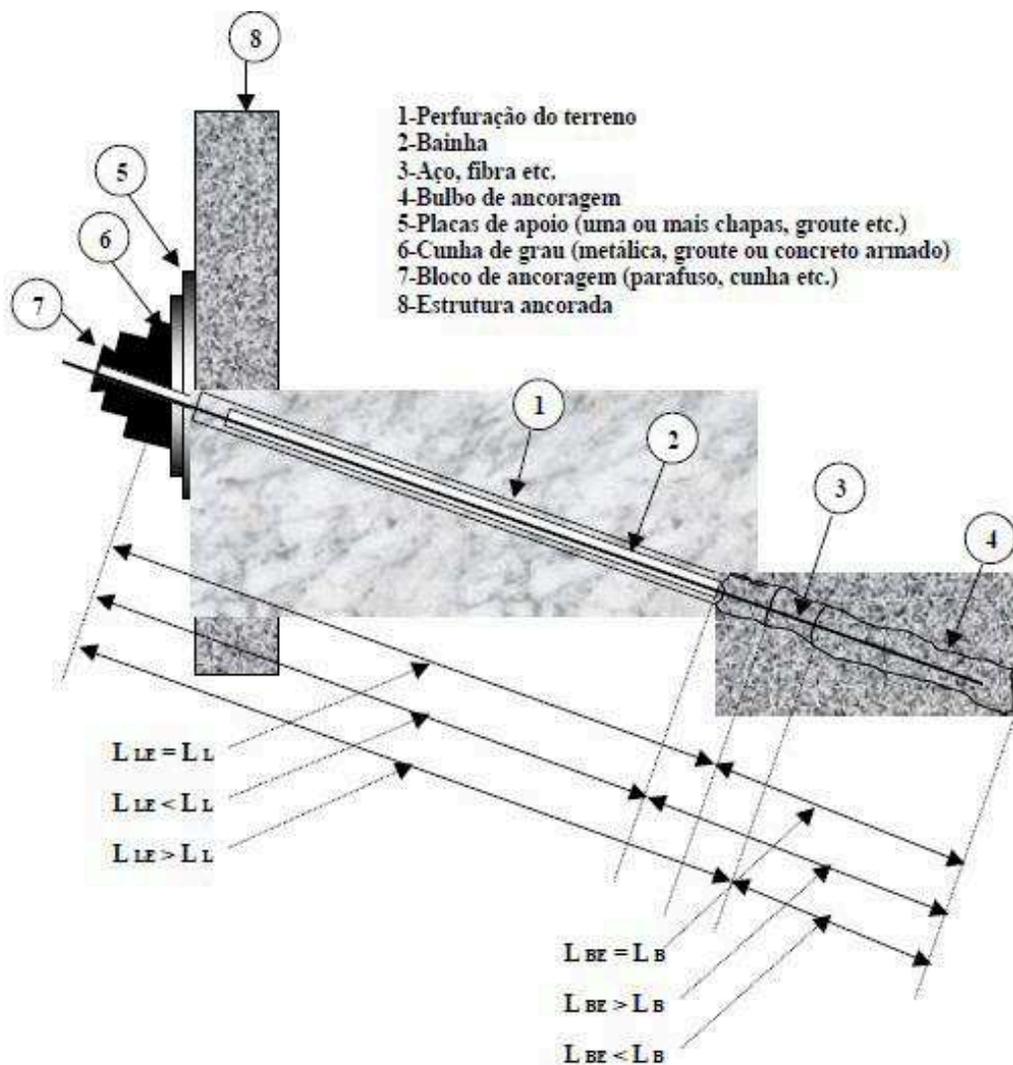
O trecho livre compreende o trecho entre a cabeça e o ponto inicial de aderência do bulbo de ancoragem. Este trecho é constituído por tirantes e é isolado da calda de cimento. Na transição entre o trecho livre e o trecho ancorado, os tubos são vedados com massa plástica para evitar que a calda de cimento entre no trecho livre. Usualmente, cada elemento é engraxado e envolto por um tubo plástico ou uma bainha.

De acordo com Teixeira (2011), utilizam-se como elementos resistentes a tração:

- Barras de aço, rosqueadas ou nervuradas, em diâmetros usualmente de 1 1/4" ou de acordo com a necessidade de projeto.
- Fios, que são elementos compostos por barras de aço, de menores diâmetros, em quantidade determinada de acordo a resistir aos esforços solicitantes.
- Elementos sintéticos, fabricados de forma a garantir alta resistência à tração.

Todos os componentes dos tirantes podem ser visualizados na figura 9 a seguir:

Figura 9- Elementos característicos dos tirantes que compõe a cortina atirantada.



Fonte: NBR 5629

## 2.2.4 Dimensionamento

### 2.2.4.1 Dimensionamento da cortina de concreto armado

O dimensionamento da estrutura da cortina de concreto armado pode ser realizado considerando-se como lajes nervuradas ou lajes cogumelo, desta forma, obedecendo as recomendações de dimensionamento e execução existentes na norma vigente de estruturas de concreto armado NBR 6118(ABNT, 2014). Embora exista a norma, ela não é suficiente para a execução da cortina, existem informações adicionais muito importantes e específicas das cortinas atirantadas que devem ser consultadas no Manual Técnico de Encostas da Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (2000, p.136-146):

- a água utilizada deve ter pH entre 5,8 e 8,0;
- o agregado miúdo deve ser exclusivamente de areia natural constituída por grãos de quartzo;
- o agregado graúdo deve ser constituído por pedra britada de rocha sã, sendo necessária aprovação prévia de laboratório para a utilização de qualquer outro;
- o concreto utilizado deve possuir fck mínimo de 20 MPa e relação água-cimento máxima de 0,6;
- devem ser previstas juntas de concretagem entre os módulos da cortina;

Para que a cortina tenha um bom desempenho no que diz respeito a rigidez relativa, ela deve trabalhar como um elemento único para que não influencie no diagrama de tensões da estrutura. Logo, a cada modulo de concretagem devem ser previstas esperas de armadura para serem vinculadas no modulo seguinte garantindo a premissa de projeto para que a peça trabalhe como uma única estrutura.

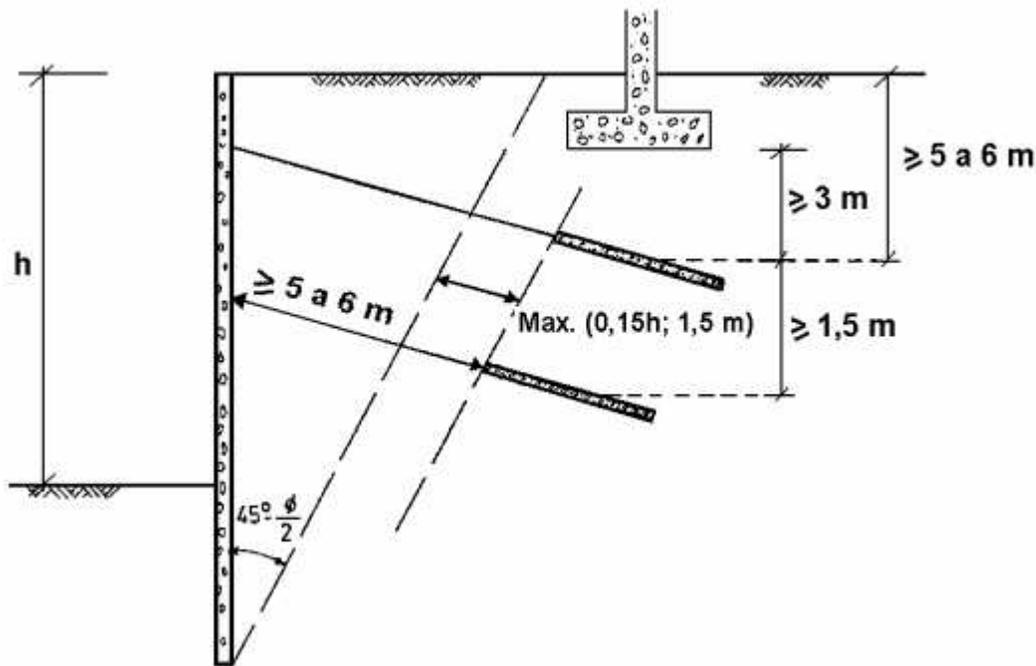
### 2.2.4.2 Dimensionamento dos tirantes

Littlejohn e Ostermayer (1972) fizeram algumas observações sobre o dimensionamento dos tirantes (figura x):

- o bulbo de ancoragem dos tirantes deve-se situar na zona passiva do solo com uma distância mínima da linha de ruptura;

- os bulbos devem situar-se a uma profundidade mínima de 5 metros da superfície do terreno ou 3 metros abaixo das estruturas de fundações existentes. Esta recomendação baseia-se nos possíveis efeitos que podem causar a superfície ou nos elementos de fundações devido as elevadas pressões de injeção da calda de cimento;
- espaçamento mínimo entre os bulbos de ancoragem deve ser no mínimo 1,5m, afim de evitar de minimizar a interferência entre as ancoragens, e uma possível diminuição das respectivas capacidades de carga.
- O comprimento livre não deve ser inferior a 5m afim de evitar uma sobrecarga sobre a cortina, devido as tensões transmitidas através do solo.
- Bulbos de ancoragem com comprimentos menores que 3m não são aconselháveis. O valor final do comprimento depende da capacidade de carga requerida.

Figura 10- Aspectos do dimensionamento das cortinas atirantadas.



Fonte: LITTLEJONH (1972), OSTERMAYER(1976)

De acordo com a norma vigente, ABNT:NBR 5629 (2006) a seção do tirante deve ser dimensionada de acordo com o esforço máximo a que será submetido. Deve-se considerar também a menor seção do tirante, no caso de barras rosqueáveis por exemplo, considerar menor seção entre as ranhuras onde se encaixaram as porcas. O material dos tirantes também deve estar de acordo

com normas específicas (NBR 748, NBR7482, NBR7483). A norma traz duas distinções com relação a origem dos tirantes:

a) Para tirantes permanentes (equação 2):

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,75} \cdot 0,9 \quad \text{Equação 2}$$

b) Para tirantes provisórios (equação 3):

$$\sigma_{adm} = \frac{f_{yk}}{1,50} \cdot 0,9 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$\sigma_{adm}$  = tensão admissível.

$f_{yk}$  = resistência característica do aço a tração.

A NBR 5629 não permite que os tirantes possuam seção transversal menor que 50mm<sup>2</sup>.

#### 2.2.4.3 Dimensionamento do bulbo

A resistência ao cisalhamento na interface solo-bulbo é o único parâmetro considerado para a determinação da capacidade de carga das ancoragens. A NBR 5629 (2006) recomenda que a determinação do comprimento e seção transversal das ancoragens deve ser feita experimentalmente por meio de ensaios básicos e qualificação. Porém, a norma indica expressões que fornecem estimativas preliminares:

- Resistência a tração T para solos coesivos (equação 4):

$$T = \alpha \cdot U \cdot L_b \cdot S_u \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\alpha$  = Coeficiente redutor da resistência ao cisalhamento

$S_u$  = Resistência ao cisalhamento não drenado do solo argiloso.

Sendo:  $\alpha = 0,75$  para  $S_u \leq 40\text{KPa}$ ;  $\alpha = 0,35$  para  $S_u \geq 100\text{KPa}$ .

$L_b$  - Comprimento do bulbo de ancoragem.

U- Perímetro médio da seção transversal de ancoragem.

- Resistência a tração T para solos granulares (equação 5):

$$T = \sigma' \cdot U \cdot L_b \cdot K_f \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

$\sigma'$  - tensão efetiva no ponto médio de ancoragem.

$K_f$  - coeficiente de ancoragem, tabela 3.

Tabela 3- Coeficiente de ancoragem  $K_f$ .

Solo	Compacidade		
	Fofa	Compacta	Muito Compacta
Silte	0.1	0.4	1.0
Areia Fina	0.2	0.6	1.5
Areia média	0.5	1.2	2.0
Areia Grossa e Pedregulho	1.0	2.0	3.0

Fonte: NBR5629

### 2.2.5 Modos de ruptura

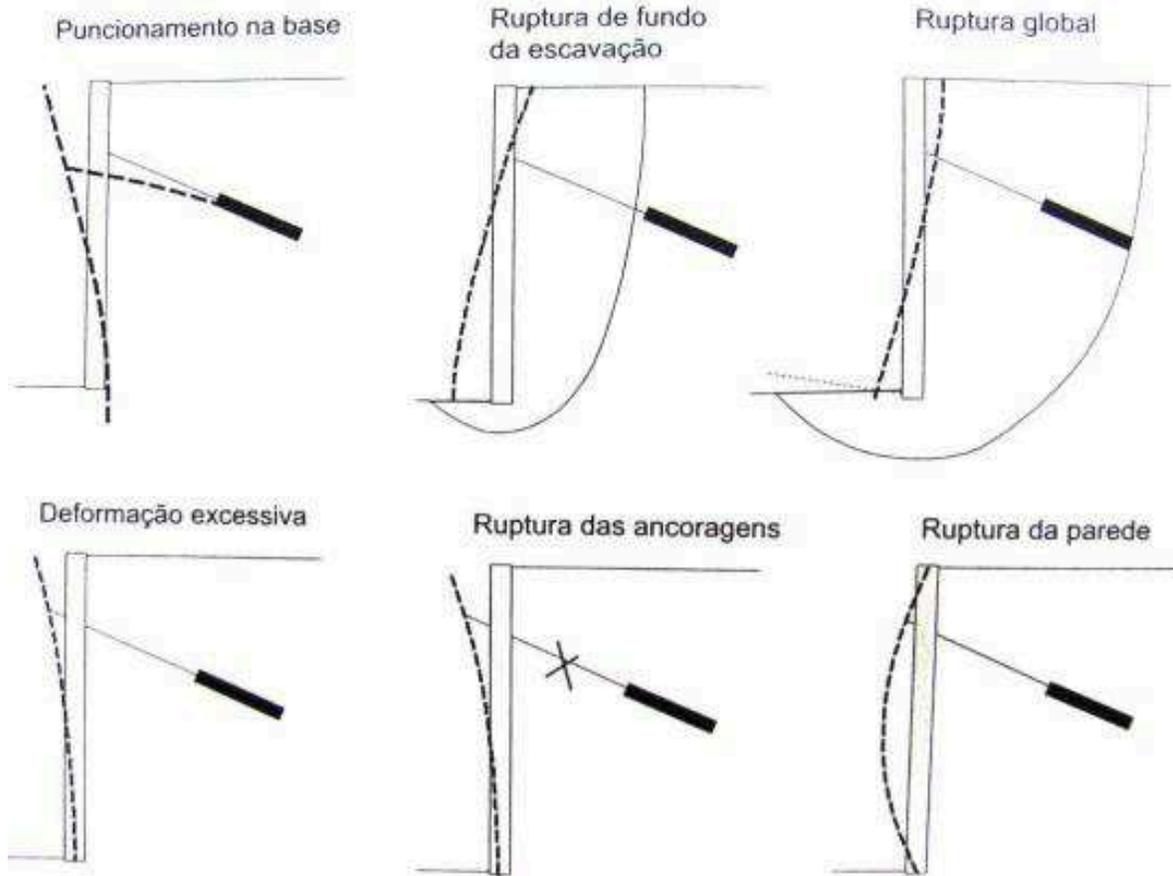
A Fundação Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro (2000) cita e detalha seis tipos principais de ruptura que podem acontecer no sistema cortina-tirante, como pode ser verificado nos itens abaixo:

- puncionamento da base:** pode ocorrer quando o solo que se apoia a base da cortina é de baixa capacidade de suporte. Toma-se como baixa capacidade de suporte a capacidade de carga inferior a 20KPa, ou índice N de resistência a penetração, SPT, N inferior a 10. Nesse caso uma das soluções é a adoção de microestacas de apoio [...];
- ruptura de fundo da escavação:** situação que pode ocorrer se existir uma camada de solo mole abaixo do nível de escavação;

- c) **ruptura global:** a ruptura global pode ser subdivida em dois casos, o da cunha de ruptura e de uma ruptura generalizada e profunda [...]. O primeiro pode ser analisado pelo método das cunhas, o segundo pelo método de equilíbrio limite com superfície circular ou poligonal. Um caso comum de risco de ruptura em cunha ocorre durante a escavação, situação que pode ser estabilizada através de escavação em nichos;
- d) **deformação excessiva:** pode ocorrer durante a construção antes da protensão de um determinado nível de ancoragens. Uma vez executada a obra, dificilmente ocorre, pois as cortinas ancoradas são rígidas o suficiente;
- e) **ruptura das ancoragens:** ocorre por capacidade de carga insuficiente das ancoragens ou durante a execução, quando outros níveis de ancoragem ainda não foram instalados. Por exemplo, em estruturas ancoradas utilizadas na base de taludes muito altos [...]. Havendo instabilização do talude e deslocamentos da massa de solo, as ancoragens podem ser supertensionadas e romper [...];
- f) **ruptura da parede:** pode haver duas situações: ruptura por flexão devido a armadura insuficiente e ruptura por puncionamento das ancoragens [...].

Todos estes tipos de falhas podem ser visualizados na figura 9 a seguir:

Figura 11- Modos de falha que podem ocorrer.



Fonte: GEORIO (2006)

### 3 ESTRUTURA MISTA

#### 3.1 Deslocamentos

Nas contenções feitas de solo grampeado os deslocamentos são necessários e inevitáveis, pois a mobilização do atrito entre o solo e o grampo apenas acontece após ocorrer uma mínima deformação do solo. Os maciços reforçados com solo grampeado tendem a apresentar deformações significativas durante e após a construção da obra da contenção. A medida que se executam as escavações, o solo sofre um desconfinamento, ou seja, ele sofre um alívio progressivo das tensões no solo devido as sucessivas fases de escavação, causando os deslocamentos.

De acordo com Clouterre (1991), os maiores deslocamentos ocorrem no topo da estrutura de paramento e normalmente os deslocamentos horizontais e verticais são de mesma magnitude. Os deslocamentos da estrutura são difíceis de prever pois dependem de uma série de fatores:

espaçamento entre os grampos, comprimento e inclinação dos grampos, fator de segurança global da estrutura, altura das fases de escavação, densidade de aplicação dos grampos no solo, dentre outros. Os deslocamentos compreendem entre 0,1% e 0,4% da altura total da estrutura de contenção e quanto menor for o fator de segurança, maior serão os deslocamentos.

A zona de influência dos deslocamentos pode ser definida pela distância  $\lambda$  (figura 10) que é calculada por uma relação empírica demonstrada na equação 5 abaixo:

$$\lambda = H(1 - \operatorname{tg} \eta) \cdot \kappa \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

H – altura do talude;

$\eta$  – ângulo de inclinação do muro em relação a vertical;

$\kappa$  – coeficiente que depende do tipo de solo que compõe o maciço a ser reforçado;

Na figura abaixo também pode-se visualizar a distorção angular ocorrida no maciço. Ela pode ser calculada conforme a equação 7 a seguir:

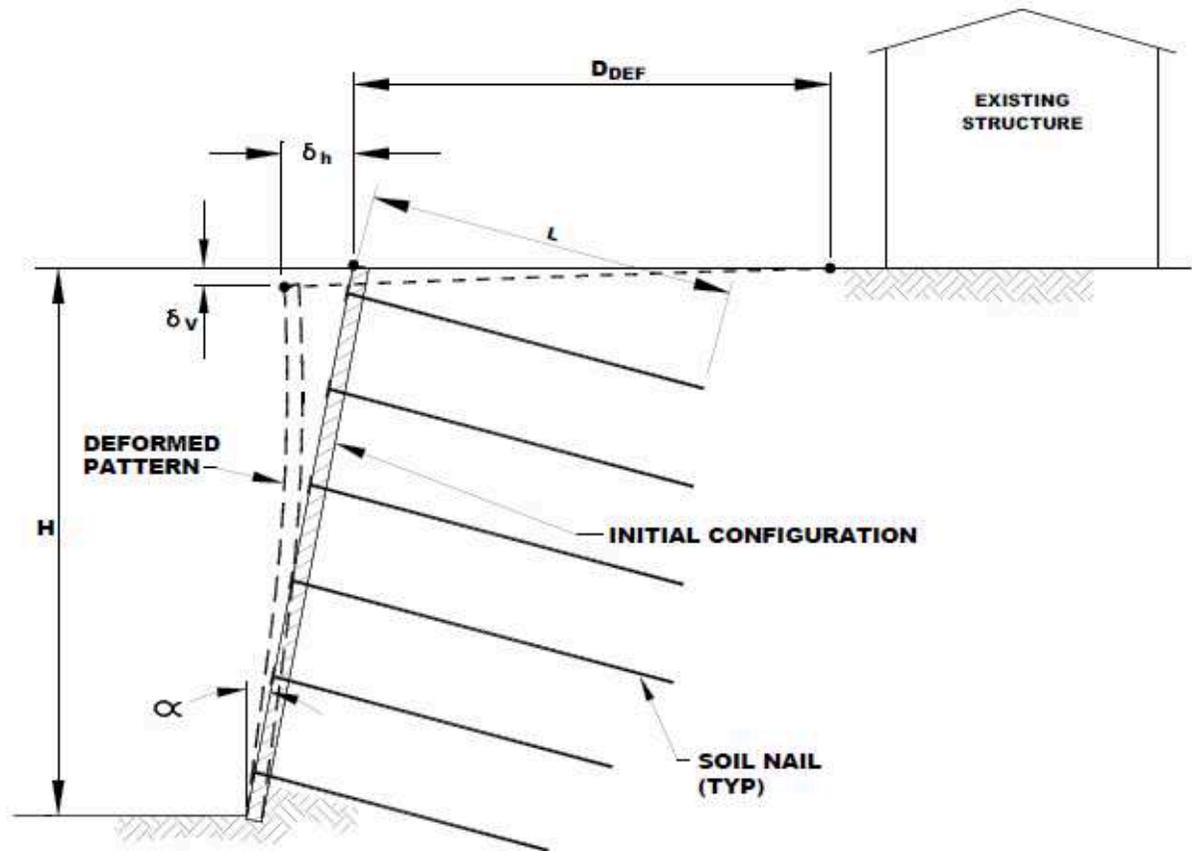
$$\delta_0 = \frac{L}{H} \quad \text{Equação 7}$$

$\delta_0$  = distorção angular;

L = comprimento;

H = recalque vertical;

Figura 12- Demonstração dos deslocamentos que ocorrem na estrutura.



Fonte: FHWA(2011)

Os valores de  $\kappa$  podem ser visualizados na tabela 4 abaixo:

Tabela 4- Valor do coeficiente utilizado na equação do cálculo da distância de influência.

	Solos Intermediários (rochas)	Areia	Argila
$\delta_v = \delta_h$	H/1000	2H/1000	4H/1000
$\kappa$	0.8	1.25	1.5

Fonte: CLOUTERRE (1991)

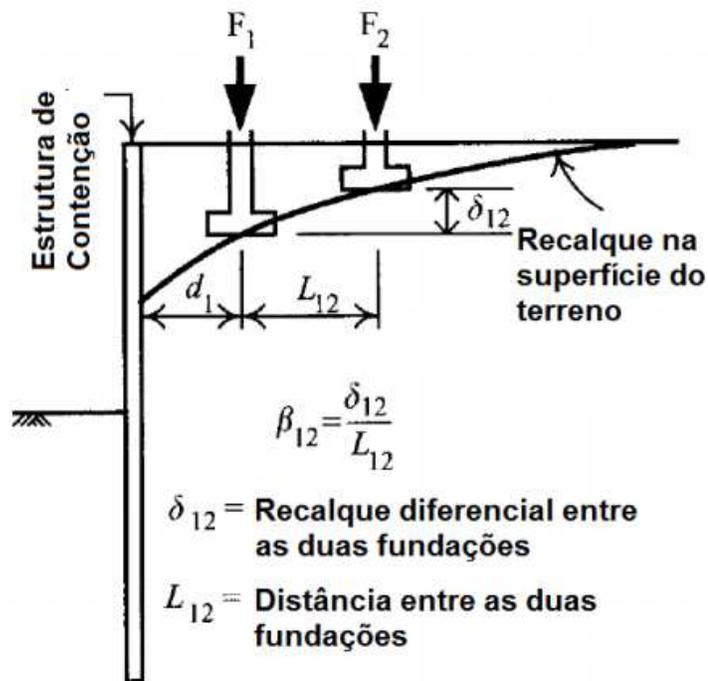
### 3.2 Solução em estrutura mista

Sabe-se que as duas técnicas de contenção se diferenciam primordialmente pelo princípio de funcionamento. O fato dos grampos (estruturas passivas) dependerem do deslocamento do maciço para a mobilização do atrito, faz com que apresente deslocamentos que não são desejáveis para a

estrutura. Deslocamentos horizontais e verticais constituem uma limitação que é particularmente importante para o perímetro urbano devido a presença de estruturas (casas, prédios, shoppings, etc) na vizinhança. Esses deslocamentos variam de acordo com a altura da contenção e eles afetam a superfície do solo nos entornos da contenção, mas reduzem à medida que se afasta da estrutura de paramento.

É muito importante fazer a verificação e o mapeamento das edificações vizinhas. Deve-se verificar quão resistente são as estruturas vizinhas a esses deslocamentos. As edificações devem suportar, sem danos, a deformação horizontal do solo combinada com o deslocamento vertical. No estudo de recalques admissíveis e correspondentes a danos a construção, muitos autores baseiam-se na distorção angular. Distorção angular é a relação entre o recalque diferencial e a distância entre os elementos da fundação (pode ser calculada conforme equação 6 e pode ser observada na figura X).

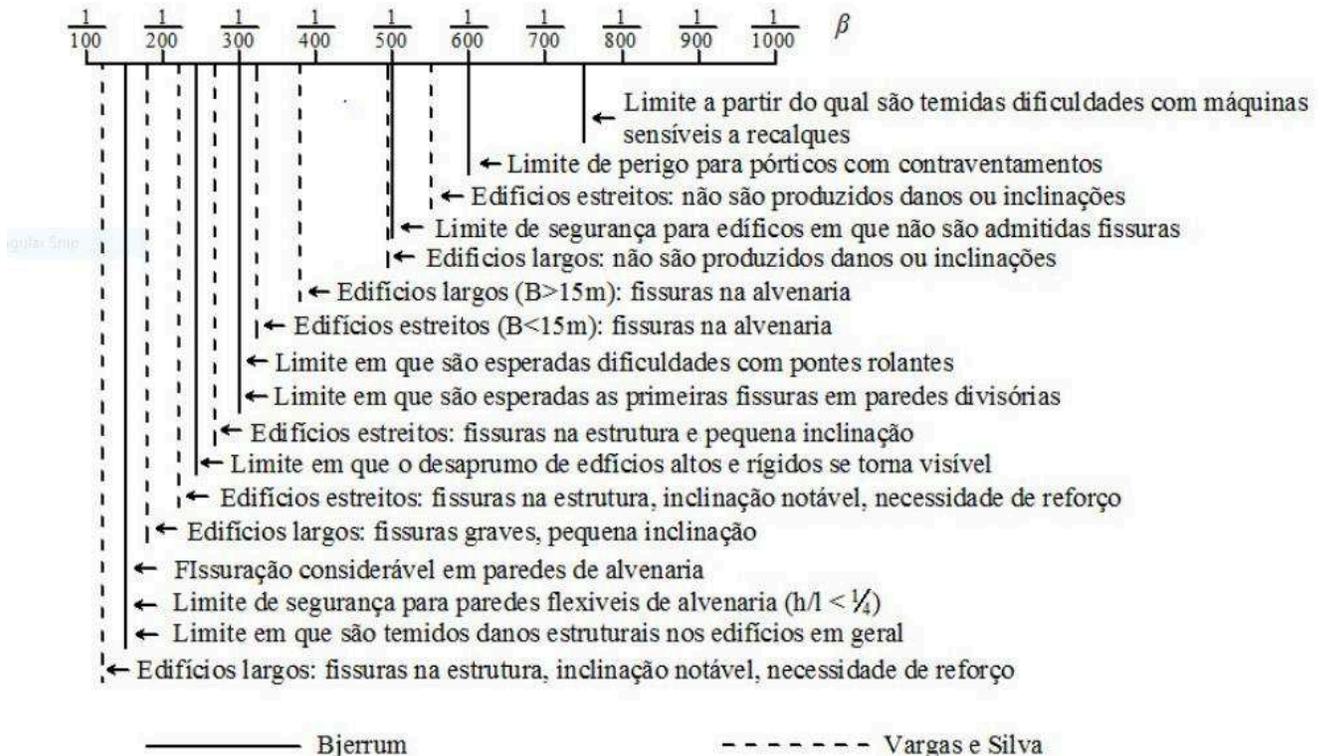
Figura 13- Distorção angular.



Fonte: PUC RIO (2016)

Com base na observação feita em dezenas de edifícios, SKEPTOM & MACDONALD (1956) associaram a ocorrência de danos a valores limites para a distorção angular. Para se ter uma ideia da magnitude dos valores de recalques admissíveis, a figura 11 apresenta alguns danos associados às distorções angulares, conforme propõem Bjerrum (1963, apud VELLOSO & LOPES, 2010) e complementado por Vargas e Silva (1973, apud VELLOSO & LOPES, 2010).

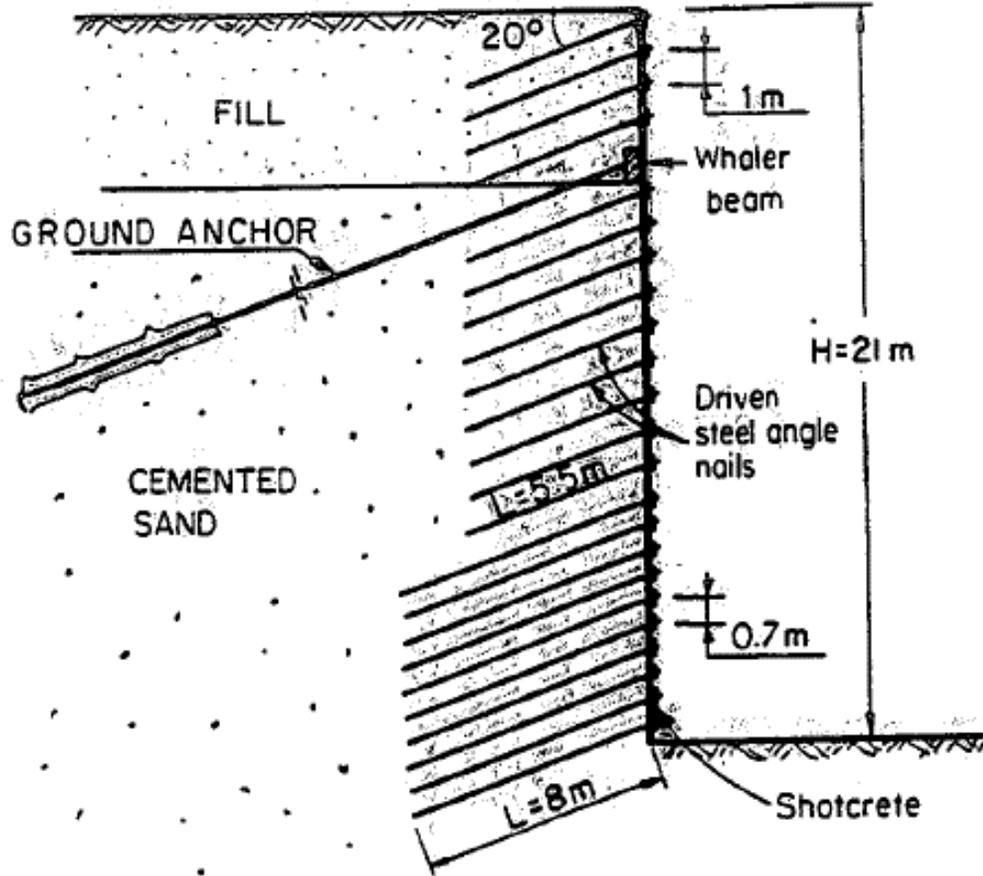
Figura 14- Relação entre distorção angular e danos causados as estruturas.



Fonte: VELLOSO & LOPES (2010)

Uma alternativa para a redução desses deslocamentos é a construção da estrutura de paramento inclinada para ajudar na estabilidade. Quando a estrutura não é capaz de tolerar as distorções do solo, deve-se incluir no projeto tirantes (estruturas ativas) no topo do paramento para eliminar ou minimizar os deslocamentos da estrutura, para que eles se mantenham dentro da faixa aceitável (CLOUTERRE, 1991). Um exemplo de estrutura mista pode ser visualizado na figura 12 abaixo:

Figura 15- Contenção em solo grampeado com introdução de tirante.



Fonte: CLOUTERRE (1991).

#### 4 CASO DE ESTUDO

Para o presente trabalho, serão estudados 4 casos diferentes em duas situações distintas:

Situação 1 – Os tirantes serão introduzidos após a execução da estrutura em solo grampeado.

- Caso 1: os tirantes serão introduzidos após a execução de uma estrutura de contenção em solo grampeado. A contenção já foi dimensionada, executada e apresentou os devidos deslocamentos. Na região onde apresentou maior deslocamento, será inserida uma linha de tirantes para estabilizá-los.
- Caso 2: a partir desta etapa os tirantes serão introduzidos durante as etapas de execução da contenção em solo grampeado, caracterizando-se como uma estrutura mista. Será introduzida uma linha de tirantes na região que apresentou maior deslocamento no caso 1.

Esta linha de tirantes será introduzida a 1,20m do topo da contenção, entre a primeira e segunda linha de grampos.

- Caso 3: durante as etapas de execução da contenção em solo grampeado, será introduzida uma linha de tirantes que substituirá a primeira linha de grampos.
- Caso 4: durante as etapas de execução da contenção em solo grampeado, será introduzida uma linha de tirantes que substituirá a segunda linha de grampos.

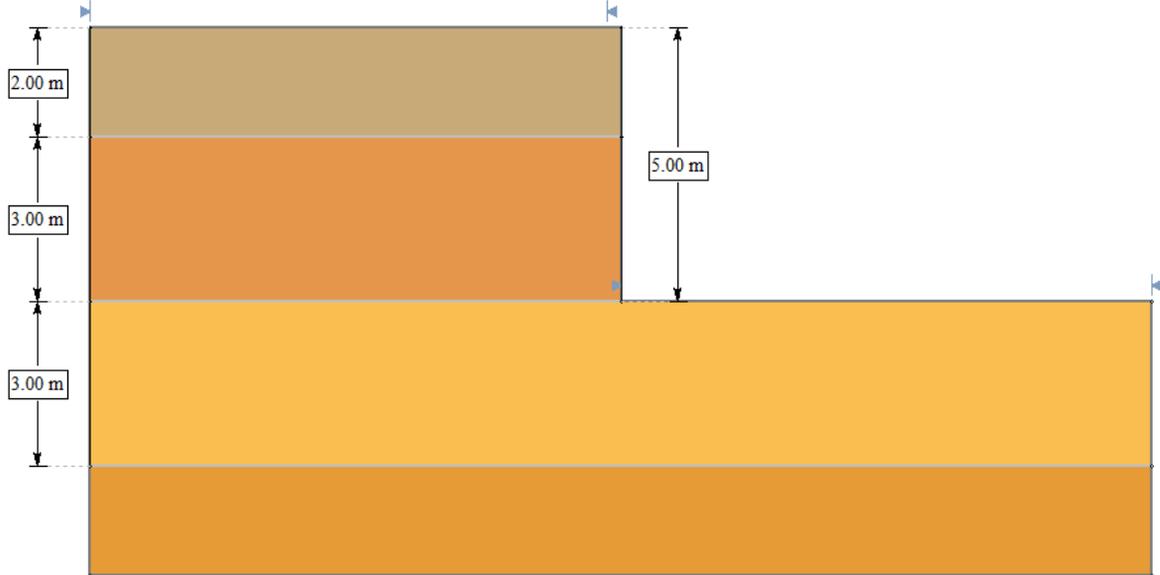
Serão feitas duas análises a partir destes quatro casos: a primeira análise será a eficácia entre a execução de tirantes após a finalização da contenção em solo grampeado ou em conjunto com a mesma, ou seja, durante a execução. A segunda análise será feita apenas com as opções em que os tirantes são executados em conjunto com a técnica de solo grampeado (caso 2, 3 e 4). Serão analisados qual é a melhor opção dentre as três e irá se estabelecer uma correlação entre custo vs deslocamento. Pois, a introdução desta linha de tirantes haverá um custo extra, logo será feito um estudo com relação a diminuição dos deslocamentos e os custos desta operação. Dessa maneira, é possível avaliar a viabilidade da operação, levando em conta a segurança das edificações ao redor.

O estudo será feito com base no trabalho de conclusão de curso realizado por Adileisson Gondim, também aluno da Faculdade de Engenharia Civil da UFU. Todos os dados pertinentes a contenção em solo grampeado remete ao seu trabalho, portanto são reconhecidos os seus devidos méritos.

#### **4.1 Parâmetros de projeto**

A estrutura de contenção em estudo refere-se à contenção de um talude artificial resultado da escavação para a garagem de um edifício. O talude possui 5 metros de altura e 10 metros de comprimento. O perfil do solo e a geometria de escavação podem ser visualizados na figura 16:

Figura 16- Perfil de escavação e camadas que compõe o talude.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Ru
ARGILA ARENOSA		16	Mohr-Coulomb	15	22.7	None	0
AREIA ARGILOSA		18	Mohr-Coulomb	5	25	None	0
SILTE ARENO ARGILOSO		18	Mohr-Coulomb	15	26.8	None	0
SILTE ARGILOSO		19	Mohr-Coulomb	20	31.1	None	0

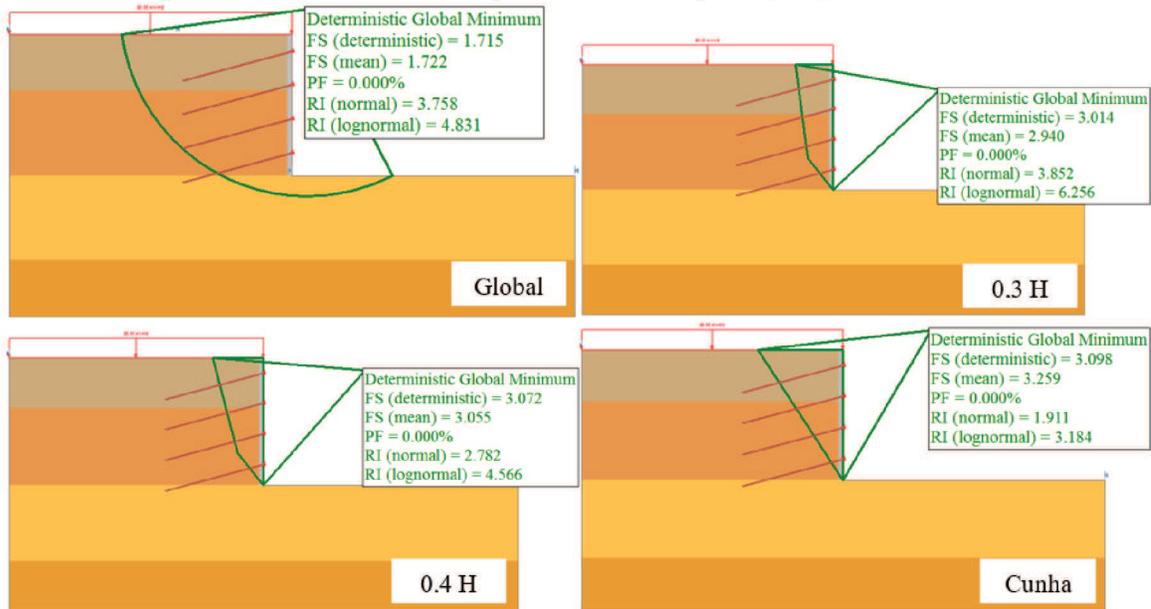
Fonte: GONDIM (2018)

#### 4.1 Dimensionamento e verificação da estabilidade

O dimensionamento dos grampos seguiu a recomendação de CLOUTERRE (1991), adotando o comprimento dos grampos de  $0,8H$ , ou seja, 4 metros. O comprimento dos grampos é uniforme em toda a contenção.

Após o dimensionamento fez-se a verificação da estabilidade local e global da estrutura, garantindo um  $FS > 1,5$ . Os resultados podem ser verificados na figura 17 a seguir:

Figura 17- Resultados da verificação da estabilidade para  $L/H=0,8$  e  $L$  constante.

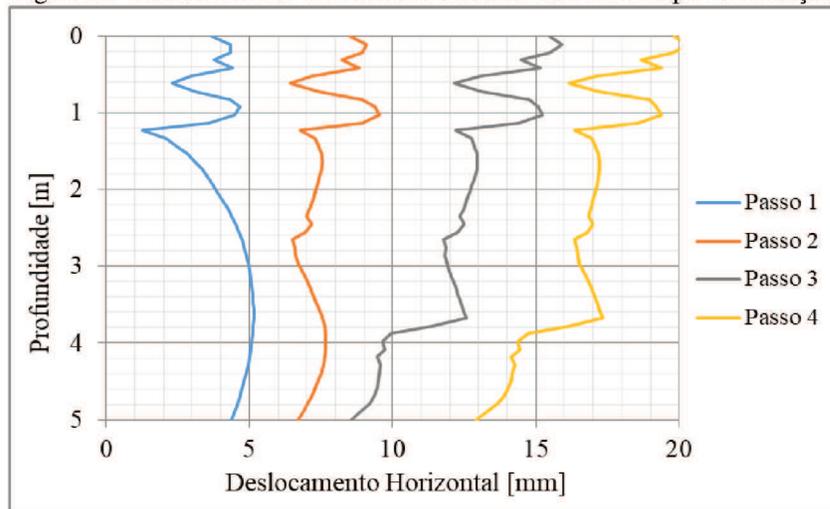


Fonte: GONDIM (2018)

### 4.3 Deslocamentos

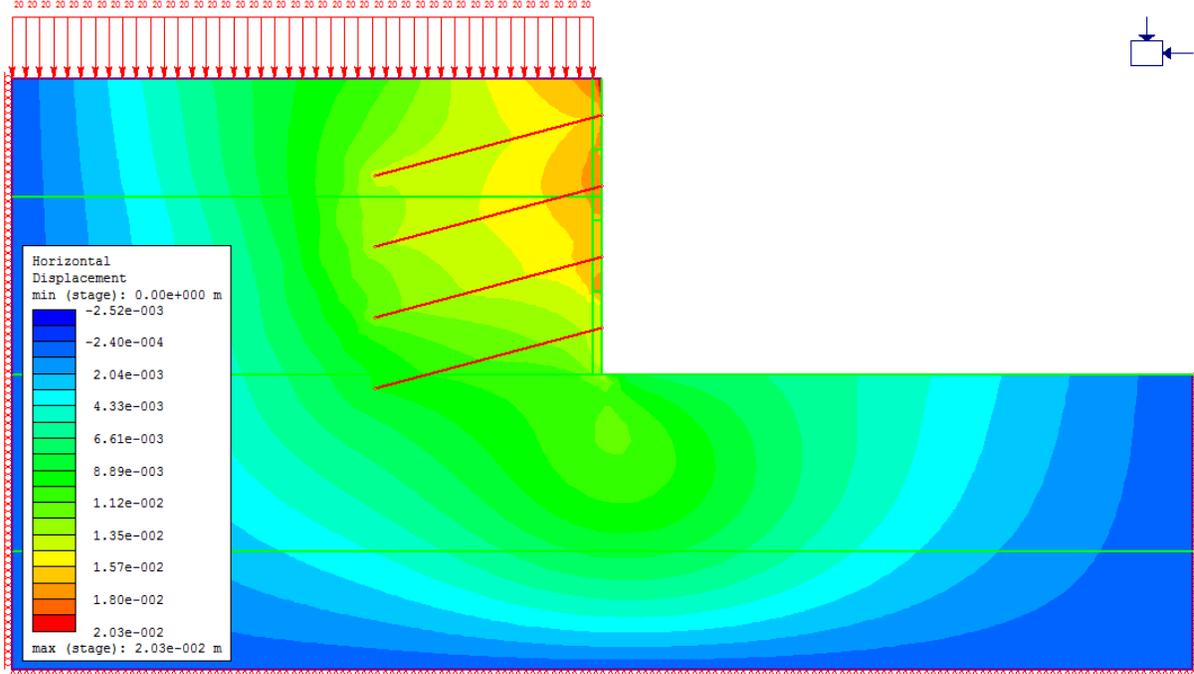
A estrutura foi realizada em 4 etapas de escavação de 1,25m cada. Após a verificação da estabilidade, o autor fez a verificação dos deslocamentos horizontais que ocorreram em cada etapa da execução. A figura 18 abaixo mostra os deslocamentos em cada etapa e a figura 19 abaixo mostra os deslocamentos horizontais encontrados ao finalizar a estrutura.

Figura 18- Deslocamentos horizontais de acordo com cada etapa de execução.



Fonte: GONDIM (2018)

Figura 19- Deslocamentos horizontais após finalizar a estrutura.



Fonte: GONDIM (2018)

## 5 DIMENSIONAMENTO

### 5.1 Tirantes

Primeiramente, definiu-se os parâmetros do tirante de acordo com a figura 10, respeitando todos os comprimentos mínimos descritos e ancorando o bulbo na região passiva do solo. Pode-se observá-los na tabela 5 abaixo:

Tabela 5- Parâmetros definidos para cada tipo de tirantes.

Tirante	$D_{\text{bulbo}}$ (m)	$L_{\text{bulbo}}$	$L_{\text{livre}}$
Caso 1	0.2	4	12,7
Caso 2	0.2	4	12,7
Caso 3	0.2	4	14,2
Caso 4	0.2	4	10,3

Fonte: AUTOR (2018)

Após definidos os parâmetros, calculou-se a tensão máxima que poderá ser aplicada nos tirantes de acordo com a equação 5:

$$T = \sigma' \cdot U \cdot L_b \cdot K_f$$

$K_f = 0,6$  (tabela 3)

$$\sigma' = 20 + 16 \times 2 + 18 \times 3 = 106 \text{ KPa}$$

$$T = 106 \times (2\pi \times 0,1) \times 4 \times 0,6 = 160 \text{ KN}$$

Portanto, cada tirante será executado apenas com uma barra, ou seja, monobarra de 1'' (25mm) CA-50 e será sujeito a uma tensão de 130 KN (respeitando o limite acima calculado). A escolha da barra e da carga de trabalho seguiram o manual da SOLOTRAT (2010), qual pode ser visualizado no anexo A.

O espaçamento horizontal adotado entre os tirantes será de 1,5m de distância. Serão também simulados espaçamentos maiores, caso haja outro que atenda de maneira satisfatória os deslocamentos e estabilidade, este será adotado.

## 5.2 Parâmetros geotécnicos

Além dos parâmetros do tirante, são necessários definir alguns parâmetros e características do solo pois influenciam diretamente nas tensões exercidas sobre a contenção. O dimensionamento da contenção depende diretamente destes parâmetros que podem ser visualizados na tabela 6 abaixo e que foram calculados por Gondim (2018):

Tabela 6- Parâmetros do solo.

	<b>Camada</b>	<b>Faixa de Ocorrência</b> [m]	<b>N<sub>SPT</sub></b> <b>médio</b>	<b>γ</b> [kN/m <sup>3</sup> ]	<b>c</b> [kN/m <sup>2</sup> ]	<b>φ</b> [°]	<b>E</b> [MPa]	<b>v</b>
1	<b>Argila arenosa</b>	0 – 2	3	16	15	22,7	6,3	0,2
2	<b>Areia argilosa</b>	2 – 5	5	18	5	25,0	8,25	0,3
3	<b>Silte areno argiloso</b>	5 – 8	7	18	15	26,8	15,75	0,4
4	<b>Silte argiloso</b>	8 – 11	13	19	20	31,1	16,25	0,4

Fonte: Gondim (2018)

À partir dos dados que constam na tabela, é possível calcular os valores de resistência do conjunto solo-bulbo. De acordo com a equação 2, calculou-se a resistência de aderência para cada camada de solo. Utilizou-se um fator de segurança FS= 2,0 e calculou-se tensão admissível e resistência de aderência unitária. Os valores podem ser visualizados na tabela 7 abaixo:

Tabela 7- Valores de resistência da interface solo-bulbo.

	<b>Camada</b>	<b><math>q_s</math> [kPa]</b>	<b><math>q_{s, adm}</math> [kPa]</b>	<b><math>t</math> [kN/m]</b>
1	<b>Argila arenosa</b>	132,9	66,45	20,9
2	<b>Areia argilosa</b>	163,6	81,80	25,7
3	<b>Silte areno argiloso</b>	183,8	91,90	28,9
4	<b>Silte argiloso</b>	220,9	110,45	34,7

Fonte: Autor (2018)

Além das tensões devido ao empuxo do solo, adicionou-se uma carga distribuída de 20kPa de acordo com as recomendações da norma vigente NBR 11682:2009.

#### **5.4 Deslocamentos horizontais**

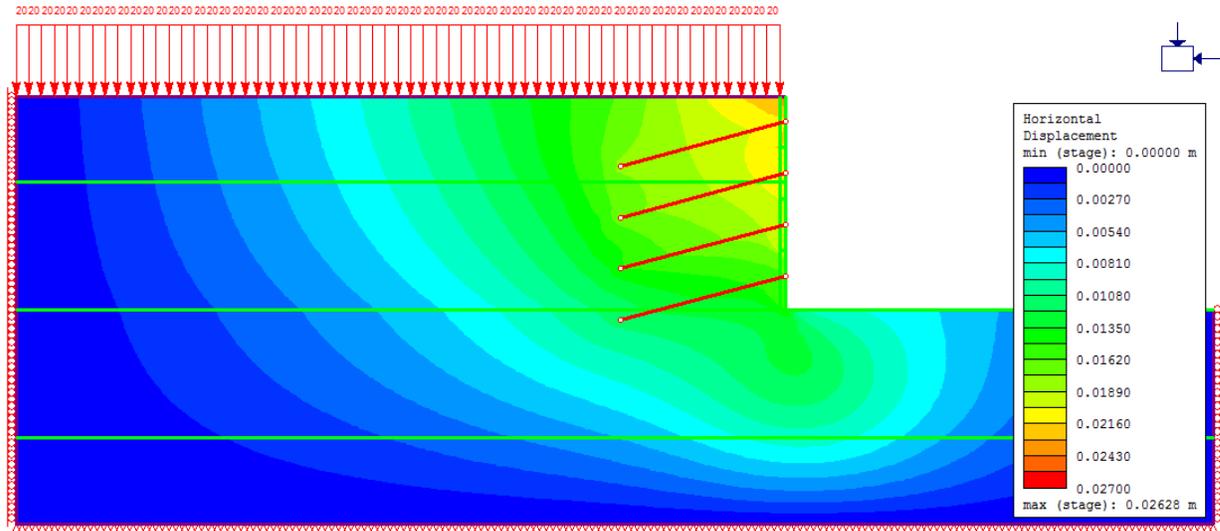
A estrutura a ser estudada já foi dimensionada previamente e atendeu todos os critérios normativos e de segurança. Portanto, iniciou-se os estudos pela parte dos deslocamentos, ou seja, verificou-se os deslocamentos para os 4 casos em estudo. Após verificados os deslocamentos e escolhida a melhor opção, verificou-se o fator de segurança para ver se atendia o de projeto. Deste modo, explica-se a realização cronológica de ordem inversa do dimensionamento da estrutura.

Todos os deslocamentos foram calculados utilizando o software RS<sup>2</sup> da RockScience.

##### **5.4.1 Caso 1**

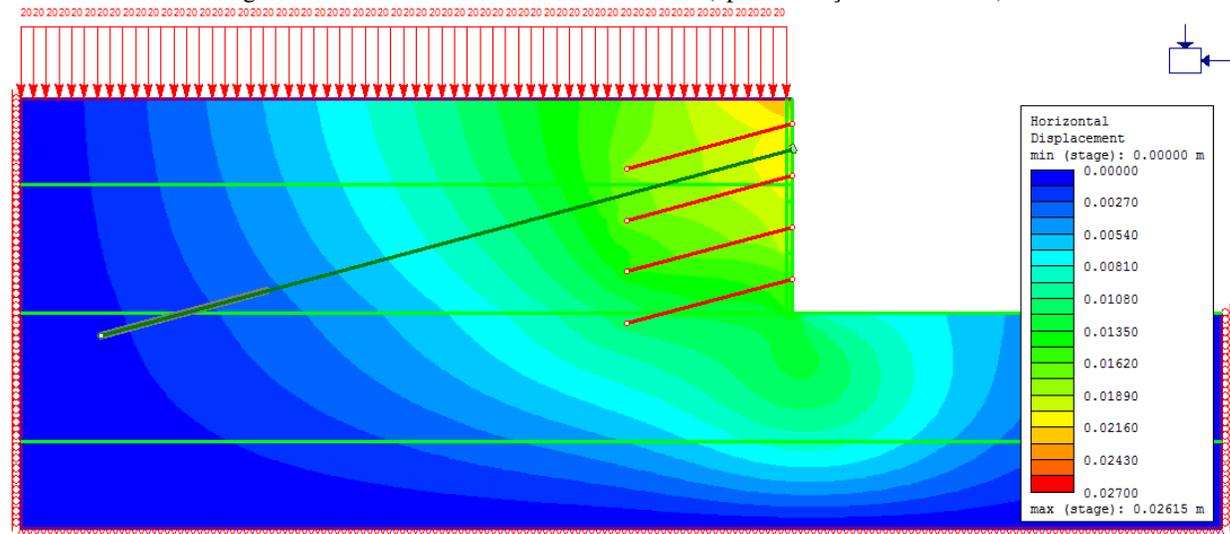
A estrutura de contenção está pronta. Após apresentar os devidos deslocamentos, adicionou-se uma linha de tirantes para tentar reduzi-los. O resultado dos deslocamentos pode ser visualizado nas figuras 20 e 21 abaixo:

Figura 20- Deslocamentos horizontais antes da execução dos tirantes.



Fonte: Autor (2018)

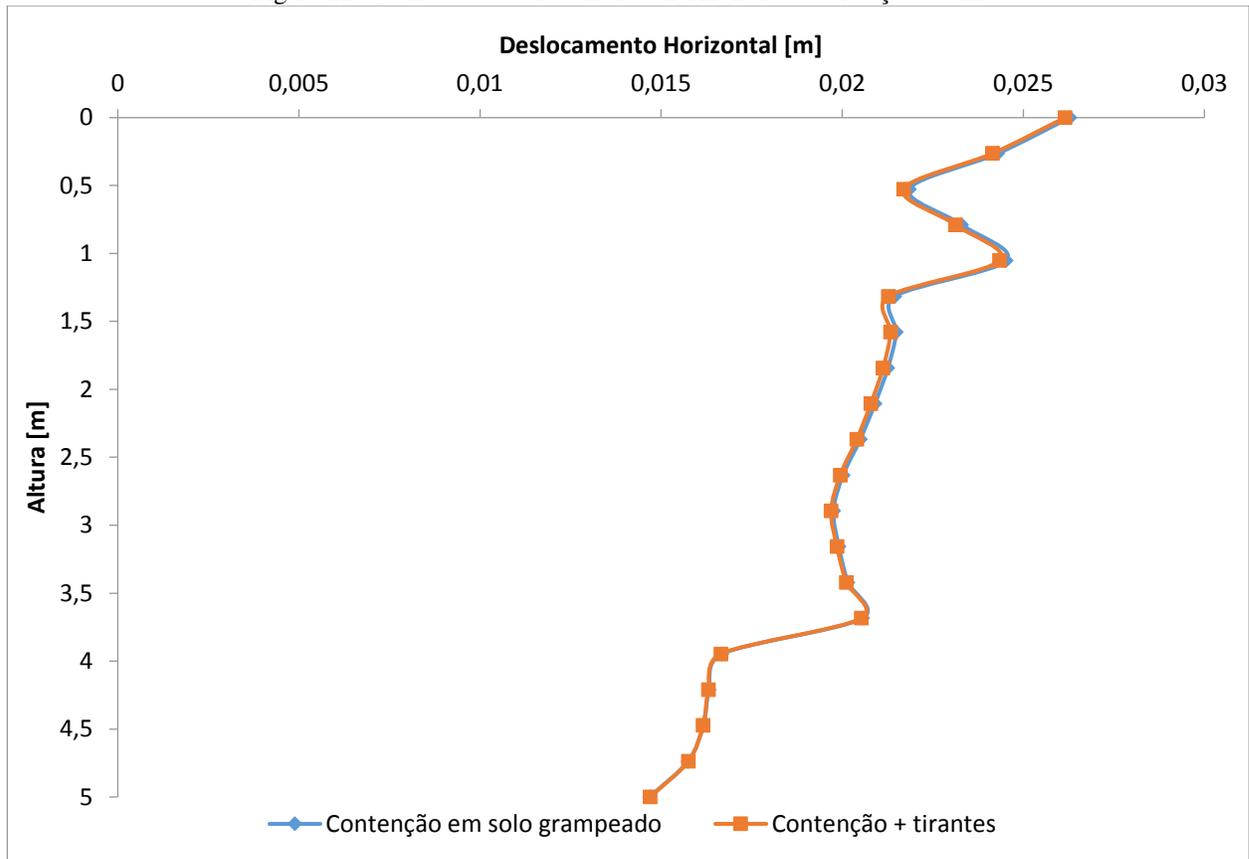
Figura 21- Deslocamentos horizontais caso 1 (após execução dos tirantes).



Fonte: Autor (2018)

Traçou-se um gráfico com os deslocamentos de ambas as situações. O resultado pode ser visualizado no gráfico abaixo (figura 22):

Figura 22- Gráfico dos deslocamentos horizontais das situações acima.



Fonte: Autor (2018)

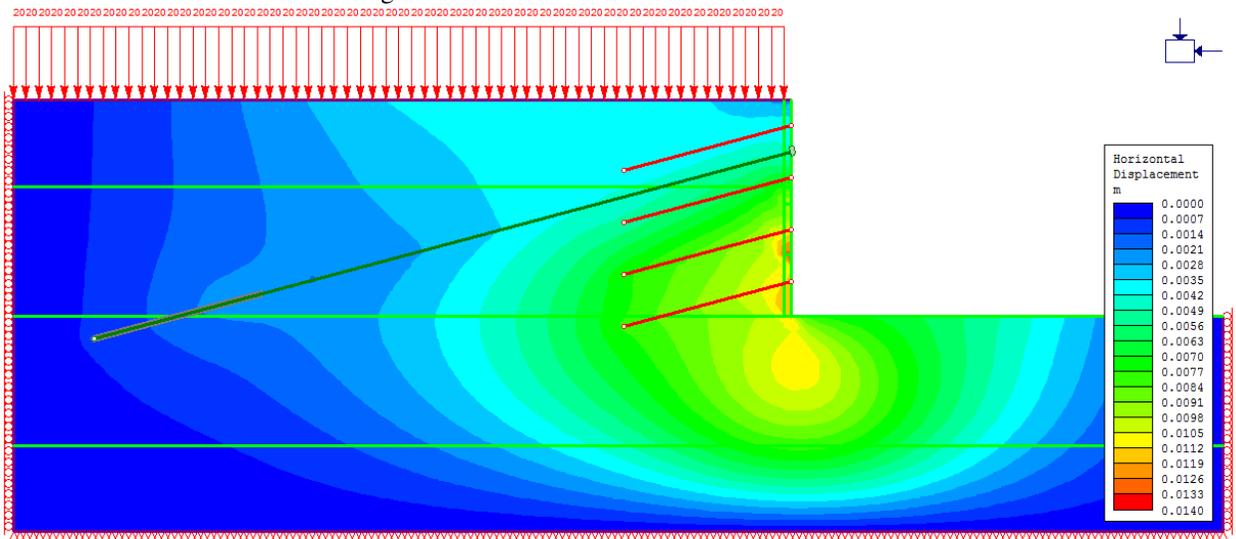
A figura anterior mostra claramente que não houve redução significativa dos deslocamentos após a execução dos tirantes. Ou seja, eles não reduzem os deslocamentos, eles apenas ajudam a conter para que eles não aumentem. Logo, para o propósito do trabalho, esta opção está descartada por apenas gerar custos adicionais e não ser eficaz na solução. A solução em questão apenas seria recomendada caso a contenção em solo grampeado estivesse sofrendo um deslocamento e estivesse sob risco de tombamento. Para este propósito, a inserção dos tirantes seria adequada, pois reduziria o risco de queda (tombamento).

As próximas análises foram feitas considerando a execução dos tirantes juntamente com a execução dos grampos, caracterizando como uma estrutura mista.

### 5.4.2 Caso 2

No caso 2 os tirantes são executados juntamente com os grampos. A linha de tirantes será introduzida no mesmo lugar em que foi introduzida no caso 1, como um reforço, entre as duas primeiras linhas de grampos e a 1.20m do topo da contenção. Os deslocamentos apresentados no final de todas as etapas podem ser visualizados na figura 23 a seguir.

Figura 23- Deslocamentos horizontais do caso 2.

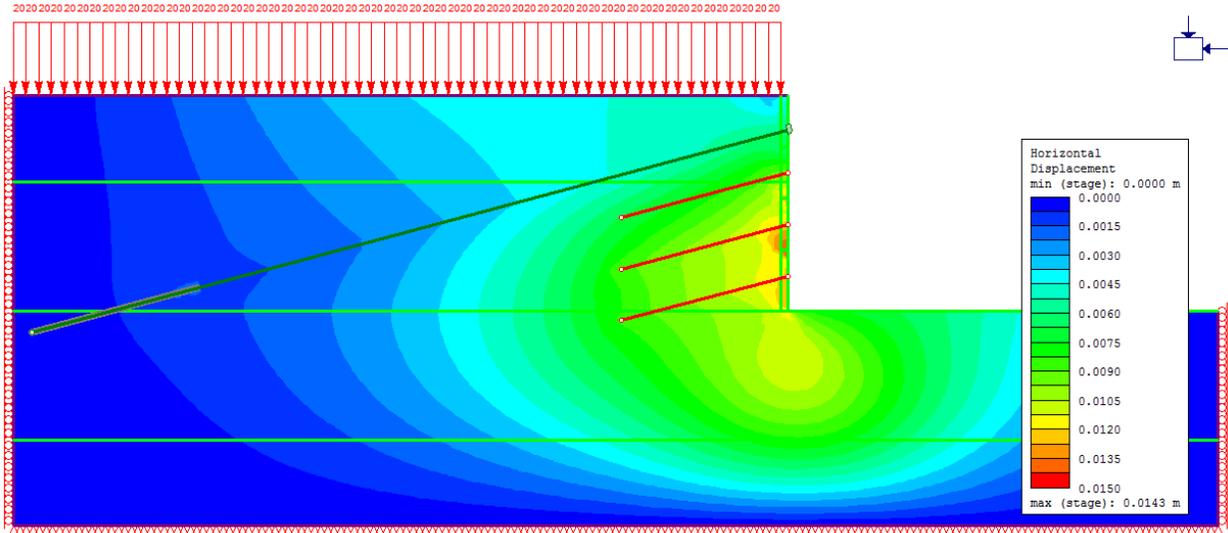


Fonte: Autor (2018)

### 5.4.3 Caso 3

Na situação 3 os tirantes substituíram a primeira linha de grampos, ou seja, os tirantes foram instalados a 0,80m do topo da contenção. A estrutura passou a contar com 1 linha de tirantes e 3 linhas de grampos como pode-se visualizar na figura 24 abaixo:

Figura 24- Deslocamentos horizontais no caso 3.

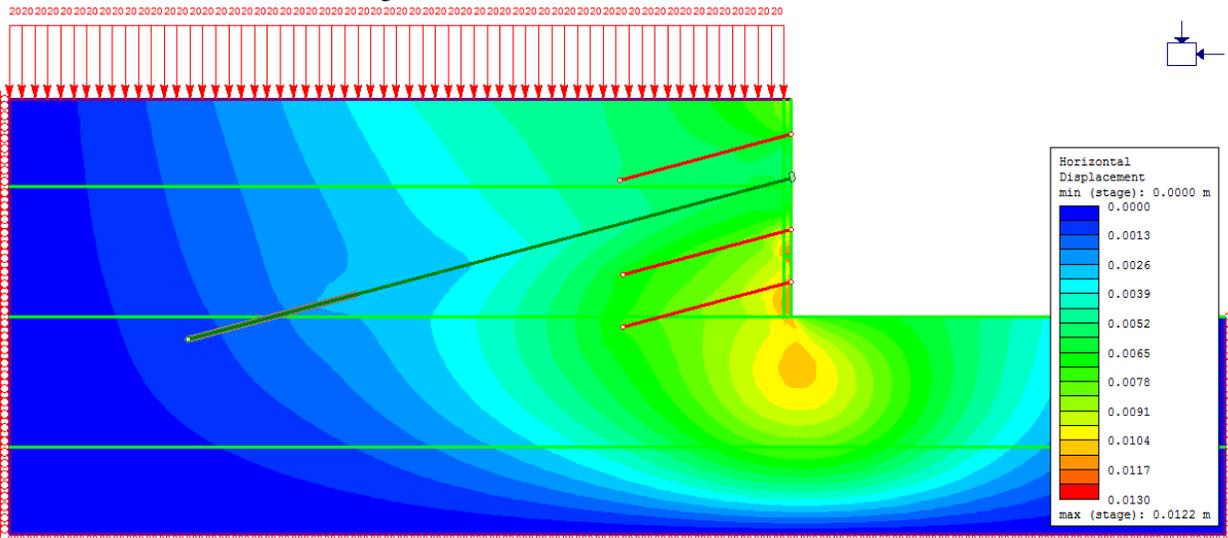


Fonte: Autor (2018)

#### 5.4.3 Caso 4

A situação 4 foi a última analisada, onde a linha de tirantes substituiu a segunda linha de grampos. Ou seja, os tirantes foram executados a 1,80m do topo da estrutura. Assim como no caso 2, a estrutura conta com 3 linhas de grampo e 1 linha de tirantes, como pode-se visualizar na figura 25.

Figura 25- Deslocamentos horizontais no caso 4.

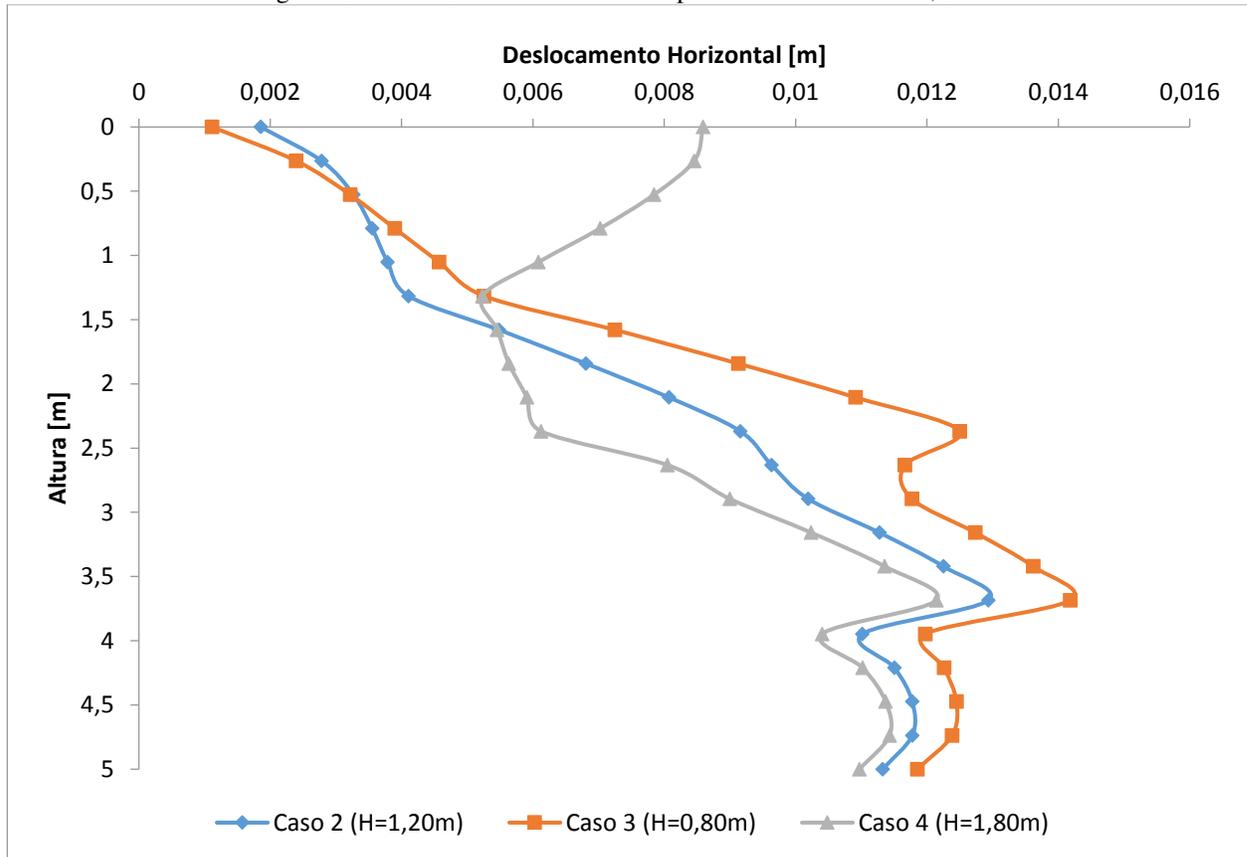


Fonte: Autor (2018)

#### 5.4.4 Análise dos deslocamentos

Após simulação dos 4 casos previstos, traçou-se um gráfico (figura 26) mostrando o deslocamento horizontal vs altura da contenção, onde a origem (altura igual a 0) refere-se ao topo da contenção.

Figura 26- Deslocamentos horizontais apresentados nos casos 2, 3 e 4.



Fonte: Autor (2018)

Analisando-se o gráfico acima observa-se que todos os casos apresentaram resultados satisfatórios. Todos os casos apresentaram reduções de no mínimo 30% dos maiores deslocamentos apresentados na contenção em solo grampeado. Porém, um engenheiro não deve pensar apenas no resultado, mas também em todo o processo e custos envolvidos. Portanto, comparou-se e analisou-se caso a caso até definir a escolha da melhor opção.

O caso 2 apresentou resultados intermediários entre os 3 casos. Porém, este caso refere-se a introdução de uma linha de tirantes entre duas linhas de grampo, não substituindo nenhuma existente. Portanto, tornando-se, apesar de eficaz, uma solução muito onerosa. Por este motivo, esta opção foi descartada.

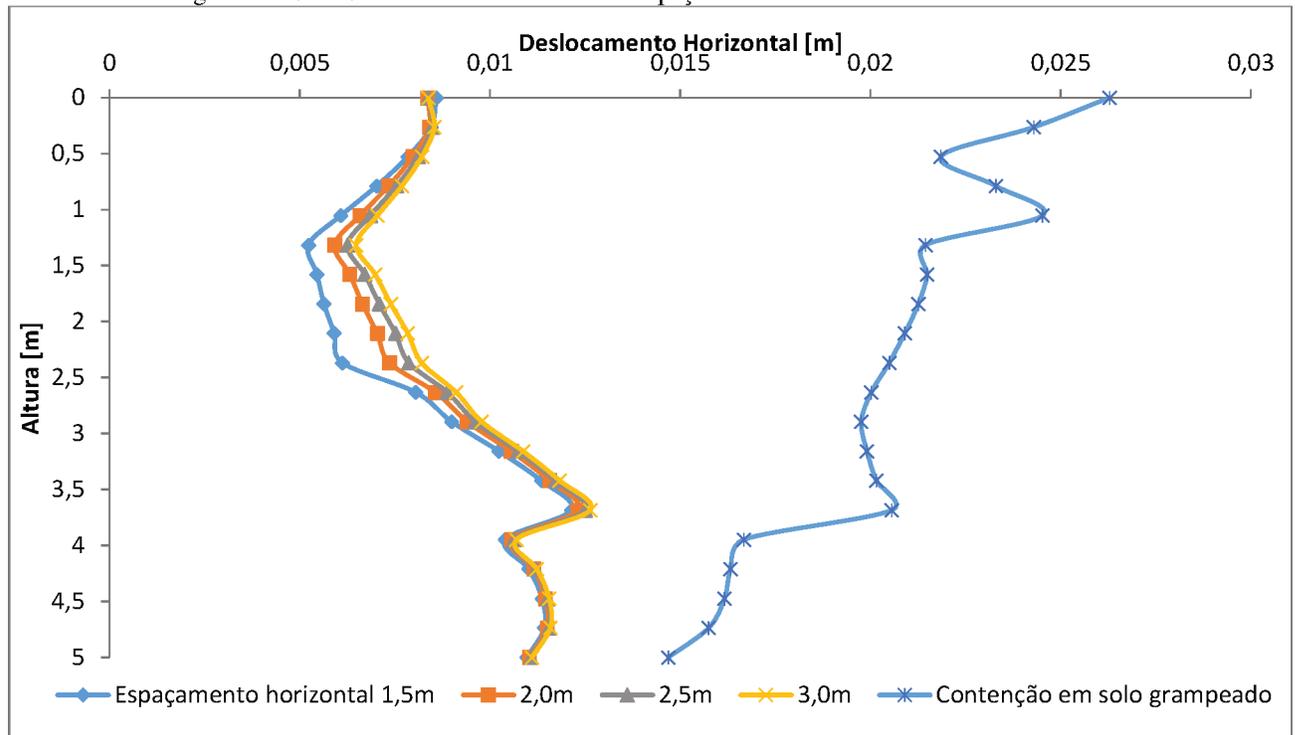
O caso 3 apresentou os piores resultados globais entre todos os casos. Esta opção que substitui a primeira linha de grampos por tirantes apresentou os maiores deslocamentos entre todos. Portanto, apesar de atender a solicitação do problema (redução de deslocamentos), ela não é a mais eficaz.

O caso 4 apresentou os melhores resultados globais entre todos os casos. Apesar de apresentar o maior deslocamento no topo da contenção, este ainda atende as recomendações feitas sobre deslocamentos máximos. Além disso, este caso substitui uma linha de grampos, o que além de atender o intuito de projeto, torna o projeto mais benéfico economicamente do que o caso 2. Este caso apresenta também os menores tirantes, pois é o caso em que eles se situam mais distantes do topo. Se comparado com o caso 3, apresenta deslocamentos menores, caracterizando-se então como a melhor opção de escolha.

#### 5.4.4 Otimização do caso escolhido

Conforme mencionado anteriormente, o estudo de todos os casos foi realizado considerando o “*out of plane*” de 1,5m. Após feita a escolha, simulou-se o caso escolhido variando o *out of plane*, ou seja, analisou-se o caso 4 variando o espaçamento horizontal (figura 27) entre os tirantes com o propósito de analisar quão maiores seriam os deslocamentos.

Figura 27- Caso 3 simulado com diferentes espaçamentos horizontais entre os tirantes.



Fonte: Autor (2018)

Analisando-se o gráfico vê-se que ocorre um aumento dos deslocamentos a medida que se aumenta o espaçamento horizontal entre os tirantes. Porém, todas estas opções ainda apresentam um resultado muito melhor do que a situação inicial (contenção sem tirantes). Portanto, dependendo do máximo deslocamento permitido (análise feita pré-projeto, observando edificações ao redor e afins), pode-se otimizar os custos mantendo a segurança como poderá ser observado a seguir.

### 5.5 Deslocamentos admissíveis

Não existe regulamentação brasileira para a definição de deslocamentos admissíveis que uma estrutura pode absorver sem ser prejudicada ou condenada. Fato este que torna uma tarefa difícil quando se precisa deste parâmetro. Assim, os autores recomendam o uso do Eurocode 7 (2004), que indica uma ordem de grandeza dos movimentos necessários para o desenvolvimento de um estado de equilíbrio limite ativo em um terreno não coesivo medianamente denso. Os movimentos de rotação em torno do pé são limitados a  $0,005H$ , sendo  $H$  a altura escavada. A Equação 2, determina o deslocamento admissível para deslocamento no topo.

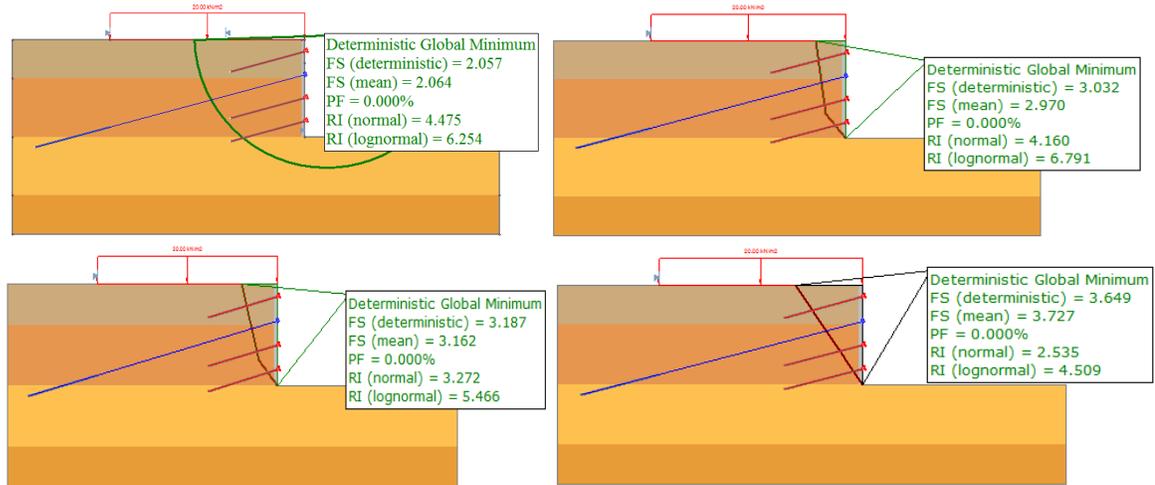
$$\delta_{adm} = 0,005 \cdot H \quad \text{Equação 2}$$

### 5.6 Estabilidade local e global

Conforme anteriormente mencionado, o foco do trabalho se resume na adição de tirantes para diminuição dos deslocamentos. A estrutura já estava dimensionada e com a estabilidade de acordo com a norma e fator de segurança adequado. Portanto, a substituição do elemento estrutural da contenção (grampos por tirantes) não causaria a diminuição deste fator. Porém, após feita a escolha do melhor caso, com a utilização do software Slide 7.0 da RockScience, verificou-se o fator de segurança (figura 28) para 4 situações:

A figura mostra claramente que em todas as quatro situações de análise os fatores de segurança atenderam as recomendações ( $FS > 1,5$ ). Além disso apresentaram fatores de segurança maior do que a situação inicial. Portanto, atendido este fator, nada impede que a solução em estrutura mista seja executada.

Figura 28- Fatores de segurança para o caso 3.

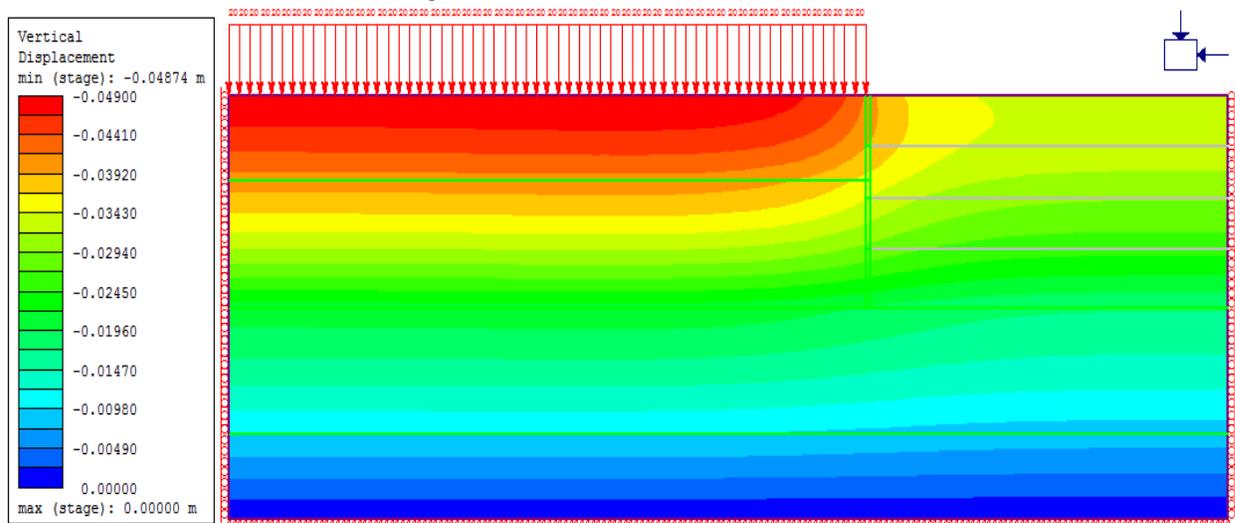


Fonte: Autor (2018)

## 5.7 Deslocamentos verticais

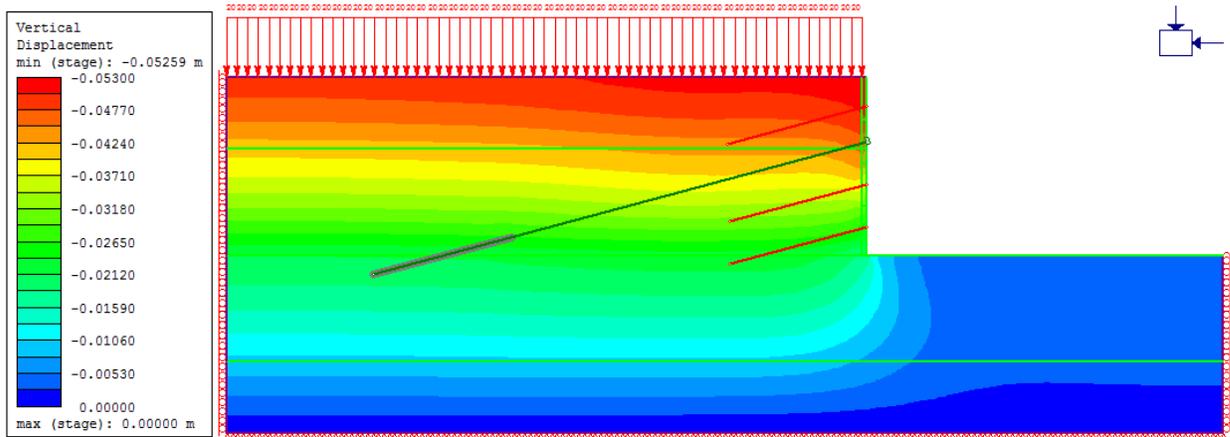
Foram analisados também os deslocamentos verticais apresentados no talude (figura 29). É importante salientar que o valor real dos deslocamentos verticais se deve após a redução do valor inicial do deslocamento, antes do início das escavações. Ou seja, deve-se pegar o resultado final e subtrair o resultado inicial (sem escavação) para obter o número real. Realizando esta operação obtém-se o valor de 3,85mm.

Figura 29- Deslocamento vertical inicial.



Fonte: Autor (2018)

Figura 30- Deslocamento vertical final.

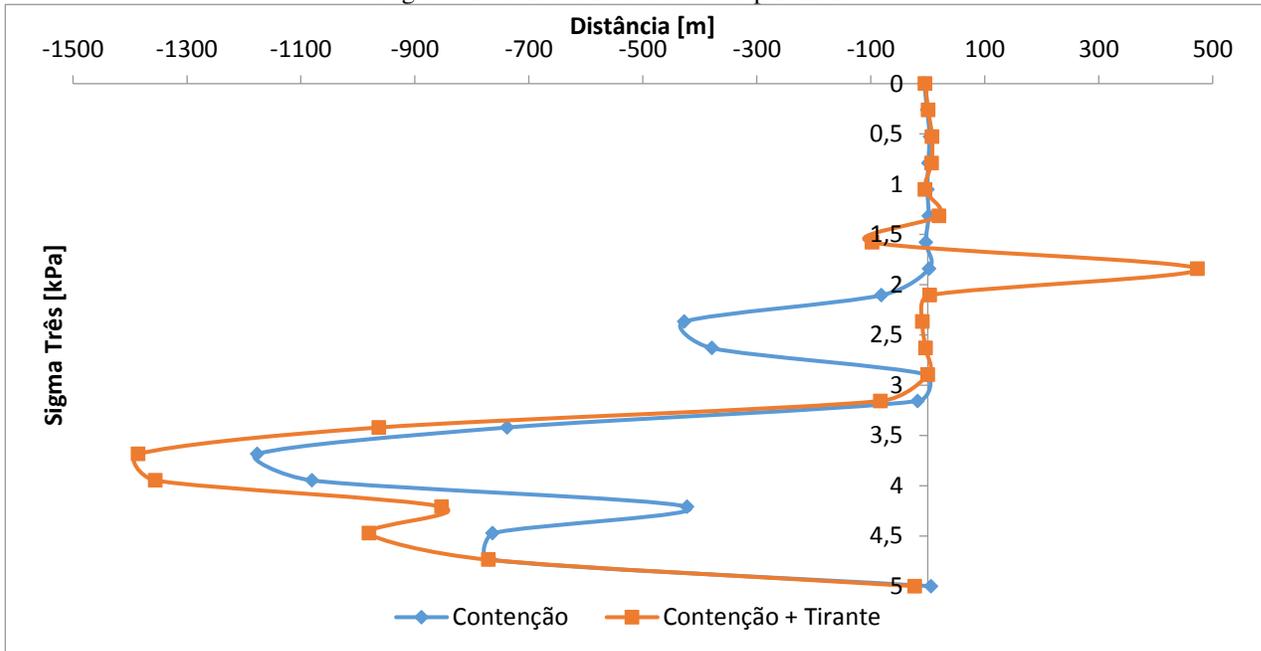


Fonte: Autor (2018)

### 5.8 Tensão sigma 3

A tensão sigma 3 refere-se a tensão atuante na estrutura de paramento, ou seja, na estrutura de concreto projetado que existe na face do talude. Pode-se visualizar estas tensões na figura 31:

Figura 31- Tensões na estrutura de paramento.



Fonte: Autor (2018)

Nota-se que as tensões aumentam em baixa escala. Somente na região onde foram instalados os tirantes houve uma elevação brusca da tensão atuante. Portanto, deve haver um reforço estrutural

nesta região para que não ocorra puncionamento da estrutura de paramento e a contenção venha a falha.

## **CONCLUSÃO**

O objetivo principal deste trabalho foi analisar o comportamento da estrutura de contenção em solo grampeado ao se introduzir tirantes nela. O propósito era verificar se a introdução de estruturas ativas iria proporcionar uma redução dos deslocamentos na estrutura.

Após realizado dimensionamento e feita análise numérica, concluiu-se que a proposta atende o propósito inicial. A introdução de tirantes em diferentes posições promove a redução do deslocamento horizontal. Assim como, constatou que existe uma posição/local que o tirante apresentou melhor eficácia ao desempenhar a função de redutor/limitador do deslocamento, aumentando a segurança contra a danificação das edificações ao redor. Além disso, a introdução dos tirantes aumenta ainda mais o fator de segurança da contenção, diminuindo ainda mais a possibilidade de ruína (ainda que esta já era considerada pouco significativa).

Deve-se atentar para a verificação do local onde os tirantes serão instalados. Apesar de todos os 3 casos atenderem o princípio de diminuir os deslocamentos, alguns deles são muito onerosos e não funcionam muito bem em conjunto com os grampos. Portanto, este é um ponto de atenção a ser verificado na elaboração do projeto.

A realização deste trabalho mostra a importância da análise numérica em projetos de engenharia e também a importância do engenheiro na análise dos resultados e na proposição de mudanças e estudos para o melhoramento contínuo de projetos. O propósito inicial foi atendido garantindo mais segurança para as edificações vizinhas e para a própria estrutura em si.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682:2009 - Estabilidade de encostas**, 2009.
- BYRNE, R. J. et. al. **Manual for design and construction monitoring of soil nail wall. Report No. FHWA-SA-96-069R**. Washington, 1998.
- CLOUTERRE, 1991, **Recomendations Clouterre – Soil Nailing Recommendations for Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing** (English Translation), Scientific Committee of the French National Project Clouterre, ENPC, Paris, France.
- ENGESOL, ENGENHARIA DE SOLOS LTDA. **Fundações e Contensões - 21 anos de história, confiança e eficiência**. Goiânia/GO, 110p, 2014.
- EUROCODE 7 - Geotechnical Design - part 1. General Rules**. Bruxelas: [s.n.].
- FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO. **Manual técnico de encostas: ancoragens e grampos**. 2ed. Rio de Janeiro, 2000. V. 4.
- GÄSSLER, G., 1997, “**Design of reinforced excavations and natural slopes using new European Codes**”, Earth Reinforcement, Vol. 2,
- GEORIO, 1999 - **Manual Técnico de Encostas**. v.4, Fundação Instituto de Geotécnica. Rio de Janeiro, 1999.
- GONDIM, A. **Dimensionamento geotécnico de solo grampeado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- MITCHELL, J.K.; VILLET, W.C.B. (1987). **Reinforcement of earth slopes and embankments**. National Cooperative Highway Research Program Report.
- ORTIGÃO, J. A. R.; SAYAO, A. S. **Handbook of Slope Stabilisation**. Nova York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2004.
- ORTIGÃO, J. A. R.; ZIRLIS, A. C.; PALMEIRA, E. M. **Experiência com solo grampeado no Brasil-1970-1993**. Solos e rochas, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 291–304, 1993.

PUC RIO. **Métodos de Cálculo**, 2012. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26066/26066\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/26066/26066_4.PDF). Acesso em: 10 junho 2018.

SARE, A. R. **Comportamento de escavações grampeadas instrumentadas em solo residual. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)** – Departamento de Engenharia Civil. Pontífica Universidade Católica, Rio de Janeiro.

SOLOTRAT (2010) – **Manual de serviços geotécnicos**. 4 Edição.

TEIXEIRA, I. J. R, **Estudo comparativo de duas alternativas para contenção de taludes verticais: solo grampeado e cortina atirantada**. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil - Universidade Federal de Feira de Santana (Departamento de Tecnologia), Feira de Santana/BA, 2011.

VELLOSO, D. A., LOPES F. R. **Fundações** – Volume Completo. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

YASSUDA, C. T.; DIAS, P. H. V. 1998, “**Fundações Teoria e Prática, Capítulo 17 – Tirantes**”, Editora Pini, 2ª edição, pp. 603 a 640.

ZIRLIS, A. C., 1998, “**Fundações Teoria e Prática, Capítulo 18 – Reforço do Terreno – Solo Grampeado**”, Editora Pini, 2ª edição, pp. 641 a 642 e 656 a 668.

ZIRLIS, A.C., PITTA, C.A.; SOUZA, G. J. T., OLIVEIRA, M. (1992) **Soil nailing: Chumbamento de solos, experiência de uma equipe na aplicação do método**, Cobrae - Congresso Brasileiro de Encostas, ABMS Associação Brasileira de Mecânica de Solos, vol. I, Rio De Janeiro,

ANEXO A – Tabela para dimensionamento de tirantes permanentes.

Carga de trabalho (kN)	CARACTERÍSTICAS DO AÇO									
	TIPO	Fornecedor	Bilota	Seção (mm <sup>2</sup> )	Peso (Kg/m)	Ecoamento		Ruhra		
						Carga (kN)	Tensão (kg/mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Tensão (kg/mm <sup>2</sup> )	
29	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 12mm	113,0	0,89	56	51	62	56	
40	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 14mm	154,0	1,21	77	51	85	56	
52	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 16mm	201,0	1,58	100	51	110	56	
53	Barra	THREADBOLT - THB 16	1 ø 16mm	196,0	1,60	104	52,7	138	70,3	
61	Barra	ROCSOLO 5/8"	1 ø 5/8"	160,5	1,27	120	75	133	83	
81	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 20mm	314,0	2,47	157	51	173	56	
82	Barra	DYWIDAG ST 90/110	1 ø 15mm	177,0	1,41	159	92	195	112	
88	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 18mm	254,0	2,00	170	68	203	82	
90	Barra	ROCSOLO 3/4"	1 ø 3/4"	234,9	1,85	176	75	195	83	
100	Barra	CA50	1 ø 7/8"	388,0	2,98	194	50	213	55	
102	Barra	THREADBOLT - THB 19	1 ø 19mm	283,0	2,14	199	70,3	228	80,5	
124	Barra	DYWIDAG ST 95/105	1 ø 18mm	254,0	1,96	241	97	267	107	
125	Barra	ROCSOLO 7/8"	1 ø 7/8"	323,6	2,55	243	75	269	83	
126	Barra	GEWID ST 50/75	1 ø 25mm	491,0	3,90	246	51	368	76	
130	Barra	CA50	1 ø 1"	506,7	3,85	253	50	279	55	
131	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 22mm	380,0	2,98	255	68	304	82	
140	Barra	TOR - 14BM	1 ø 25mm	376,0	2,96	263	70	301	80	
140	Fios	CP-150-RB	4 ø 8mm	201,2	1,58	272	135	302	150	
140	Barra	THREADBOLT - THB 22	1 ø 22mm	387,0	2,85	272	70,3	312	80,5	
158	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 28mm	616,0	4,83	308	51	339	56	
164	Barra	ROCSOLO 1"	1 ø 1"	425,7	3,34	319	75	353	83	
169	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 25mm	491,0	3,90	329	68	393	82	
170	Barra	TOR - 17BM	1 ø 27mm	474,0	3,72	332	70	379	80	
184	Barra	THREADBOLT - THB 25	1 ø 25mm	509,0	3,85	358	70,3	410	80,5	
200	Barra	INCO 220	1 ø 30mm	642,0	5,00	385	60	462	72	
206	Barra	ROCSOLO 1 1/8"	1 ø 1 1/8"	533,0	4,22	400	75	442	83	
207	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 32mm	804,0	6,31	402	51	442	56	
210	Barra	CA50	1 ø 1 1/4"	804,7	6,31	402	50	443	55	
210	Fios	CP-150-RB	6 ø 8mm	301,8	2,37	407	135	453	150	
212	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 28mm	616,0	4,83	413	68	493	82	
240	Barra	TOR - 24BM	1 ø 35mm	774,0	6,08	465	60	540	70	
244	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 30mm	707,0	5,55	474	68	566	82	
260	Barra	ROCSOLO 1 1/4"	1 ø 1 1/4"	674,0	5,30	506	75	559	83	
269	Barra	DYWIDAG ST 95/105	1 ø 26,5mm	551,0	4,48	523	97	579	107	
277	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 32mm	804,0	6,31	539	68	643	82	
280	Barra	TOR - 28BM	1 ø 35mm	774,0	6,08	542	70	619	80	
280	Fios	CP-150-RB	8 ø 8mm	402,4	3,16	543	135	604	150	
297	Barra	THREADBOLT - THB 32	1 ø 32mm	822,0	6,03	578	70,3	662	80,5	
323	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 40mm	1.257,0	9,87	628	51	691	56	
331	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 35mm	962,0	7,55	645	68	770	82	
350	Fios	CP-150-RB	10 ø 8mm	503,0	3,95	679	135	755	150	
350	Barra	INCO 350	1 ø 40mm	1.140,0	9,00	684	60	821	72	
350	Barra	TOR - 35BM	1 ø 40mm	982,0	7,71	687	70	786	80	

Carga de trabalho (kN)	CARACTERÍSTICAS DO AÇO									
	TIPO	Fornecedor	Bilota	Seção (mm <sup>2</sup> )	Peso (Kg/m)	Ecoamento		Ruhra		
						Carga (kN)	Tensão (kg/mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Tensão (kg/mm <sup>2</sup> )	
377	Barra	ROCSOLO 1 1/2"	1 ø 1 1/2"	977,6	7,67	733	75	811	83	
393	Barra	DYWIDAG ST 95/105	1 ø 32mm	804,0	6,31	764	97	844	107	
410	Fios	CP-150-RB	12 ø 8mm	603,6	4,74	815	135	905	150	
450	Barra	ROCSOLO 1 5/8"	1 ø 1 5/8"	1.124,0	8,91	843	75	933	83	
450	Barra	TOR - 45BM	1 ø 43mm	1.338,0	10,51	870	65	1.070	80	
450	Barra	INCO 450	1 ø 47mm	1.555,0	12,30	933	60	1.120	72	
497	Barra	DYWIDAG ST 95/105	1 ø 36mm	1.018,0	8,27	967	97	1.069	108	
500	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 43mm	1.452,0	11,40	973	68	1.162	82	
505	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 50mm	1.963,0	15,40	981	51	1.080	56	
510	Barra	INCO 500	1 ø 50mm	1.781,0	14,10	1.069	60	1.282	72	
514	Barra	ROCSOLO 1 3/4"	1 ø 1 3/4"	1.325,0	10,40	994	75	1.100	83	
520	Barra	TOR - 52BM	1 ø 47mm	1.552,0	12,19	1.009	65	1.241	80	
530	Cordoalha	CP-150-RB	6 ø 1/2"	592,2	4,65	1.013	171	1.125	190	
600	Barra	INCO 600	1 ø 53mm	2.027,0	16,00	1.216	60	1.459	72	
614	Barra	DYWIDAG ST 95/105	1 ø 40mm	1.257,0	10,21	1.194	97	1.320	107	
640	Barra	TOR - 64BM	1 ø 51mm	1.782,0	14,00	1.247	70	1.425	80	
668	Barra	ROCSOLO 2"	1 ø 2"	1.735,0	13,70	1.301	75	1.440	83	
676	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 50mm	1.963,0	15,40	1.315	68	1.570	82	
690	Cordoalha	CP-150-RB	8 ø 1/2"	789,6	6,20	1.350	171	1.500	190	
700	Barra	INCO 700	1 ø 57mm	2.288,0	18,10	1.373	60	1.647	72	
730	Barra	TOR - 73BM	1 ø 53mm	2.027,0	15,92	1.419	70	1.621	80	
741	Barra	GEWID ST 55/70	1 ø 57,5mm	2.597,0	20,38	1.441	57	1.818	71	
820	Barra	TOR - 82BM	1 ø 56mm	2.289,0	17,98	1.602	70	1.831	80	
848	Barra	DYWIDAG ST 95/105	1 ø 47mm	1.735,0	14,10	1.648	97	1.822	107	
851	Barra	ROCSOLO 2 1/4"	1 ø 2 1/4"	2.206,2	18,09	1.655	75	1.831	83	
870	Cordoalha	CP-150-RB	10 ø 1/2"	987,0	7,75	1.688	171	1.875	190	
895	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 57,5mm	2.597,0	20,38	1.740	68	2.078	82	
900	Barra	INCO 900	1 ø 63mm	2.858,0	22,60	1.715	60	2.058	72	
904	Barra	GEWID ST 55/70	1 ø 63,5mm	3.167,0	24,86	1.758	57	2.217	71	
920	Barra	TOR - 92BM	1 ø 60mm	2.565,0	20,15	1.796	70	2.052	80	
1.000	Barra	INCO 1000	1 ø 69mm	3.491,0	30,30	1.955	56	2.514	72	
1.030	Barra	TOR - 103BM	1 ø 63mm	2.856,0	22,43	1.999	70	2.285	80	
1.040	Cordoalha	CP-150-RB	12 ø 1/2"	1.184,0	9,30	2.025	171	2.250	190	
1.055	Barra	ROCSOLO 2 1/2"	1 ø 2 1/2"	2.734,0	21,59	2.051	75	2.269	83	
1.091	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 63,5mm	3.167,0	24,86	2.122	68	2.534	82	
1.096	Barra	DYWIDAG ST 83/103	1 ø 57mm	2.552,0	20,95	2.131	85	2.641	106	
1.136	Barra	GEWID ST 50/55	1 ø 75mm	4.418,0	34,68	2.209	51	2.430	56	
1.190	Barra	ROCSOLO 2 3/4"	1 ø 2 3/4"	3.316,0	30,05	2.321	70	2.620	79	
1.425	Barra	DYWIDAG ST 83/103	1 ø 65mm	3.318,0	27,10	2.771	85	3.434	106	
1.450	Barra	ROCSOLO 3"	1 ø 3"	4.071,5	32,14	2.850	70	3.216	79	
1.522	Barra	GEWID Plus ST 67/80	1 ø 75mm	4.418,0	34,68	2.960	68	3.534	82	
1.897	Barra	DYWIDAG ST 83/103	1 ø 75mm	4.418,0	35,90	3.689	85	4.573	106	

CARGA DE INCORPORAÇÃO:

CARGA DE INCORPORAÇÃO = 0,8 x CT (carga de trabalho)

1. As informações dos aço descritas nesta tabela são de responsabilidade dos fabricantes e deverão ser atestadas antes do uso.

2. O módulo de elasticidade do aço é de 21.000 Kg/mm<sup>2</sup>.

CARGA DE ENSAIO PARA:

RECEBIMENTO = 1,4 x CT (carga de trabalho)

QUALIFICAÇÃO = 1,75 x CT (carga de trabalho)