



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

## **DIMENSIONAMENTO DE CORTINA ATIRANTADA**

**LUCAS WESLEY DE SOUZA ARRUDA**

**POMBAL – PB**

**2023**

LUCAS WESLEY DE SOUZA ARRUDA

## DIMENSIONAMENTO DE CORTINA ATIRANTADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza

POMBAL – PB

2023

A779d Arruda, Lucas Wesley de Souza.  
Dimensionamento de cortina atirantada / Lucas Wesley de Souza  
Arruda. – Pombal, 2023.  
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em  
Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande,  
Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de  
Souza”.

Referências.

1. Estrutura de contenção. 2. Tirantes. 3. Estabilidade de talude.  
I.Souza, Leovegildo Douglas Pereira de. II. Título.

CDU 624.137(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE  
CURSO.

LUCAS WESLEY DE SOUZA ARRUDA

**DIMENSIONAMENTO DE CORTINA ATIRANTADA**

Trabalho de Conclusão de Curso do discente LUCAS WESLEY DE SOUZA ARRUDA  
**APROVADO** em 04 de dezembro de 2023 pela comissão examinadora composta  
pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de  
ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por LEOVEGILDO  
DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA:08419377457  
DN:CN=LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE  
SOUZA:08419377457, OU=UFCG - Universidade  
Federal de Campina Grande, O=ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu atesto a precisão e a integridade deste  
documento  
Localização: Pombal - PB  
Data: 2023.12.11 15:09:26-03'00'  
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.1

---

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza  
(Orientador – UFCG)

---

Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros  
(Membro Interno – UFCG)

---

Eng. Rafaela Nascimento Gomes  
(Membro Externo – Terra Sol Engenharia)

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, agradeço a Deus por me proporcionar cursar Engenharia Civil, algo que parecia distante durante o ensino médio. Graças a Ele, tive essa oportunidade em minha vida.

Aos meus pais, José e Maria Elionete, por acreditarem em mim, por todo esforço para que eu pudesse estudar fora de casa, mas com a certeza que estavam na minha torcida.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio durante minha trajetória de graduação.

A todos os professores da UFCG *campus* de Pombal com quem tive a oportunidade de aprender, em especial ao meu orientador Leovegildo, pela prontidão sempre que solicitado.

Por fim, agradeço muito a banca examinadora pela disponibilidade e contribuição com este trabalho.

## RESUMO

As estruturas de contenção de solo representam o avanço da engenharia em meio a urbanização no país. A cortina atirantada possui desempenho comprovado na área de estabilização de taludes quando se trata de vencer grandes alturas e cargas elevadas. Este estudo aborda o dimensionamento estrutural de uma cortina atirantada, empregando, para isto, as normas vigentes de concreto armado, tirantes ancorados e estabilidade de encostas, além do método de dimensionamento geotécnico desenvolvido por Costa Nunes, executado com auxílio de planilha no Excel e verificação de estabilidade através do *software* desenvolvido pela empresa *FINE Engineering*, para resolução de problemas geotécnicos, o GEO5. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica acerca dos tipos de cortinas empregadas, métodos de verificação de estabilidade e métodos de cálculo geotécnico e estrutural. A partir das forças de estabilização obtidas pelo método brasileiro de atirantamento, selecionou-se o tirante monobarra adequado, calculou-se a carga atuante na parede, e através do *software* Ftool foram obtidas as forças internas para o dimensionamento estrutural. Evidenciou-se que o projeto estrutural precisa ser devidamente calculado para atender aos critérios de protensão dos tirantes e carregamentos.

**Palavras-chave:** Estrutura de contenção. Tirantes. Estabilidade de talude.

## **ABSTRACT**

The soil containment structures represent the advancement of engineering amidst urbanization in the country. The anchored curtain has proven performance in the area of slope stabilization, particularly in overcoming significant heights and high loads. This study addresses the structural design of an anchored curtain, employing current standards for reinforced concrete, anchored tie rods, slope stability, and the geotechnical design method developed by Costa Nunes. The calculations were carried out using an Excel spreadsheet and stability verification through the software developed by FINE Engineering, specifically the GEO5, for solving geotechnical problems. Initially, a literature review is conducted on the types of curtains used, stability verification methods, and geotechnical and structural calculation methods. Based on the stabilization forces obtained through the Brazilian anchoring method, an appropriate single-bar tie rod was selected. The acting load on the wall was calculated, and internal forces for structural design were obtained using the Ftool software. It became evident that the structural design needs to be accurately calculated to meet the criteria for tie rod prestressing and loading requirements.

**Keywords:** Retaining structure. Straps. Slope stability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ruptura por escorregamento, $FS = 1$ .....	15
Figura 2 - Método sueco ou fatias .....	17
Figura 3 - Lamela de Bishop .....	18
Figura 4 - Tipo de deslocamento da cortina em balanço .....	20
Figura 5 - Cortina com um nível de apoio.....	21
Figura 6 - Armação de cortina moldada <i>in loco</i> .....	22
Figura 7 - Concretagem / acabamento da cortina .....	22
Figura 8 - Seção típica de uma cortina atirantada .....	23
Figura 9 - Diagramas de empuxo aparente .....	24
Figura 10 - Características do tirante .....	26
Figura 11 - Placa de ancoragem e cunha de grau .....	27
Figura 12 - Correlações empíricas para a resistência ao cisalhamento por unidade de comprimento em argilas / siltes .....	29
Figura 13 - Faixas de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos .....	32
Figura 14 - Perímetros críticos de pilares no interior da laje .....	36
Figura 15 - Tipos de ruptura em cortina atirantada .....	38
Figura 16 - Plano de ruptura considerado pelo Método Brasileiro (A), Diagrama de esforços (B) .....	39
Figura 17 - Polígono das forças de ancoragem.....	41
Figura 18 - Sequência de trabalho .....	44
Figura 19 - Talude em corte .....	45
Figura 20 - Cortina para talude genérico .....	46
Figura 21 - Arranjo dos tirantes e geometria .....	51
Figura 22 - Adequação dos tirantes e geometria .....	52
Figura 23 - Estrutura sem tirantes .....	53
Figura 24 - Estrutura com tirantes .....	53
Figura 25 - Carregamento e diagrama de momento fletor da viga horizontal .....	62
Figura 26 - Carregamento e diagrama de momento fletor da viga vertical .....	62



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos.....	16
Quadro 2 - Orientações para anteprojeto .....	24
Quadro 3 - Coeficiente K em função do tipo de solo .....	30
Quadro 4 - Comprimentos do bulbo de ancoragem.....	30
Quadro 5 - Configurações de análise.....	48
Quadro 6 - Detalhe das ancoragens .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo devido à injeção .....	28
Tabela 2 - Dados geotécnicos .....	49
Tabela 3 - Memória de cálculo geotécnico .....	49
Tabela 4 - Verificação da estabilidade externa .....	53
Tabela 5 - Carregamento atuante .....	54
Tabela 6 - Dados para o dimensionamento .....	54
Tabela 7 - Momentos máximos .....	54
Tabela 8 - Distribuição por faixas .....	55
Tabela 9 - Dimensionamento das armaduras .....	55
Tabela 10 - Efeito da punção.....	56
Tabela 11 - Tirantes monobarra incotep .....	64

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>14</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
2.1	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES .....	16
2.1.1	<b>Método de equilíbrio limite</b> .....	<b>16</b>
2.1.2	<b>Método de Bishop Simplificado</b> .....	<b>17</b>
2.2	ANÁLISE GEOTÉCNICA.....	19
2.3	CORTINAS DE CONTENÇÃO.....	19
2.3.1	<b>Cortina em balanço</b> .....	<b>19</b>
2.3.2	<b>Cortinas com um nível de apoio</b> .....	<b>20</b>
2.3.3	<b>Cortinas rígidas e flexíveis</b> .....	<b>21</b>
2.3.4	<b>Cortina atirantada</b> .....	<b>22</b>
2.4	EMPUXO EM CORTINA ATIRANTADA .....	23
2.5	TIRANTES.....	25
2.5.1	<b>Dimensionamento dos tirantes</b> .....	<b>25</b>
2.5.2	<b>Cabeça do tirante</b> .....	<b>26</b>
2.5.3	<b>Comprimento do trecho livre</b> .....	<b>27</b>
2.5.4	<b>Bulbo de Ancoragem</b> .....	<b>27</b>
2.5.5	<b>Espaçamento entre os tirantes</b> .....	<b>30</b>
2.5.6	<b>Protensão dos tirantes</b> .....	<b>30</b>
2.6	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DA CORTINA ATIRANTADA.....	31
2.6.1	<b>Definição dos carregamentos</b> .....	<b>33</b>
2.6.2	<b>Dimensionamento da armadura de flexão</b> .....	<b>34</b>
2.6.3	<b>Detalhamento das armaduras</b> .....	<b>35</b>
2.7	VERIFICAÇÃO À PUNÇÃO.....	35
2.8	ESTABILIDADE DAS CORTINAS ATIRANTADAS.....	37
2.8.1	<b>Método Brasileiro</b> .....	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>

3.1	CRITÉRIOS DE PROJETO .....	44
3.2	ANÁLISE PELO MÉTODO BRASILEIRO .....	46
3.3	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL SIMPLIFICADO.....	47
3.4	<i>SOFTWARE</i> GEO5 .....	47
<b>3.4.1</b>	<b>Configurações e método de análise.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Verificação de estabilidade .....</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
4.1	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO.....	49
4.1.1	Dimensionamento do bulbo de ancoragem.....	50
4.1.2	Análise de estabilidade no GEO5.....	52
4.1.3	Dimensionamento estrutural processo simplificado .....	54
4.1.4	Verificação do efeito de punção .....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE A - DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO MÉTODO BRASILEIRO</b>	
	<b>61</b>	
	<b>APÊNDICE B - DIAGRAMAS DE MOMENTO FLETOR .....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE C - DETALHAMENTO DA ARMADURA .....</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO A - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS TIRANTES</b>	
	<b>MONOBARRAS .....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção estão presentes em diversas obras de engenharia desempenhando papel fundamental na estabilização de terrenos naturais, cortes, aterros, escavações de subsolos em meio urbano e grandes projetos de infraestrutura.

A cortina atirantada é um sistema de contenção utilizado em obras civis que contribui para segurança e viabilidade de diversos projetos. É definida por Gerscovich, Danziger e Saramago, (2019), como uma estrutura de contenção que possui uma parede de concreto armado e tirantes ancorados no terreno a uma profundidade estável, para impossibilitar ruptura e movimentações indesejáveis.

Com a crescente extensão territorial urbana nos grandes centros, a necessidade de ocupar regiões montanhosas suscetíveis a escorregamentos torna necessário a implantação de obras de contenção, assim como escavações de subsolo para melhor aproveitamento dos terrenos. Sem essas estruturas, muitos projetos seriam inviabilizados (Alves, 2014).

Para garantir a segurança dessas obras, é fundamental que sejam construídas estruturas de contenção adequadas e otimizadas, uma vez que a contenção é uma das primeiras etapas da obra e deve garantir a integridade da estrutura ao qual foi projetada, cabendo ao engenheiro responsável estudar e optar pela alternativa mais viável (Prinz *et al.*, 2020).

Em meio urbano, onde o espaço para construção é limitado, os taludes são cada vez mais verticais, conseqüentemente, exige-se uso de contenções adequadas de alta capacidade de carga (Prado, 2008 *apud* Oliveira, 2018).

“O método de construção de cortinas atirantadas consiste em inserir um elemento de reforço, neste caso os tirantes, em furos pré-realizados no maciço e fixá-los em uma parede de concreto armado” (Fagundes, 2019).

“O dimensionamento para esse tipo de estrutura depende diretamente das propriedades geológicas do maciço e a relação com conceitos de concreto armado e protensão” (Ferreira, 2021).

Neste trabalho será apresentado o dimensionamento estrutural de uma cortina atirantada pelo processo simplificado, que considera a estrutura de concreto armado como uma laje. Aplicou-se o método brasileiro de atirantamento para obtenção das forças nos tirantes, e o *software* geotécnico GEO5 (versão demo) para verificação da

estabilidade global usando o método de Bishop simplificado, contudo, dando ênfase para o dimensionamento estrutural do paramento.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de garantir a segurança e estabilidade de áreas onde existe o risco de deslizamentos de terra, como em encostas, escavações de subsolos, faz-se necessário ampliar conhecimentos e alternativas na área de contenções de solo.

A principal relevância das cortinas atirantadas é a capacidade de oferecer uma solução eficiente para estabilização de massas de solo. Essas estruturas são submetidas a cargas consideráveis, necessitando, portanto, de um dimensionamento estrutural compatível. Por essa razão, é importante realizar estudos para aprimorar os conhecimentos sobre esse tipo de contenção e seu dimensionamento.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Realizar o dimensionamento geotécnico e estrutural de uma estrutura de contenção do tipo cortina atirantada, seleção de materiais e análise de estabilidade da construção.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionamento dos tirantes pelo método brasileiro de atirantamento;
- Dimensionamento estrutural do painel da cortina atirantada;
- Verificação do efeito de punção;
- Análise de estabilidade pelo método de Bishop simplificado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Talude é definido por Das e Sobhan, (2014), como uma superfície de solo exposta, formando um ângulo com o plano horizontal que pode ser natural, denominado de encosta, ou construído pelo homem, por exemplo, cortes e aterros.

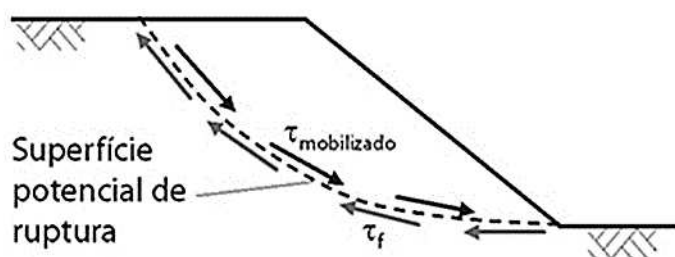
Quando as tensões cisalhantes mobilizadas ( $\tau_{mob}$ ) se igualam à resistência ao cisalhamento ( $\tau_f$ ), é deflagrada a instabilidade do talude, condição em que o fator de segurança ( $FS$ ) é 1 (Gerscovich, 2016).

A possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo em taludes naturais ou construídos, deve ser avaliada e de acordo com Gerscovich (2016), nessas análises, compara-se as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento, e define-se um fator de segurança dado pela equação (1).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Se  $FS > 1,0$  a obra está estável; quando  $FS = 1,0$  a estrutura está na iminência de ruptura, condição ilustrada na Figura 1, e quando  $FS < 1,0$  não tem significado físico.

Figura 1 - Ruptura por escorregamento,  $FS = 1$



Fonte: Gerscovich (2016)

Nesse tipo de abordagem determinística é estabelecido um valor para o  $FS$ . “O fator de segurança admissível, ( $FS_{adm}$ ), de um projeto corresponde a um valor mínimo a ser atingido e varia em função do tipo de obra e vida útil” (Gerscovich, 2016).

As consequências de uma eventual ruptura podem levar a perdas humanas e econômicas. A NBR 11682 (ABNT, 2009), estabelece classificações de segurança para enquadrar o projeto, considerando a situação atual e futura do talude a partir dessas perdas.

Os valores para o  $FS_{adm}$  recomendados na NBR 11682 (ABNT, 2009), são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos

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

Fonte: Adaptado, NBR 11682 (2009)

## 2.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

### 2.1.1 Método de equilíbrio limite

Conforme Fernandes, (2016), o método do equilíbrio limite apresenta algumas simplificações, incorpora e assume as hipóteses básicas:

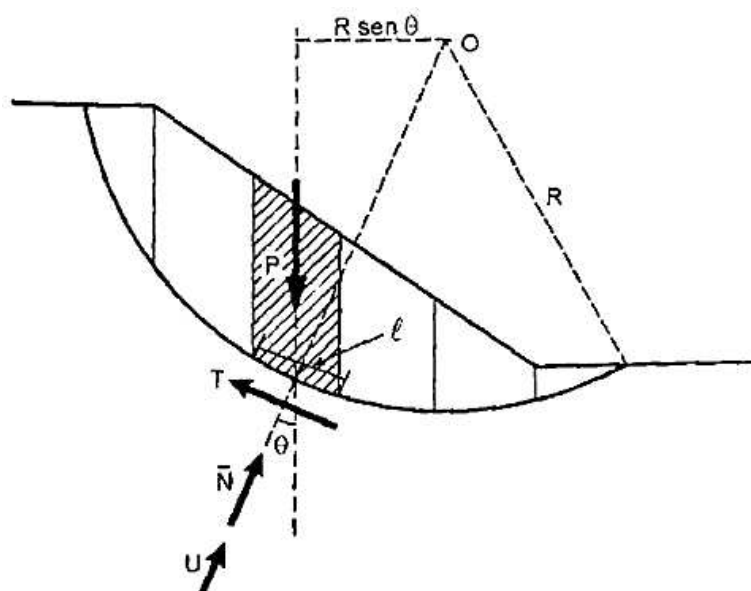
- A superfície de ruptura é bem definida, podendo ser circular, planar, cunha ou irregular;
- A massa de solo encontra-se na condição de ruptura generalizada e iminente;
- O critério de ruptura é admitido constante ao longo de toda a superfície de ruptura, (ignora fenômenos de ruptura progressiva);
- A superfície de ruptura corresponderá ao menor valor do fator de segurança, o qual será sempre constante ao longo de toda superfície.

Massad, (2010), destaca dois métodos de equilíbrio limite variantes do método Sueco, que permitem resolver problemas de estabilidade de taludes. São eles o Método de Fellenius e Bishop Simplificado que consideram a massa rompida em cunha ou em fatias. As hipóteses simplificadoras para os dois métodos são as seguintes:

- admite-se que a linha de ruptura seja um arco de circunferência;
- a massa de solo é subdividida em lamelas ou fatias, como ilustra a Figura 2.



Figura 2 - Método sueco ou fatias



Fonte: Massad (2010)

Onde:

$l$  = o comprimento da parte inferior da fatia;

$P$  = o peso da fatia;

$T$  = é igual a  $\tau \cdot l$  e mede a resistência mobilizada;

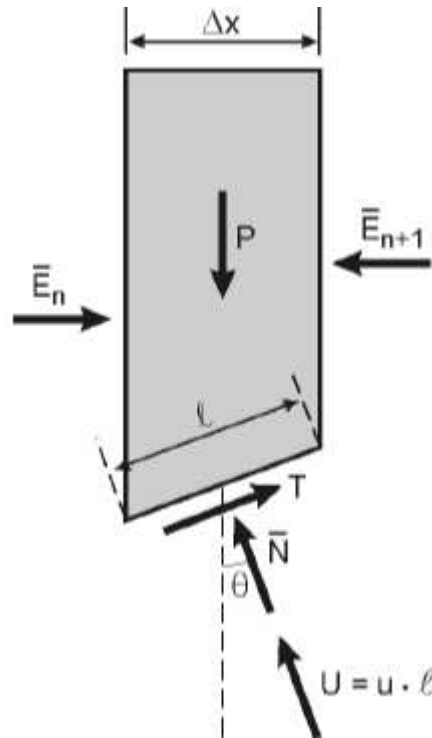
$\bar{N} = \bar{\sigma} \cdot l$  é a força normal efetiva atuante na base da fatia;

$U$  = força resultante das pressões neutras na base da fatia.

### 2.1.2 Método de Bishop Simplificado

Segundo Fernandes, (2016), este método supõe que a superfície de ruptura é circular, e assume que o equilíbrio de forças em cada fatia ocorre na direção vertical, além das forças interlamelares ocorrerem na direção horizontal conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Lamela de Bishop



Fonte: Massad (2010)

Aplicando o equilíbrio de forças na direção vertical, tem-se:

$$(\bar{N} + U) \cdot \cos \theta + T \cdot \operatorname{sen} \theta = P \quad (2)$$

Sendo  $T = \frac{1}{FS} \cdot c' \cdot l + \bar{N} \cdot \operatorname{tg} \phi'$ , a força normal assume:

$$\bar{N} = \frac{P - u \cdot \Delta x - \frac{c' \cdot \Delta x \cdot \operatorname{tg} \theta}{FS}}{\cos \theta + \frac{\operatorname{tg} \phi' \cdot \operatorname{sen} \theta}{FS}} \quad (3)$$

O fator de segurança é definido como:

$$F = \frac{\sum \left[ c' \cdot l + \frac{P - u \cdot \Delta x - \frac{c' \cdot \Delta x \cdot \operatorname{tg} \theta}{F}}{\cos \theta + \frac{\operatorname{tg} \phi' \cdot \operatorname{sen} \theta}{F}} \cdot \operatorname{tg} \phi' \right]}{\sum (P \cdot \operatorname{sen} \theta)} \quad (4)$$

Este método não fornece um fator de segurança explícito, é calculado iterativamente.

## 2.2 ANÁLISE GEOTÉCNICA

A NBR 11682 (ABNT, 2009, p. 8) evidencia que, “podem ser utilizados quaisquer tipos de investigação que forneçam elementos confiáveis para a montagem do modelo de análise, tanto sob o ponto de vista geométrico como paramétrico”.

No entanto, a NBR 11682 (ABNT, 2009), estabelece que é necessário execução de três sondagens, no mínimo, por seção analisada, ainda na fase preliminar de projeto.

Para elaboração do projeto de contenção, é essencial identificar as camadas do subsolo que serão consideradas nos estudos de estabilidade e determinar suas características geológicas e geotécnicas (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).

Os autores comentam ainda que para determinação desses parâmetros podem ser efetuados ensaios de campo e/ou laboratório, mas que, na prática da engenharia, o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) é o mais utilizado.

Ressalta-se, que neste tipo de ensaio os parâmetros de resistência são obtidos por correlações, portanto, deve-se levar em conta características específicas do solo e região de estudo.

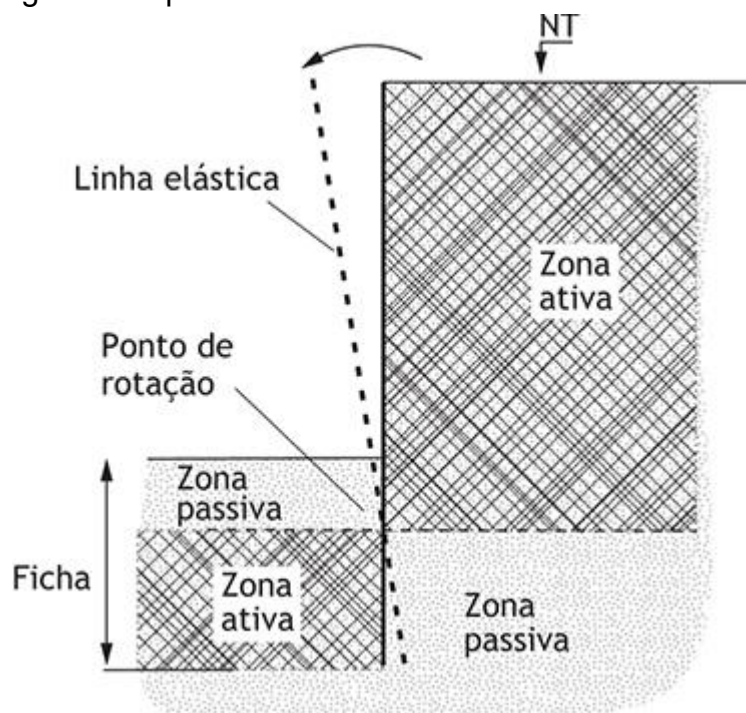
## 2.3 CORTINAS DE CONTENÇÃO

Cortinas, segundo Gerscovich; Danziger e Saramago, (2019), são estruturas de contenção esbeltas, que estão sujeitas a deformação por flexão e são recomendadas quando não se dispõe de área suficiente para execução de um muro e quando o desnível a ser contido supera os 5 m.

### 2.3.1 Cortina em balanço

Em casos de escavações de pequena profundidade e etapas iniciais de escavações profundas, podem ser utilizadas cortinas em balanço. O dimensionamento é feito a partir da determinação do comprimento do trecho enterrado, denominado de ficha, alustrado na Figura 4, necessário para garantir a estabilidade da estrutura de contenção, e quando seu tamanho não é suficiente, faz-se uso de tirantes ou estroncas. (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).

Figura 4 - Tipo de deslocamento da cortina em balanço



Fonte: Gerscovich *et al.* (2019)

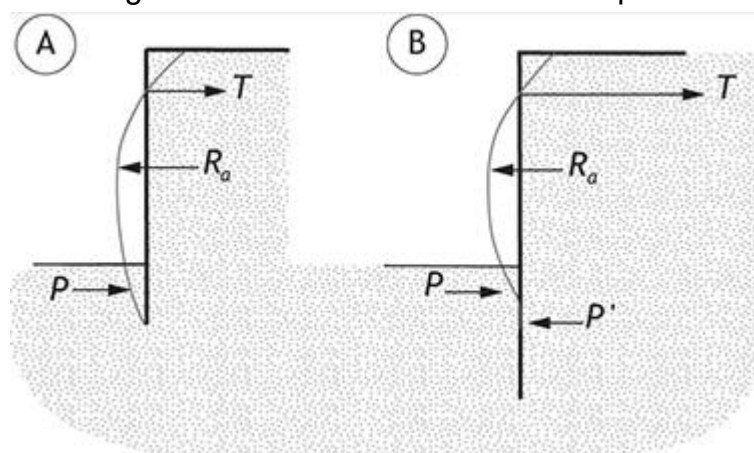
A cortina em balanço sofre uma rotação sob o efeito do empuxo ativo que resulta na formação das zonas ativas e passivas que atua no seu trecho livre, ilustrado na Figura 4. Essa rotação desperta o empuxo passivo à frente do trecho enterrado até o ponto de rotação. Abaixo desse ponto, as condições de empuxo se invertem. Com base nessas premissas, estabelece-se o diagrama resultante de empuxos ativo e passivo (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).

### 2.3.2 Cortinas com um nível de apoio

Para escavações com desníveis elevados, a cortina em balanço não é adequada pois a ficha necessária para garantir a estabilidade da cortina alcança comprimentos excessivos. E para esses casos é recomendada adoção de apoios posicionados em um ou mais níveis ao longo do trecho livre da cortina (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019). A Figura 5 ilustra duas situações de cortina com um nível de apoio, ficha curta (A) e ficha longa (B).

Analogamente ao dimensionamento das cortinas em balanço, o dimensionamento de cortinas com um nível de apoio consiste na determinação do comprimento da ficha e cálculo do empuxo.

Figura 5 - Cortina com um nível de apoio



Fonte: Gerscovich *et al.* (2019)

### 2.3.3 Cortinas rígidas e flexíveis

Uma cortina ou parede é dita flexível quando seus deslocamentos, por flexão são suficientes para influenciar significativamente a distribuição de tensões aplicadas pelo maciço, já as rígidas, as deformações podem ser desprezadas (Hachich, 1998).

De acordo com Gerscovich; Danziger e Saramago, (2019), paredes moldadas *in loco*, Figura 6 e Figura 7, são exemplos de cortinas rígidas. Os autores destacam que, segundo Velloso e Lopes (1975), os métodos do apoio fixo e do apoio livre podem ser estendidos para cortinas com vários níveis de apoio. Ainda, segundo os autores, o método do apoio fixo deve ser aplicado nos primeiros estágios de escavação, enquanto a ficha se apresenta como longa, e para os últimos estágios, recomendam o método do apoio livre, onde a ficha costuma ser pequena.

Figura 6 - Armação de cortina moldada *in loco*



Fonte: [www.fgmoretti.com.br](http://www.fgmoretti.com.br) (2023)

Figura 7 - Concretagem / acabamento da cortina



Fonte: [www.fgmoretti.com.br](http://www.fgmoretti.com.br) (2023)

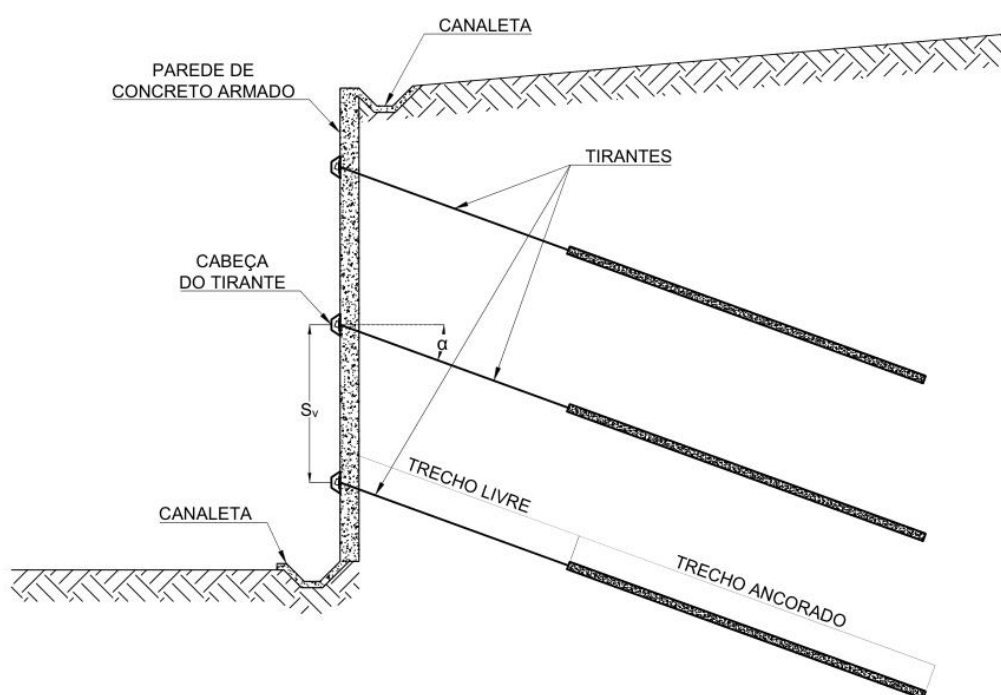
### 2.3.4 Cortina atirantada

A cortina atirantada possui parede de concreto armado, com espessura definida na elaboração do projeto estrutural em função dos momentos fletores ao longo do painel e em função das cargas nos tirantes, (puncionamento). Em geral apresenta espessura entre 20 cm e 40 cm. A parede, que pode ser compreendida como uma laje

vertical é pressionada contra a encosta pelos tirantes o que confere pequena deslocabilidade (Dutra, 2013; Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).

Os tirantes injetados no solo solicitados a esforços axiais de protensão são fixados na outra extremidade na cortina de concreto armado e dimensionados para resistir aos esforços gerados pela reação do solo ao esforço de confinamento exercido pelo conjunto cortina-tirantes (Mendonça, 2015). A Figura 8 exemplifica a seção transversal de uma cortina atirantada e seus principais componentes.

Figura 8 - Seção típica de uma cortina atirantada



Fonte: Autor (2023)

## 2.4 EMPUXO EM CORTINA ATIRANTADA

Os esforços na cortina devem ser analisados considerando cada estágio da escavação e levar em conta o tipo de execução prevista para a obra. Quando a obra não possui construções vizinhas, não há necessidade de evitar deslocamentos das paredes e o empuxo do solo pode ser calculado com o coeficiente de empuxo ativo da teoria de Rankine ( $K_a$ ). No caso de existirem construções nas proximidades da escavação em estudo, o empuxo do solo é calculado com o coeficiente de empuxo no repouso ( $K_0$ ), pois nessas condições, não são permitidos deslocamentos (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).

No Quadro 2 são apresentadas orientações que podem ser utilizadas na falta de orientação específica. Foram utilizadas em projetos iniciais das escavações para o metrô do Rio de Janeiro em 1970 (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).

Quadro 2 - Orientações para anteprojeto

Coeficiente de empuxo	Deslocamentos permissíveis	Condições
$k_a$	$> 0,002H$	(1) Prédios afastados ou que sofrem influência pequena
$\frac{2}{3}k_a + \frac{1}{3}k_0$	$< 0,002H$	(2) Prédios nas vizinhanças, mas pouco sensíveis aos deslocamentos
$\frac{(k_a + k_0)}{2}$	$< 0,002H$	(3) Prédios sensíveis aos deslocamentos
$\frac{2}{3}k_0 + \frac{1}{3}k_a$	$< 0,002H$	(4) Prédios muito sensíveis
$k_0$	Peq.	(5) Prédios importantes

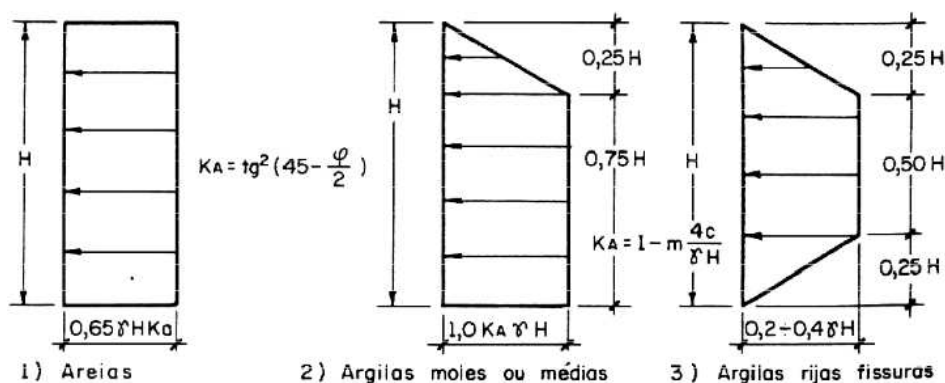
Fonte: Gerscovich *et al.* (2019)

Para o dimensionamento de cortinas ancoradas e atirantadas, Mendes, (2010), apresenta diagramas de empuxo aparentes, entre eles os diagramas propostos por Terzaghi e Peck (1967), apresentados na Figura 9.

“Trata-se de diagramas obtidos empiricamente partir de medições das forças axiais máximas nas escoras da cortina escorada, ocorrendo, geralmente, na etapa construtiva seguinte à sua instalação.” (Mendes, 2010).

Santos, (2013), ressalta as limitações desses diagramas, visto que não levam em consideração vários aspectos construtivos que podem influenciar nas tensões horizontais.

Figura 9 - Diagramas de empuxo aparente



Fonte: Terzaghi e Peck (1967) *apud* Santos (2013)



## 2.5 TIRANTES

Tirante é uma peça composta por um ou mais elementos resistentes à tração, de forma genérica, os tirantes são compostos por cordoalhas, fios ou barras de aço.

O corpo do tirante, que tem por finalidade promover a ancoragem de maciços terrosos ou de rocha é inserido no terreno, em perfuração com inclinação, em geral, entre 15° e 30° previamente executada. Em seguida, é feita injeção de calda de cimento ou de outro aglutinante na parte inferior destes elementos, formando o bulbo de ancoragem. A outra extremidade é fixada na parede de concreto por meio de um sistema de placas e porcas. São tracionados por macaco hidráulico até uma carga definida, que contrapõem o empuxo garantindo a estabilidade do solo (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019; Solotrat, 2023).

### 2.5.1 Dimensionamento dos tirantes

A NBR 5629 (ABNT, 2018), estabelece que cada tirante deve ter o comprimento do seu bulbo de ancoragem dimensionado para suportar uma carga de trabalho multiplicada por fator de segurança.

Para estruturas definitivas como a cortina atirantada, deve-se considerar os tirantes permanentes com carga de trabalho (esforço máximo a que o tirante é submetido), calculada de acordo com a NBR 5629 (ABNT, 2018), pela equação (5), considerando o fator de segurança de 1,75, caso o tirante seja provisório, o fator de segurança adotado é 1,50.

$$F_t = \frac{0,9 \cdot f_{yk} \cdot A_s}{1,75} \quad (5)$$

Em que:

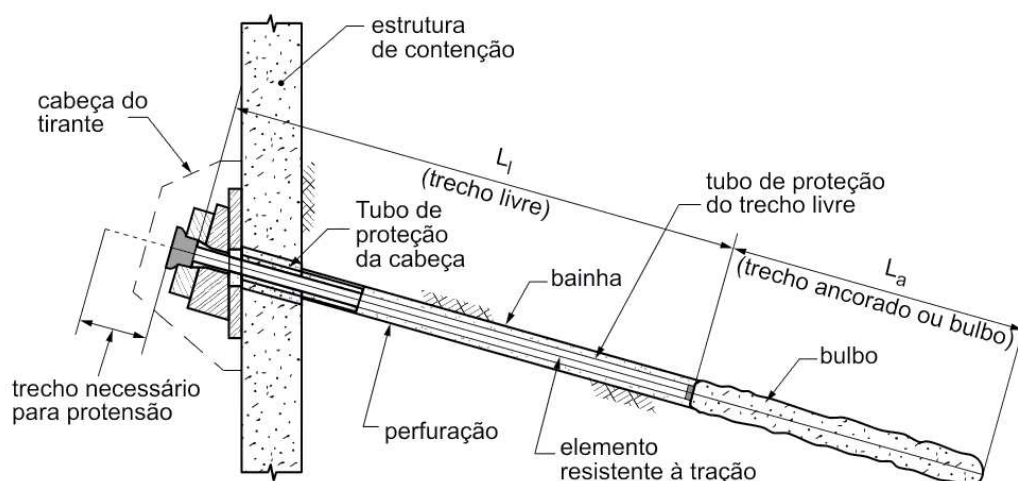
$F_t$  = Carga de trabalho;

$f_{yk}$  = resistência característica do aço à tração;

$A_s$  = área da seção transversal útil da barra.

As partes constitutivas do tirante podem ser observadas na Figura 10.

Figura 10 - Características do tirante



Fonte: NBR 5629 (2018)

### Legenda

$L_a$  - comprimento do trecho ancorado, comprimento ancorado ou do bulbo, projetado;

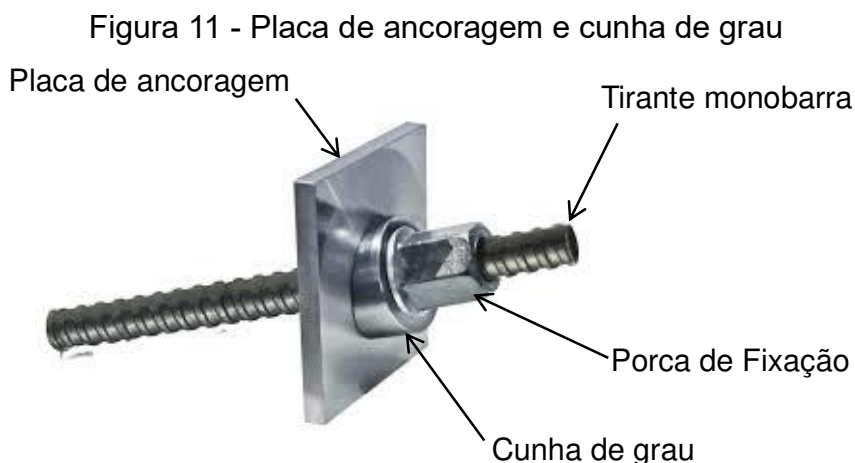
$L_l$  - comprimento do trecho livre ou comprimento livre, projetado.

### 2.5.2 Cabeça do tirante

A cabeça do tirante é responsável por transmitir a carga do bulbo de ancoragem para a cortina de concreto armado. Possui placa de ancoragem, cunha de grau e porca como ilustrado na Figura 11, além de luvas para emenda.

A placa de ancoragem possui dimensões distintas de acordo com a carga de trabalho do tirante. Esta placa atua como um pilar que tende a romper a cortina por puncionamento. A cunha de grau auxilia na distribuição das tensões do tirante na placa de ancoragem e garante o grau de inclinação da ancoragem definido em projeto (Oserow, 2020).

A NBR 5629 (ABNT, 2018), define para a proteção da cabeça do tirante um recobrimento de 5,0 cm para todas as partes metálicas, em concreto, argamassa ou outro elemento especificado em projeto.



Fonte: Adaptado catálogo Dywidag (2023)

### 2.5.3 Comprimento do trecho livre

O trecho livre deve possuir comprimento mínimo que permita que o alongamento assegure a fixação da cabeça quando da aplicação da carga de protensão, em caso de fixação por rosca o comprimento mínimo deve ser 3,0 m, se por clavetes, 5 m de acordo com a NBR 5629 (ABNT, 2018).

### 2.5.4 Bulbo de Ancoragem

O comprimento ancorado, (bulbo), deve ser calculado por método teórico ou semi-empírico fundamentado em publicações técnicas e seu desempenho deve ser verificado por meio de ensaios consoante a NBR 5629 (ABNT, 2018). A seguir, são descritos dois métodos.

- Método de Bustamante e Doix

O comprimento do trecho ancorado pode ser determinado pelas equações (6) e (7), obtidas a partir da equação de estimativa de carga de ancoragens proposta por Bustamante e Doix (1985) *apud* Porto, (2015).

$$L_b = \frac{T_L}{\pi \cdot D_s \cdot q_s} \quad (6)$$

$$D_s = \beta \cdot D_p \quad (7)$$

Onde:

$L_b$  = comprimento do bulbo de ancoragem;

$T_L$  = carga máxima de ancoragem;

$\beta$  = coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo devido à injeção, dado na

Tabela 1;

$q_s$  = resistência ao cisalhamento entre a ancoragem e o solo, de acordo com a

Figura 12;

$D_s$  = diâmetro médio do trecho ancorado;

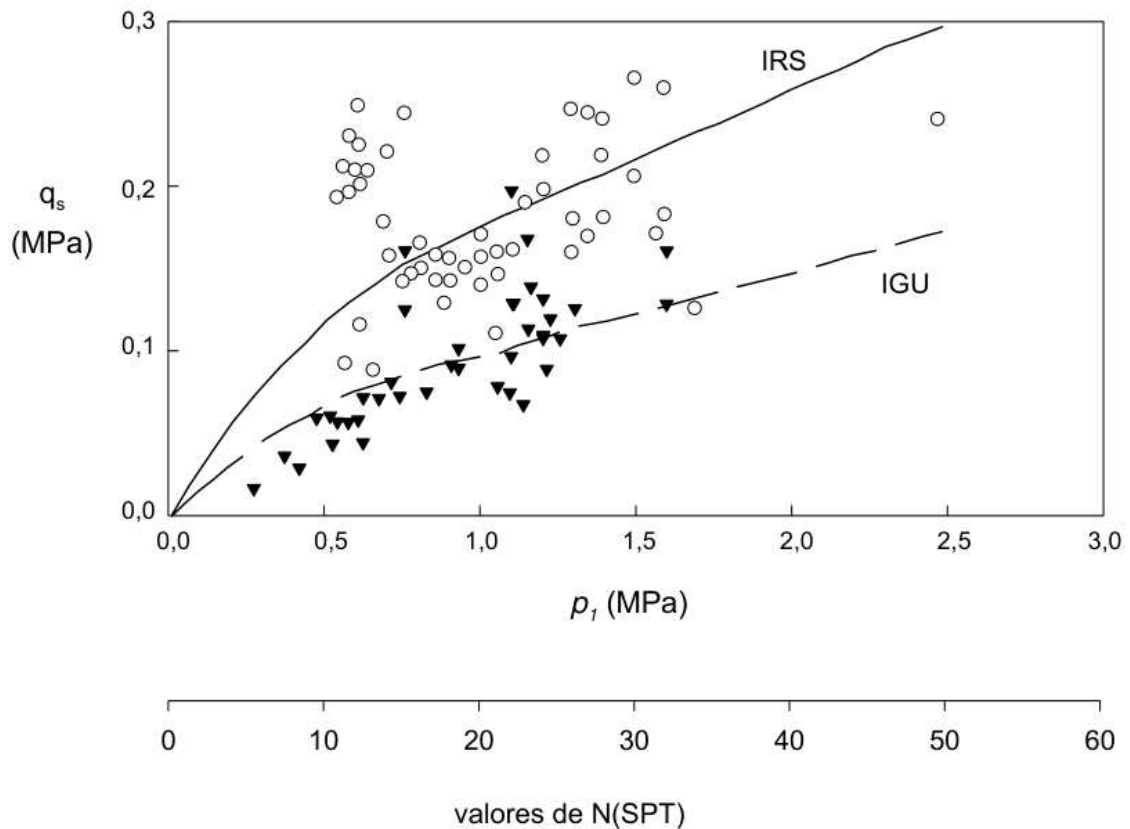
$D_p$  = diâmetro perfurado.

Tabela 1 - Coeficiente de majoração do diâmetro do bulbo devido à injeção

Tipo de solo	Coeficiente $\beta$	
	Com rejeição	Sem reinjeção
Cascalho	1,8	1,3 – 1,4
Cascalho arenoso	1,6 – 1,8	1,2 – 1,4
Areia com cascalho	1,5 – 1,6	1,2 – 1,3
Areia grossa	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Areia média	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Areia fina	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Areia siltosa	1,4 – 1,5	1,1 – 1,2
Silte	1,4 – 1,6	1,1 – 1,2
Argila	1,8 – 2,0	1,2

Fonte: Bustamante e Doix (1985) *apud* Porto (2015)

Figura 12 - Correlações empíricas para a resistência ao cisalhamento por unidade de comprimento em argilas / siltes



Fonte: Bustamante e Doix (1985) *apud* Lima (2007)

- Joppert Júnior

A partir do método proposto por Joppert Jr. para capacidade de carga dos tirantes também é possível obter o comprimento do bulbo de ancoragem dado pela equação (8).

$$L = \frac{R_{rup}}{9,2 \cdot N_{spt} \cdot \phi_{tricone} \cdot K} \quad (8)$$

Onde:

$L$  = comprimento de ancoragem do tirante ( $m$ );

$R_{rup}$  = carga de ruptura do tirante;

$N_{spt}$  = número médio de SPT na região de implantação do bulbo;

$\phi_{tricone}$  = diâmetro do tricône ( $m$ );

$K$  = coeficiente que depende do tipo de solo em ( $tf/m^2$ ), indicado no Quadro

3.

Quadro 3 - Coeficiente K em função do tipo de solo

Tipo de solo	K (t/m <sup>2</sup> )
argila / silte	1,00
areia muito argilosa / siltosa	0,60
areia pouco argilosa / siltosa	0,40
areia	0,30

Fonte: Joppert Jr. (2007)

Algumas indicações de comprimento ancorado são apresentados pela Fundação GeoRio (2014, *apud* Gerscovich *et al.*, 2019), em função do tipo de solo e carga de trabalho do tirante conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Comprimentos do bulbo de ancoragem

Carga de trabalho (kN)	Bulbo de ancoragem (cm)		
	Tipo de solo		
	Solo	Rocha alterada	Rocha sã
160	600	500	300
200	700	600	400
350	800	700	500
500	800	700	500

Fonte: GeoRio (2014) *apud* Gerscovich *et al.* (2019)

### 2.5.5 Espaçamento entre os tirantes

De acordo com Silva, (2015), o espaçamento entre os tirantes deve ser tal que evite interferência entre tirantes adjacentes, enquanto o espaçamento mínimo proposto pelo Eurocode 7 é de 1,5 m, nos Estados Unidos é 1,3 m.

### 2.5.6 Protensão dos tirantes

A protensão, quando aplicada nos tirantes de uma cortina atirantada exerce uma força na estrutura contra o maciço, ou seja, são ancoragens ativas e reagem contra a parede reduzindo os deslocamentos. É necessário, que o muro seja devidamente calculado para transmitir o empuxo gerado pela protensão dos tirantes ao terreno, efetivando assim, o arrimo. Os tirantes protendidos são relativamente comuns na construção civil, onde existe a necessidade de elevadas cargas de tração (Infrasolo Engenharia, 2022; Solotrat, 2023).

Os tirantes aplicam cargas relativamente elevadas em pontos localizados. Caso os testes sejam executados sobre a estrutura, esta deverá estar dimensionada para receber os esforços. As cargas devem ser aplicadas de acordo com as características do projeto e do processo executivo previsto (Joppert Júnior, 2007).

De acordo com a NBR 5629 (ABNT, 2018), os tirantes devem passar por ensaios de protensão com medição dos deslocamentos na cabeça do tirante, os ensaios recomendados pela norma são os seguintes:

- Recebimento

Ensaio executado em 100% dos tirantes e têm a finalidade de determinar o comportamento carga-deslocamento do sistema.

- Qualificação

Neste ensaio são medidos a capacidade de carga; deslocamentos sob carga constante; comprimento livre equivalente e atrito ao longo do comprimento livre.

- Qualificação com medição de fluência

Neste ensaio é verificada a estabilidade do tirante sob ação de carga de longa duração que pode atingir até  $1,75 \cdot F_t$ .

## 2.6 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DA CORTINA ATIRANTADA

O dimensionamento da cortina é realizado considerando-a como laje lisa, (laje de concreto armado sem vigas), conforme indicado por Gerscovich, Danziger e Saramago (2019).

As lajes lisas são apoiadas diretamente sobre os pilares e são projetadas com uma espessura suficiente para garantir a sua resistência à punção e à flexão (Araújo, 2014). A cortina atirantada, igualmente as lajes, está submetida a esforços de punção e flexão, através das placas de ancoragem que se comportam como pilares quando os tirantes são protendidos.

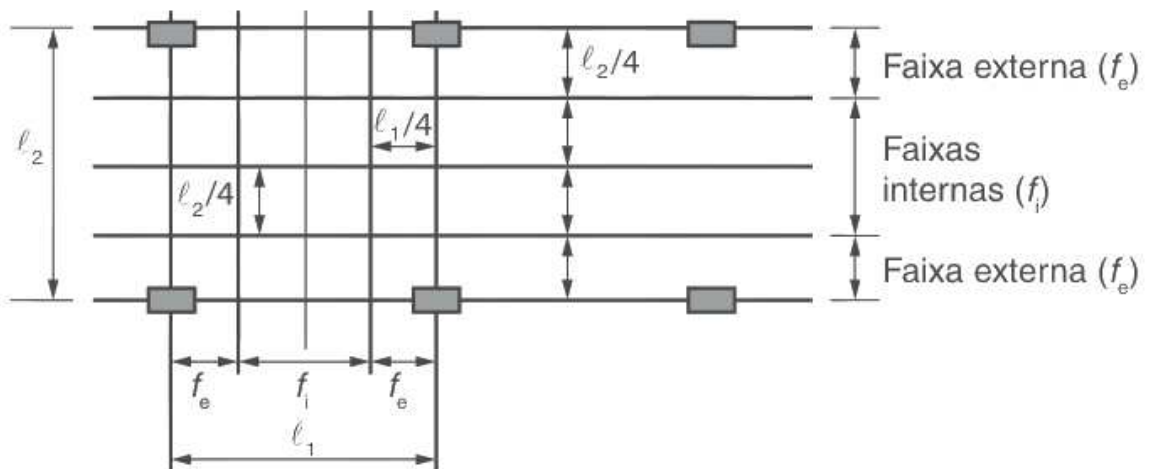
A NBR 6118 (ABNT, 2023), estabelece que para análise estrutural de lajes lisa e cogumelo deve ser empregado procedimento numérico adequado, e cita os exemplos: diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno. Porém, desde que os pilares estejam dispostos em filas ortogonais, com vãos pouco diferentes, permite que os esforços sejam calculados pelo processo elástico

aproximado com redistribuição, consistindo na adoção de pórticos múltiplos (de vários pisos) para obtenção dos esforços solicitantes.

A distribuição dos momentos considerando a carga total para cada pórtico deve ser feita segundo as faixas, como apresentado na Figura 13, da seguinte maneira conforme especificado pela NBR 6118 (ABNT, 2023):

- a) 45 % dos momentos positivos para as duas faixas internas;
- b) 27,5 % dos momentos positivos para cada uma das faixas externas;
- c) 25 % dos momentos negativos para as duas faixas internas;
- d) 37,5 % dos momentos negativos para cada uma das faixas externas.

Figura 13 - Faixas de laje para distribuição dos esforços nos pórticos múltiplos



Fonte: NBR 6118 (2023)

Os momentos fletores por unidade de comprimento são distribuídos como indicado nas equações (9), (10), (11) e (12).

- **Momentos Positivos**

Faixas internas

$$M = \frac{0,45 \cdot M_+}{0,5 \cdot l_1} \quad (9)$$

Faixa externa

$$M = \frac{0,275 \cdot M_+}{0,25 \cdot l_1} \quad (10)$$



- **Momentos Negativos**

Faixas internas

$$M = \frac{0,375 \cdot M_-}{0,5 \cdot l_1} \quad (11)$$

Faixa externa

$$M = \frac{0,25 \cdot M_-}{0,25 \cdot l_1} \quad (12)$$

### 2.6.1 Definição dos carregamentos

O carregamento uniforme ( $Q$ ), já majorado, atuante no painel é calculado utilizando a equação (13).

$$Q = \frac{1,4 \cdot N \cdot F_{adm} \cdot \cos(\alpha)}{H \cdot L} \quad (13)$$

Em que:

$Q$  = carregamento distribuído por área ( $kN/m^2$ );

$N$  = quantidade de tirantes do painel;

$F_{adm}$  = carga de trabalho do tirante escolhido ( $kN$ );

$H \cdot L$  = área do painel ( $m^2$ ).

O carregamento para as vigas, como são chamadas as faixas, horizontal, ( $q_h$ ) e vertical, ( $q_v$ ), é calculado pelas equações (14) e (15) indicadas. Daí então, determina-se os momentos fletores máximos de dimensionamento através do Ftool.

$$q_h = Q \cdot S_v \quad (14)$$

$$q_v = Q \cdot S_h \quad (15)$$

Onde  $S_v$  e  $S_h$  são os espaçamentos entre os tirantes, vertical e horizontal, respectivamente.

## 2.6.2 Dimensionamento da armadura de flexão

Para realizar o dimensionamento à flexão, antes, deve-se especificar os critérios de projeto como: a classe de agressividade ambiental, a classe do concreto a ser utilizado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), o fator de segurança contra escorregamento indicado na NBR 5629 (ABNT, 2018) e sobrecarga, conforme definido na NBR 11682 (ABNT, 2009).

Definidas essas características, determina-se os momentos positivos e negativos nas duas direções da cortina. A área de aço é obtida usando as equações (16), (17) e (18) propostas por Araújo, (2014) para dimensionamento à flexão.

$$\mu = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot 0,85 \cdot f_{cd}} \quad (16)$$

$$\xi = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu}) \quad (17)$$

$$A_s = \frac{0,85 \cdot b \cdot \xi \cdot d \cdot 0,8 \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (18)$$

Onde:

$M_d$  = momento solicitante;

$b$  = largura da viga;

$d$  = altura útil da viga;

$f_{cd}$  = resistência à compressão de cálculo do concreto;

$f_{yd}$  = resistência de escoamento de projeto do aço;

$A_s$  = área de aço necessária.

É necessário, ainda, verificar a armadura mínima de flexão, que para concretos até C30, a taxa é de 0,15 %, e determinada por:

$$A_{s\min} = \rho_{\min} \cdot A_c \quad (19)$$

Onde:

$A_{s\min}$  = armadura mínima;

$\rho_{\min}$  = taxa mínima de armadura de flexão;

$A_c$  = área de concreto do elemento estrutural.

### 2.6.3 Detalhamento das armaduras

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), o diâmetro máximo de qualquer barra da armadura de flexão não deve ultrapassar  $h/8$ . A mesma norma indica que nas regiões de maiores momentos fletores o espaçamento deve ser o menor valor entre  $20\text{ cm}$  e  $2h$ .

## 2.7 VERIFICAÇÃO À PUNÇÃO

Punção é o estado limite último por cisalhamento no entorno de forças concentradas e sua análise é fundamental para lajes lisas (Araújo, 2014).

“O modelo de cálculo corresponde à verificação do cisalhamento em duas ou mais superfícies críticas definidas no entorno de forças concentradas.” NBR 6118 (ABNT, 2023).

- Superfícies críticas de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023):

Na primeira superfície crítica **C** do pilar ou carga concentrada, a tensão de compressão diagonal do concreto é indiretamente verificada através da tensão de cisalhamento.

Na segunda superfície crítica de contorno, **C'** que é definida a uma distância igual a  $2d$  do contorno da área de aplicação da força, é verificada a capacidade da ligação à punção associada a resistência à tração diagonal. Também é feita através de uma tensão de cisalhamento no entorno **C'**.

Já a terceira superfície crítica de contorno, **C''** é verificada quando a armadura transversal for necessária.

Os perímetros críticos de pilares no interior da laje lisa podem ser observados na Figura 14.

- Tensão solicitante nas superfícies críticas **C** e **C'**

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd}}{u \cdot d} \quad (20)$$

Em que:

$F_{Sd} = 1,4 \cdot F_{adm} \cdot \cos(\alpha)$  é a força ou a reação concentrada de cálculo ortogonal à placa originada por um tirante;

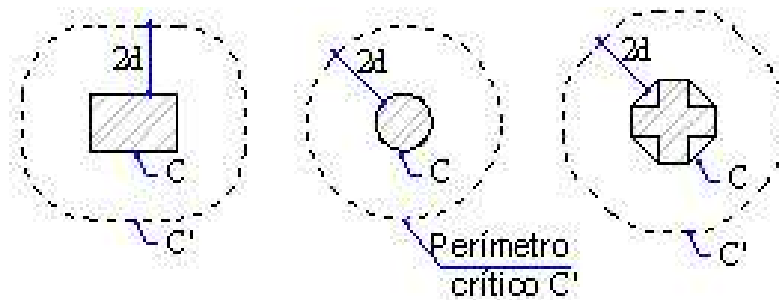
$u$  = é o perímetro do contorno crítico  $C'$ ;

$d$  = altura útil da laje, considerada constante dada pela equação (21).

$$d = \frac{d_x + d_y}{2} \quad (21)$$

$d_x$  e  $d_y$  são as alturas úteis nas direções  $x$  e  $y$ .

Figura 14 - Perímetros críticos de pilares no interior da laje



Fonte: altoqi.com.br (2022)

A verificação da tensão resistente de compressão diagonal do concreto na superfície crítica  $C$ , deve ser feita nas lajes submetidas a punção com ou sem armadura e deve atender o seguinte critério NBR 6118 (ABNT, 2023):

$$\tau_{Sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \quad (22)$$

Onde:

$$\alpha_v = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa.}$$

Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), a verificação na superfície  $C'$  da tensão resistente ao cisalhamento para elementos e trechos sem armadura de punção, deve ser efetuada conforme equação (23).

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left( 1 + \sqrt{\frac{20}{d}} \right) \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \quad (23)$$

Sendo

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$$

Em que:

$d$  = é a altura útil da laje ao longo do contorno crítico C;

$\rho$  = é a taxa geométrica de armadura de flexão aderente;

$\rho_x$  e  $\rho_y$  são as taxas de armadura nas duas direções ortogonais assim calculadas:

- na largura igual à dimensão ou área carregada do pilar acrescida de 3d para cada um dos lados;
- no caso de proximidade da borda, prevalece a distância até a borda, quando menor que 3d.

## 2.8 ESTABILIDADE DAS CORTINAS ATIRANTADAS

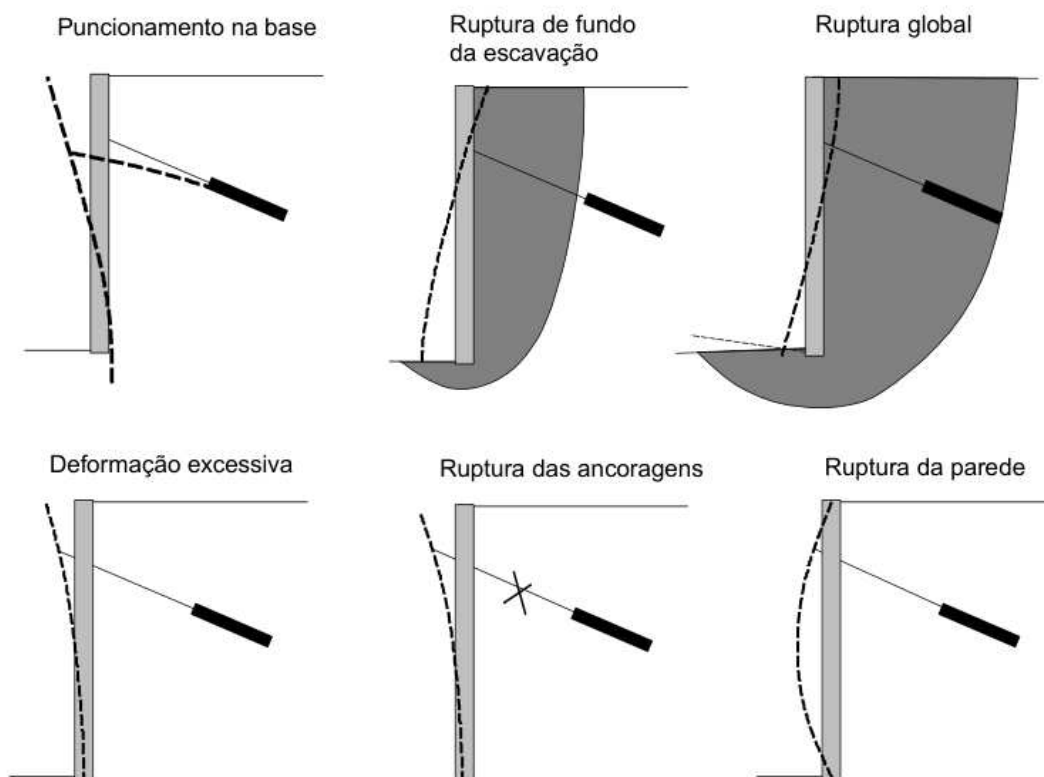
A estabilidade do conjunto, (cortina-tirantes-maciço de solo) é analisada em duas situações, de acordo com (Corrales, 2018):

- Estabilidade externa (ruptura global generalizada): a princípio é analisada utilizando métodos convencionais de estabilidade de taludes, tais como Bishop, Janbu, Fellenius, etc., para determinar os casos onde o bulbo está dentro da superfície de deslizamento e o tirante não possui influência na estabilidade do maciço.
- Estabilidade interna: é analisada junto aos mecanismos de ruptura formados como consequência da construção da obra de contenção, utilizando métodos de equilíbrio limite, tais como, o Método Brasileiro e Ranke & Ostermayer, assegurando ao trecho livre o comprimento necessário para evitar a ruptura do maciço de ancoragem ao longo de qualquer plano que passa pelo pé da cortina e o bulbo.

GeoRio (2014, *apud* Gerscovich *et al.*, 2019), especificam seis principais modos de ruptura que devem ser verificados durante a elaboração do projeto: ruptura por

baixa capacidade de carga da fundação; ruptura entre o trecho ancorado e o painel; ruptura após o trecho ancorado; deformação excessiva; ruptura do tirante e problemas no dimensionamento estrutural do painel. Estas situações são ilustradas na Figura 15.

Figura 15 - Tipos de ruptura em cortina atirantada



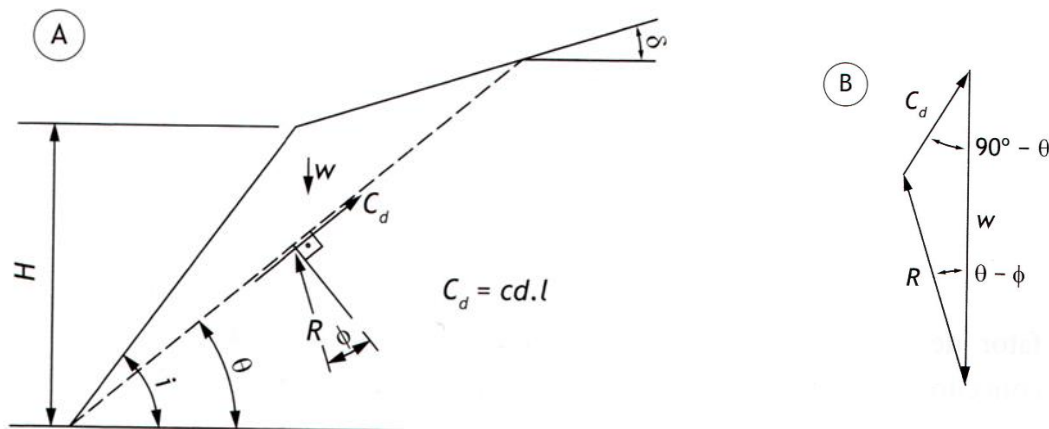
Fonte: GeoRio (2014) *apud* Gerscovich *et al.* (2019)

### 2.8.1 Método Brasileiro

Este foi o método usado na primeira cortina ancorada construída no Brasil, desenvolvido pelo Prof. Costa Nunes, em 1957. É baseado no método de Culmann (1866), restrito a solos homogêneos e taludes verticais (ou praticamente verticais).

Esse método parte da hipótese que a superfície de ruptura é um plano que passa pelo pé do talude, formando um ângulo  $\theta$  com a horizontal, e o fator de segurança é obtido apenas em função da coesão (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019). Essa consideração é representada na Figura 16.

Figura 16 - Plano de ruptura considerado pelo Método Brasileiro (A), Diagrama de esforços (B)



Fonte: Gerscovich *et al.* (2019)

Os parâmetros representam:

$\delta$  = inclinação da crista do talude com a horizontal;

$\theta$  = ângulo entre a horizontal e o plano;

$\phi$  = ângulo de atrito;

$C_d$  = coesão drenada;

$H$  = altura da contenção;

$i$  = inclinação do talude com a horizontal;

$l$  = comprimento da linha de maior declive do plano crítico de deslizamento;

$R$  = reação do maciço terroso sobre a cunha;

$W$  = peso da cunha mais provável de deslizamento com dimensão unitária.

A descrição é apresentada pelas equações abaixo, onde  $\frac{C_d}{\gamma H}$  é o número de estabilidade considerado para talude homogêneo sem percolação.

$$\left(\frac{C_d}{\gamma H}\right)_\theta = \frac{1}{2} \cdot \csc(i) \cdot \sen(i - \theta) \cdot \sen(\theta - \phi) \cdot \sec(\phi) \quad (24)$$

$$d \frac{\left(\frac{C_d}{\gamma H}\right)_\theta}{d\theta} = 0 \rightarrow \theta_{crit} = \frac{i + \phi}{2} \quad e \quad \frac{Cd}{\gamma H} = \frac{1 - \cos(1 - \phi)}{4 \sen(i) \cos(\phi)} \quad (25)$$

Seja  $i = 90^\circ$  para taludes verticais, tem-se:

$$\theta_{crít} = \frac{90^\circ + \phi}{2} = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (26)$$

$$\frac{C_d}{\gamma H} = \frac{1 - \cos(90^\circ - \phi)}{4 \cdot \sin(90^\circ) \cdot \cos(\phi)} = \frac{1 - \sin\phi}{4 \cdot \cos\phi} \quad \text{para } \phi_{crít} \quad (27)$$

Para  $\theta$  qualquer

$$\left(\frac{C_d}{\gamma H}\right)_\theta = \frac{1}{2} \cdot \csc(90^\circ) \cdot \sin(90^\circ - \theta) \cdot \sin(\theta - \phi) \cdot \sec(\phi) \quad (28)$$

$$\left(\frac{C_d}{\gamma H}\right)_\theta = \frac{1}{2} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta - \phi) \cdot \sec(\phi) \quad (29)$$

$FS$  empregado, caso geral para  $\theta$  qualquer, com  $i = 90^\circ$

$$FS_\theta = \frac{C}{C_d} = \frac{c \cdot L}{cd \cdot L} = \frac{\frac{c}{\gamma} \cdot H}{\frac{C_d}{\gamma} \cdot H} \quad (30)$$

$$FS_\theta = \frac{\frac{c}{\gamma H}}{\frac{1}{2} \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta - \phi) \cdot \sec(\phi)} \quad (31)$$

$$FS_\theta = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \phi}{\gamma H \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta - \phi)} \quad (32)$$

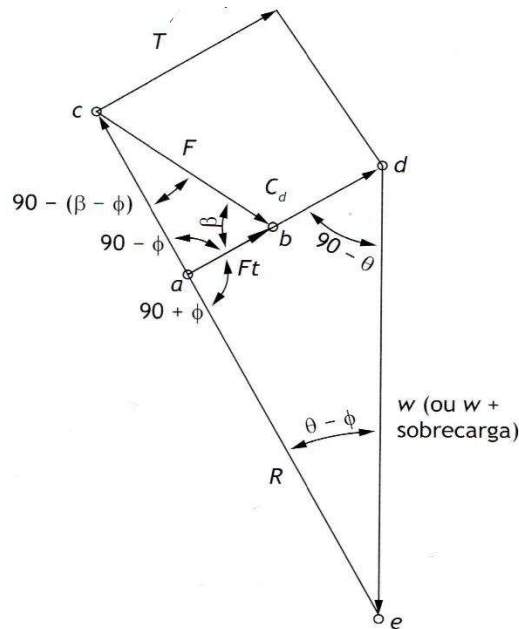
Para  $\theta_{crít}$  tem-se:

$$FS = \frac{4c \cdot \cos \phi}{\gamma H \cdot (1 - \sin(\phi))} \quad (33)$$

No método brasileiro, arbitra-se o fator de segurança, preconizado na norma, em geral 1,5 e em função deste valor, determina-se o ângulo  $\theta$ , correspondente a ele e a partir daí, determina-se a carga ( $F$ ), Figura 17, a ser exercida pelos tirantes para alcançar este fator (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019).



Figura 17 - Polígono das forças de ancoragem



Fonte: Gerscovich *et al.* (2019)

Aplicando a lei dos senos no triângulo *abc*, tem-se:

$$\frac{F}{\text{sen}(90^\circ - \phi)} = \frac{F_t}{\text{sen}[90^\circ - (\beta - \phi)]} \therefore F_t = \frac{F \cdot \cos(\beta - \phi)}{\cos \phi} \quad (34)$$

O fator de segurança conforme definição é obtido através da equação (35)

$$FS = \frac{C}{C_d} \quad (35)$$

Onde  $C_d = T - F_t$

Do triângulo *adc*, tem-se:

$$\frac{T}{\text{sen}(\theta - \phi)} = \frac{W}{\text{sen}[90^\circ + \phi]} \therefore T = \frac{W \cdot \text{sen}(\theta - \phi)}{\cos \phi} \quad (36)$$

$$FS = \frac{C}{C_d} = \frac{c \cdot L}{T \cdot F_t} = \frac{c \cdot H \cos \delta}{\text{sen}(\theta - \delta)} \cdot \frac{1}{\frac{W \cdot \text{sen}(\theta - \phi)}{\cos \phi} - \frac{F \cdot \cos(\beta - \phi)}{\cos \phi}} \quad (37)$$

$$FS = \frac{c \cdot H \cdot \cos \delta \cdot \cos \phi}{\text{sen}(\theta - \delta) \cdot [W \cdot \text{sen}(\theta - \phi) - F \cdot \cos(\beta - \phi)]} \quad (38)$$

O fator de reforço  $\lambda$  é definido como:

$$\lambda = \frac{FS_{desejado}}{FS_{existente}} = \frac{\frac{c \cdot L}{T} - F_t}{\frac{c \cdot L}{T}} \quad (39)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda - 1} = \frac{T}{F_t} \quad (40)$$

Logo:

$$\frac{\lambda}{\lambda - 1} = \frac{W \cdot \text{sen}(\theta - \phi)}{\cos \phi} \cdot \frac{\cos \phi}{F \cdot \cos(\beta - \phi)} \quad (41)$$

Portanto, a força de protensão necessária nos tirantes, para um dado fator de segurança, no plano crítico é dada pela equação (42), que corresponde a soma das forças de todos os tirantes em uma linha vertical por metro de cortina.

$$F = \frac{\lambda - 1}{\lambda} \cdot \frac{W \cdot \text{sen}(\theta - \phi)}{\cos(\beta - \phi)} \quad (42)$$

Sequência de projeto segundo (Gerscovich; Danziger; Saramago, 2019) consiste em:

Calcular o  $\theta_{crit}$ , pela equação (43);

$$\theta_{crit} = \frac{i + \phi}{2} \quad (43)$$

Calcular  $W$  usando a equação (44) ou (45);

$$W = \text{área} \cdot \gamma_{solo} \quad (44)$$

$$W = \frac{\gamma_{solo} \cdot H^2 \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\theta_{crit})}{2 \cdot \text{sen}(\theta_{crit} - \delta)} + q \cdot l \cdot \cos(\theta_{crit}) \quad (45)$$

Onde:  $\gamma_{solo}$  é o peso específico do solo,  $q$  é a sobrecarga em  $\frac{kN}{m^2}$  e  $l = \frac{H \cdot \text{sen}(i + \delta)}{\text{sen}(\theta_{crit} - \delta)}$

Calcular o  $FS_{min}$  do plano crítico (sem ancoragem);

$$FS_{\min} = \frac{4 \cdot c \cdot \cos(\phi)}{\gamma_{\text{solo}} \cdot H \cdot (1 - \text{sen}(\phi))} \quad (46)$$

Fixar  $\alpha$  entre  $15^\circ$  e  $30^\circ$  e calcular  $\beta = \alpha + \theta_{\text{crít}}$ ;

Calcular o fator de reforço  $\lambda$ , dado pela equação (39);

Calcular a força de ancoragem correspondente ao plano crítico  $F$  pela equação (42);

Distribuir os tirantes no painel, equação (47);

$$N_t = \frac{F \cdot S_h}{F_{\text{adm}}} \quad (47)$$

Onde:

$N_t$  = níveis de tirantes;

$S_h$  = espaçamento horizontal entre os tirantes;

$F$  = força de protensão;

$F_{\text{adm}}$  = carga de trabalho do tirante escolhido.

O ângulo de inclinação do plano de ancoragem é determinado iterativamente com base no fator de segurança desejado.

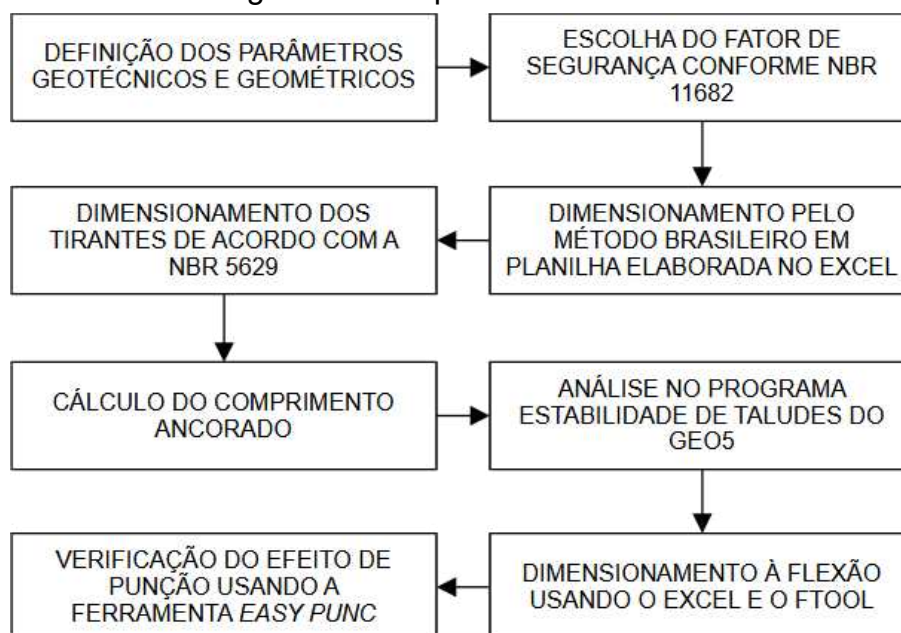
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, *software* utilizado, critérios do projeto geotécnico e estrutural.

A estratégia deste trabalho compreende dimensionar a estrutura de contenção aplicando a técnica desenvolvida por Costa Nunes para o cálculo da força de protensão necessária para estabilizar a cortina de acordo com um fator de segurança pré-estabelecido; cálculo estrutural simplificado do paramento e verificação de estabilidade com o uso do GEO5.

A sequência apresentada na Figura 18 resume os procedimentos desenvolvidos neste trabalho, desde as definições iniciais até o dimensionamento estrutural da cortina atirantada.

Figura 18 - Sequência de trabalho



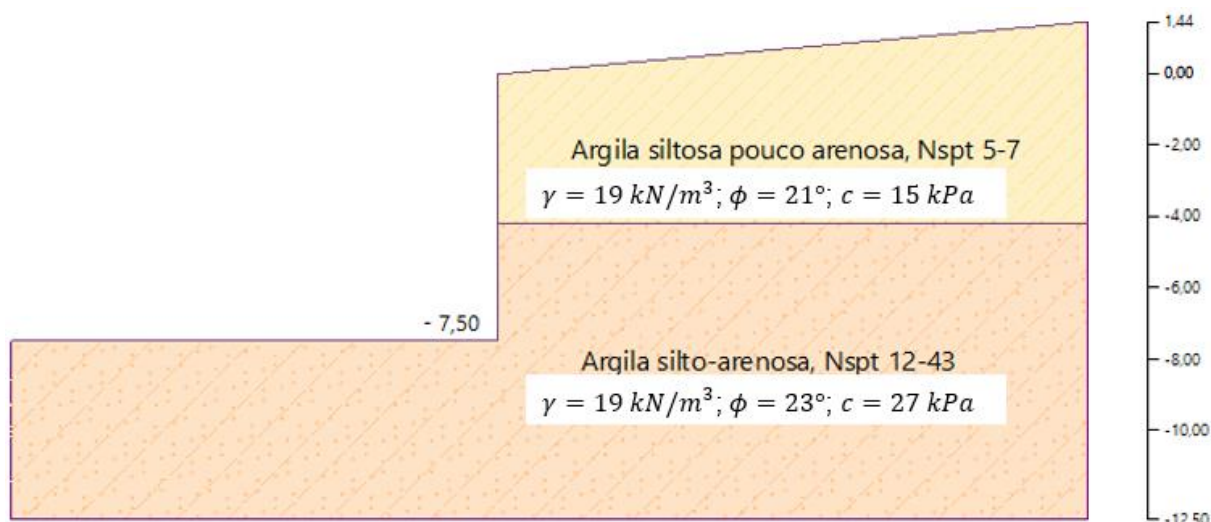
Fonte: Autor (2023)

#### 3.1 CRITÉRIOS DE PROJETO

Preliminarmente, para a aplicação da análise e dos métodos de dimensionamento apresentados no referencial teórico desta pesquisa, definiu-se as características de um talude, tal como indicado na Figura 19, suas características

geométricas e sobrecarga atuante. Os parâmetros geotécnicos apresentados, foram obtidos por Aguiar, (2022).

Figura 19 - Talude em corte



Fonte: Autor (2023)

O projeto da cortina atirantada aqui apresentado, trata de uma situação hipotética de contenção que possui um painel com altura total de 7,50 m, 15,0 m de comprimento, espessura de 30 cm, inclinação, ( $i$ ), de  $90^\circ$ , inclinação da crista do talude, ( $\delta$ ), de  $5^\circ$  e inclinação dos tirantes com a horizontal, ( $\alpha$ ), de  $20^\circ$ .

Considerou-se que a profundidade do nível d'água encontra-se além do limite da região analisada.

Considerou-se uma sobrecarga acidental uniformemente distribuída de  $20 \text{ kPa}$ , como indicado pela NBR 11682 (ABNT, 2009), na faixa correspondente ao comprimento da estrutura.

O fator de segurança contra o escorregamento, foi de 1,5 conforme definido no Quadro 1, considerando o nível de segurança contra danos a vidas humanas e nível de segurança contra danos materiais e ambientais, alto.

O dimensionamento dos tirantes foi realizado de acordo com a NBR 5629 (ABNT, 2018) juntamente ao catálogo do fabricante (Anexo A). O espaçamento horizontal adotado ( $S_h$ ) foi de 1,5 m, as dimensões das placas de ancoragem foram definidas a partir da carga  $F_{adm}$  dos tirantes.

O comprimento do trecho ancorado foi dimensionado utilizando os métodos apresentados no item 2.5.4 e Quadro 4, adotando o maior valor entre os comprimentos obtidos.

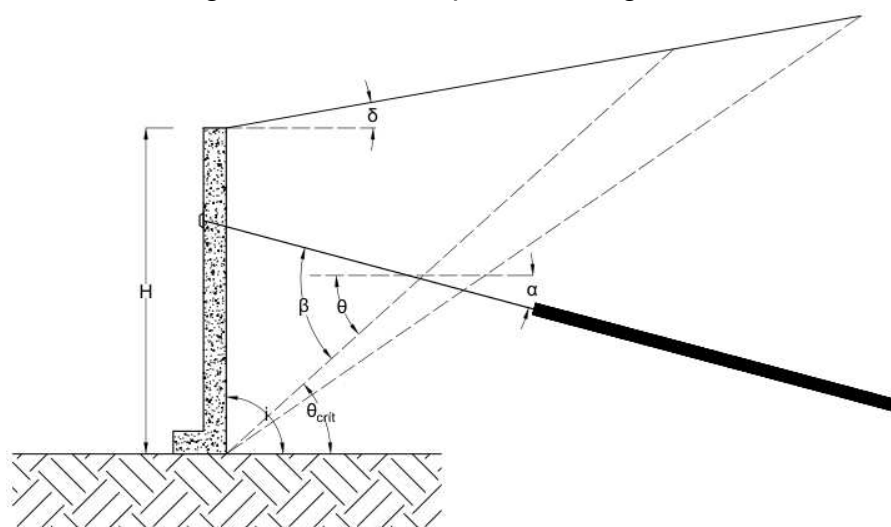
Neste estudo, por se tratar do dimensionamento de uma estrutura de contenção aplicável as mais variadas situações ambientais, pois interage diretamente com o solo, considerou-se:

- a classe de agressividade ambiental IV;
- cobertura nominal de 4,5 cm;
- classe do concreto C30 e aço CA-50.

### 3.2 ANÁLISE PELO MÉTODO BRASILEIRO

A partir dos parâmetros do solo descritos e da geometria da cortina apresentada na Figura 20, procedeu-se o dimensionamento geotécnico e estrutural da cortina, utilizando uma planilha no Excel para otimizar os cálculos, o *software* Ftool para análise dos momentos fletores atuantes no paramento e o *software* geotécnico GEO5 para análise de estabilidade. Considerou-se o solo com menor ângulo de atrito, menor peso específico e coesão, entre as camadas definidas.

Figura 20 - Cortina para talude genérico



Fonte: Autor (2023)

### 3.3 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL SIMPLIFICADO

Baseado nos valores máximos dos momentos fletores obtidos no Ftool para as vigas horizontal e vertical da cortina, dimensionou-se a armadura necessária para o paramento considerando-o como uma laje lisa, seguindo a NBR 6118 (ABNT, 2023), bem como a verificação à punção, estabelecendo as dimensões das placas de ancoragem, também de acordo com as dimensões mínimas indicadas definidas para este tipo de laje, uma vez que o comportamento das placas sobre o paramento é análogo ao de pilares.

Após o dimensionamento das armaduras contra a flexão, verificou-se o efeito da punção na cortina como estabelecido na NBR 6118 (ABNT, 2023), utilizando a ferramenta desenvolvida por Oliveira, (2023).

### 3.4 SOFTWARE GEO5

Desenvolvido pela empresa *FINE Engineering Software Ltd.* O software geotécnico GEO5 é um pacote de programas que fornece a solução para problemas geotécnicos. Neste projeto empregou-se o programa Estabilidade de taludes, que de acordo com o Guia de usuário Fine Ltd., (2018), é utilizado para realizar análises de estabilidade de taludes (aterros, escavações, estruturas de retenção ancoradas, muros de solo reforçado, etc.).

O programa utilizado apresenta interface simplificada na configuração e inserção dos parâmetros de solo, análise e saída de dados.

#### 3.4.1 Configurações e método de análise

O sistema de unidades métrico e dados da obra são inseridos na janela de projeto. Em seguida, na janela configurações, define-se a norma para a estrutura, o método de verificação, que, para este estudo utilizou-se a metodologia dos coeficientes de segurança, como consta no Quadro 5.

Quadro 5 - Configurações de análise

Metodologia de verificação	Fatores de segurança
Situação permanente	FS = 1,50
Análise	Bishop simplificado

Fonte: Autor (2023)

Nas etapas seguintes foram inseridos dados dos solos, geometria da contenção, do terreno, a sobrecarga e as ancoragens conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Detalhe das ancoragens

Tirante	Prof. z (m)	L livre (m)	L raiz (m)	$\alpha$ (°)	Sh (m)
T1	1,25	9,23	6,0	20	1,50
T2	3,75	6,38	6,0	20	1,50
T3	6,25	3,53	6,0	20	1,50

Fonte: Autor (2023)

### 3.4.2 Verificação de estabilidade

A análise de estabilidade externa é realizada no programa Estabilidade de taludes, no qual é possível executar as verificações através dos métodos de equilíbrio limite, Fellenius, Bishop Simplificado, entre outros disponíveis.

Os resultados obtidos nesse processo são: a soma das forças ativas ( $F_a$ ); soma das forças passivas ( $F_p$ ); momento de deslizamento ( $M_a$ ); momento resistente ( $M_p$ ) e o fator de segurança (FS).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo discute-se os resultados obtidos no dimensionamento geotécnico e projeto estrutural da cortina atirantada.

### 4.1 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

Com base nos parâmetros para as piores condições da camada de solo constante na Tabela 2, empregou-se a análise pelo método brasileiro para a cortina. Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 3 e na Figura 21.

Tabela 2 - Dados geotécnicos

Parâmetros do solo		Geometria do talude	
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,00	$i$ (°)	90
$c$ (kPa)	15,00	$\delta$ (°)	5
$\varphi$ (°)	21	$H$ (m)	7,5

Fonte: Autor (2023)

Tabela 3 - Memória de cálculo geotécnico

Parâmetro	Valor
$q$ (kPa)	20
$\theta_{crit}$ (°)	55,5
$l$ (m)	9,68
$W$ (kN/m)	500,45
$FS_{min}$	0,613
$\beta$ (°)	75,5
$\theta_{ac}$ (°)	29,67
$FS_{ac}$	1,500
$\lambda$	2,45
$F$ (kN/m)	288,77
$S_h$ (m)	1,5
$S_v$ (m)	2,5
$F_{adm}$ (kN)	200
$N_t$ (un)	2,17
$N_{adot}$ (un)	3
$L$ (m)	6,00
$\alpha$ (°)	20

Fonte: Autor (2023)

A força de protensão total, ( $F$ ), por metro de cortina, foi de  $288,77 \text{ kN/m}$ . Para o espaçamento horizontal, ( $S_h$ ) de  $1,5 \text{ m}$ , obteve-se 2,17 níveis de tirantes, foram adotados 3 níveis. Portanto, cada tirante recebe:  $F_t = (288,77 \text{ kN/m} \cdot 1,5 \text{ m})/3 = 144,39 \text{ kN}$ . Adotando um tirante do tipo monobarra para carga permanente, (Anexo A), selecionou-se o tirante “Inco 22D” que suporta a carga de  $F_{adm} = 200 \text{ kN}$  com placa de ancoragem de dimensões  $200 \times 200 \times 15,87 \text{ mm}$ .

De acordo como a NBR 5629 (ABNT, 2018), o tirante deve suportar a carga de  $1,75 \cdot F_t$ , portanto, a carga máxima é:  $F = 1,75 \cdot 200 \text{ kN} = 350 \text{ kN}$

Como a carga de máxima é de  $350 \text{ kN}$ , o esforço ortogonal é:  $F_{sd} = 1,4 \cdot 350 \text{ kN} \cdot \cos(20^\circ) = 461 \text{ kN}$ .

#### 4.1.1 Dimensionamento do bulbo de ancoragem

Definida a carga de trabalho dos tirantes, o comprimento do bulbo de ancoragem calculado pelos métodos apresentados no item 2.5.4 são descritos nos tópicos a seguir, considerando que estarão ancorados na camada de solo de Argila siltosa pouco arenosa,  $N_{spt} = 6$ .

- Bustamante e Doix (1985)

Para o esforço máximo,  $T_L = 350 \text{ kN}$ , diâmetro de perfuração,  $D_p = 0,15 \text{ m}$ ,  $\beta = 2$ , segundo a Tabela 1 e  $q_s = 100 \text{ kPa}$ , obtido na Figura 12, considerando reinjeção da calda de cimento, por meio das equações (6) e (7), tem-se:

$$D_s = 2 \cdot 0,15 \text{ m} = 0,3 \text{ m}$$

$$L_b = \frac{350 \text{ kN}}{\pi \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 100 \text{ kPa}} = 3,71 \text{ m}$$

- Joppert Jr.

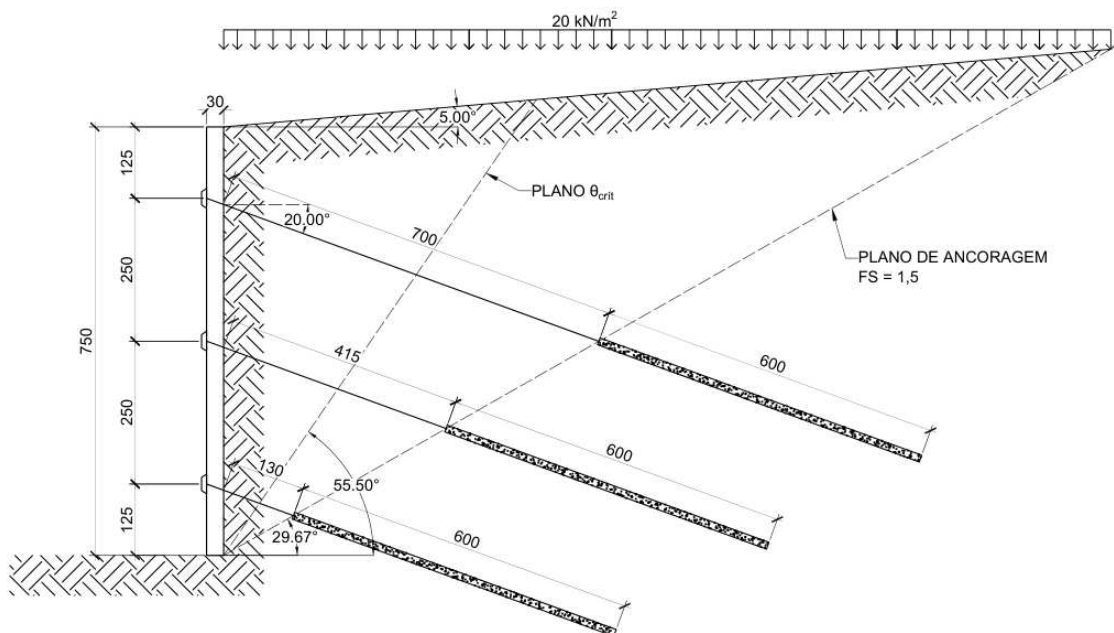
A carga de ruptura do tirante escolhido,  $R_{Rup} = 46,7 \text{ tf}$  de acordo com o fabricante (Anexo A), e  $k = 1 \frac{\text{tf}}{\text{m}^2}$ , para argila, pela equação (8), tem-se:

$$L = \frac{46,7 \text{ tf}}{9,2 \cdot 6 \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 1 \frac{\text{tf}}{\text{m}^2}} = 5,64 \text{ m}$$

Dados os valores obtidos, foi adotado o comprimento de 6,0 m para do bulbo de ancoragem.

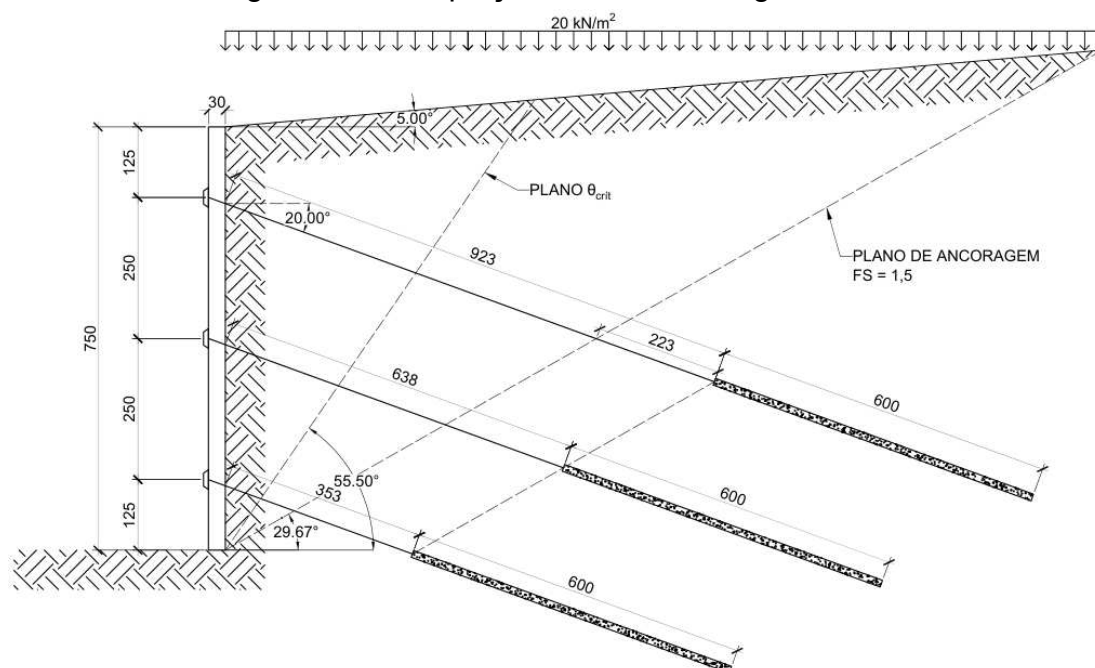
O comprimento livre do tirante T3, como apresentado na Figura 21, não atende ao mínimo de 3,0 m estabelecido na NBR 5629 (ABNT, 2018), para tirantes fixados por rosca. Em vista disso, os comprimentos resultantes indicados foram adequados como apresentado na Figura 22, atendendo as especificações da norma.

Figura 21 - Arranjo dos tirantes e geometria



Fonte: Autor (2023)

Figura 22 - Adequação dos tirantes e geometria



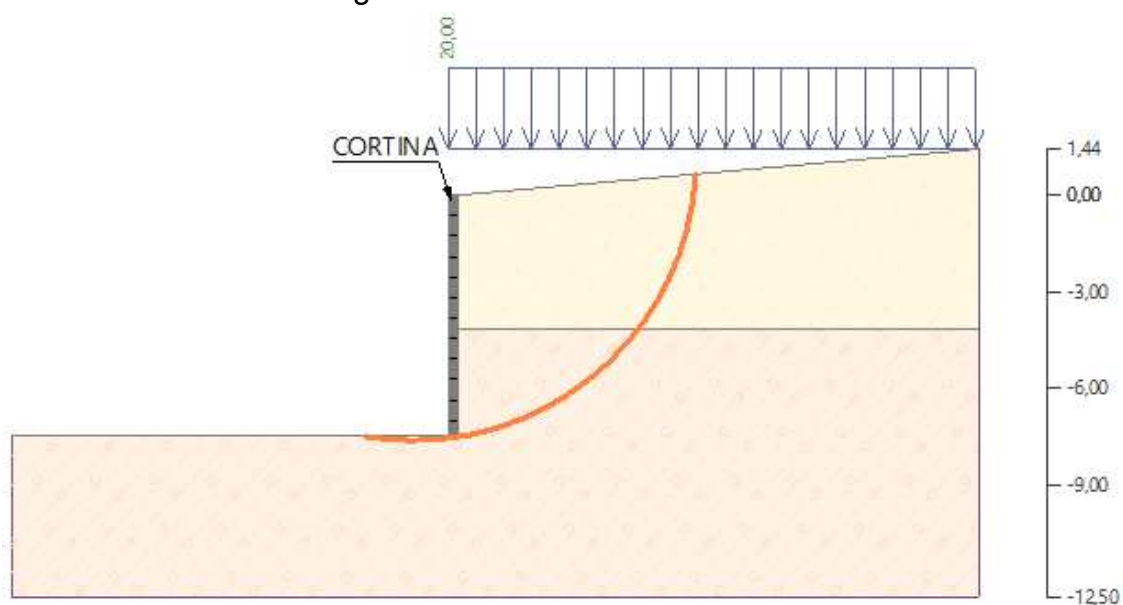
Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.2 Análise de estabilidade no GEO5

- Estabilidade externa

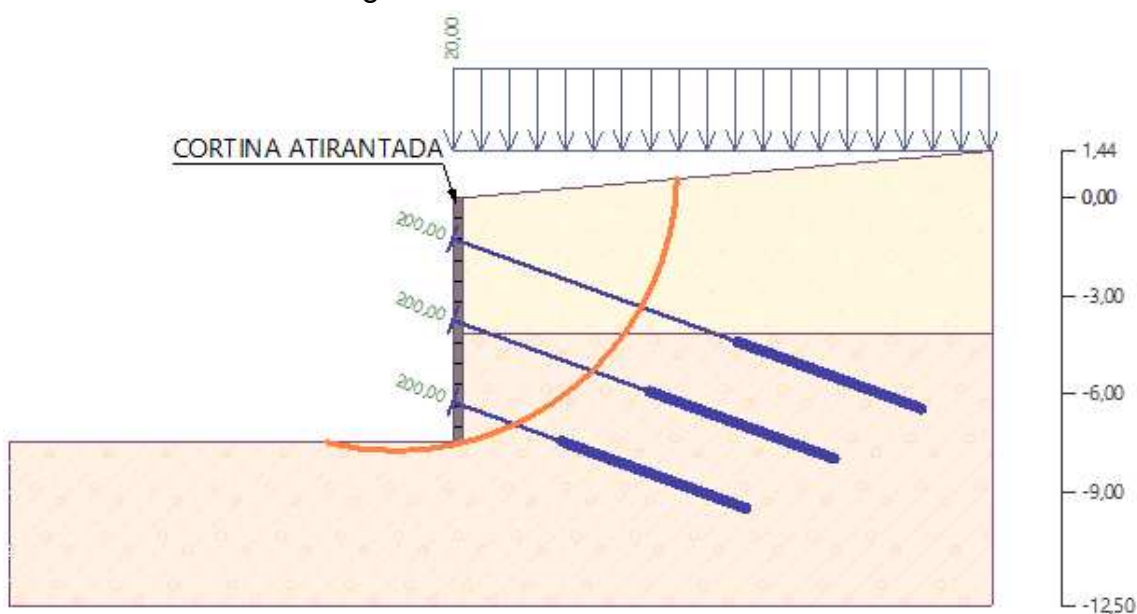
A verificação de estabilidade externa exibida na Tabela 4 foi executada pelo método de Bishop Simplificado descrito no item 2.1.2. Na configuração sem tirantes exibida na Figura 23, o fator de segurança calculado é inferior ao estabelecido pela NBR 11682 (ABNT, 2009) de 1,5 para superfícies com risco de escorregamento. Inseridos os tirantes adequados, o fator de segurança foi de 1,95, portanto, em conformidade com a norma.

Figura 23 - Estrutura sem tirantes



Fonte: Autor (2023)

Figura 24 - Estrutura com tirantes



Fonte: Autor (2023)

Tabela 4 - Verificação da estabilidade externa

Configuração	Análise	Fa (kN/m)	Fp (kN/m)	Ma (kNm/m)	Mp (kNm/m)	FS
Sem tirantes	Bishop	511,31	742,58	4678,48	6794,64	1,27
Com tirantes	Bishop	479,47	935,49	4123,44	8045,21	1,95

Fonte: Autor (2023)

#### 4.1.3 Dimensionamento estrutural processo simplificado

A quantidade de tirantes para o painel e carregamentos atuantes nas vigas são apresentados na Tabela 5, que juntamente com os dados considerados da Tabela 6, determinou-se os momentos fletores máximos para dimensionamento no programa Ftool, constantes no Apêndice B, e resumidos na Tabela 7.

Tabela 5 - Carregamento atuante

<b>N (un)</b>	<b>Q (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>q<sub>h</sub> (kN/m)</b>	<b>q<sub>v</sub> (kN/m)</b>
30	70,16	175,41	105,25

Fonte: Autor (2023)

Tabela 6 - Dados para o dimensionamento

<b>Dados</b>	<b>Valor</b>
<b>f<sub>ck</sub> (MPa)</b>	30
<b>f<sub>cd</sub> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	2,14
<b>f<sub>yk</sub> (MPa)</b>	500
<b>f<sub>yd</sub> (kN/cm<sup>2</sup>)</b>	43,48
<b>γ<sub>concreto</sub></b>	1,4
<b>γ<sub>aço</sub></b>	1,15
<b>bw (cm)</b>	100
<b>h (cm)</b>	30
<b>d' (cm)</b>	5
<b>d (cm)</b>	25

Fonte: Autor (2023)

Tabela 7 - Momentos máximos

<b>Viga</b>	<b>M<sub>d</sub><sup>+</sup> (kNm)</b>	<b>M<sub>d</sub><sup>-</sup> (kNm)</b>
<b>horizontal</b>	18,1	49,3
<b>vertical</b>	21,8	82,2

Fonte: Autor (2023)

Como estabelecido no item 2.6, os momentos fletores foram distribuídos por faixas internas e externas, como indicado na Tabela 8, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023).

Tabela 8 - Distribuição por faixas

Viga	Faixa	Armadura	Md (kN/m)
Horizontal	int	positiva	6,52
		negativa	9,86
	ext	positiva	7,96
		negativa	29,58
Vertical	int	positiva	7,85
		negativa	16,44
	ext	positiva	9,59
		negativa	49,32

Fonte: Autor (2023)

Dada a distribuição dos momentos, o dimensionamento da armadura de flexão é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensionamento das armaduras

Parâmetros	Viga horizontal		Viga vertical	
	M <sub>d</sub> <sup>+</sup>	M <sub>d</sub> <sup>-</sup>	M <sub>d</sub> <sup>+</sup>	M <sub>d</sub> <sup>-</sup>
<b>Momentos</b>	7,96 (kNm/m)	29,58 (kNm/m)	9,59 (kNm/m)	49,32 (kNm/m)
<b>μ</b>	0,007	0,026	0,008	0,043
<b>ξ</b>	0,009	0,033	0,011	0,055
<b>ρ<sub>min</sub> (%)</b>	0,15	0,15	0,15	0,15
<b>A<sub>s</sub>cal (cm<sup>2</sup>/m)</b>	0,74	2,76	0,414	4,64
<b>A<sub>s</sub>min (cm<sup>2</sup>/m)</b>	4,5	4,5	4,5	4,5
<b>A<sub>adot</sub> (cm<sup>2</sup>/m)</b>	4,5	4,50	4,5	4,64
<b>φ (mm)</b>	10	10	10	10
<b>A<sub>s1</sub> (cm<sup>2</sup>)</b>	0,79	0,79	0,79	0,79
<b>s (cm)</b>	17,45	17,45	17,453	16,93
<b>s<sub>adot</sub> (cm)</b>	17	17	17	17

Fonte: Autor (2023)

Adotando barras de 10,0 mm de diâmetro temos: para a direção horizontal e vertical, φ10,0 c/17 cm para a face livre, φ10 c/17 cm para a face em contato com o solo. Para as armaduras calculadas inferiores a armadura mínima, utilizou-se as A<sub>Smin</sub>.

O detalhamento da armadura é apresentado na prancha 01, no Apêndice C.

#### 4.1.4 Verificação do efeito de punção

A verificação do efeito da punção sobre a estrutura é essencial, haja vista a aplicação de protensão nos tirantes.

Usando a ferramenta *Easy Punc*, desenvolvida por Oliveira, (2023), considerando a placa de ancoragem como um pilar interno, verificou-se que não haverá esmagamento da diagonal comprimida, e há necessidade de armadura contra punção para a estrutura como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Efeito da punção

<b>Verificação da diagonal comprimida</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
$F$ (kN)	350
$F_{orto.}$ (kN)	461
$u_0$ (cm)	80
$\tau_{sd}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	0,21
$\tau_{rd2}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	0,51
<b>Verificação da necessidade de armadura de punção</b>	
$\rho$	0,0016
$u$ (cm)	419,29
$\tau_{sd}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	0,04
$\tau_{rd1}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	0,03
$A_{sw0}$ (cm <sup>2</sup> )	1,20

Fonte: *Easy Punc* (2023)



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal o dimensionamento estrutural de uma cortina atirantada, obtenção das cargas nos tirantes e suas especificações. A realização deste trabalho contribuiu para compreensão do projeto de contenção de solo, possibilitando aplicação do processo de cálculo simplificado.

Em relação ao dimensionamento dos tirantes, as cargas obtidas através do método desenvolvido por Costa Nunes para estabilização da cortina, permitiram selecionar o tirante correto de acordo com a NBR 5629 (ABNT, 2018), levando em conta o carregamento aplicado e sobrecarga acidental atuante, conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009).

Nas análises de verificação de estabilidade realizadas, o fator de segurança encontrado para estabilidade global, utilizando o método de Bishop simplificado foi de 1,95, atendendo ao critério do fator de segurança mínimo de 1,5 contra escorregamento.

Quanto ao dimensionamento estrutural simplificado da cortina, estabeleceu-se uma relação direta com a rotina de cálculo para a estrutura de laje lisa, armadura calculada para flexão e punção, dado o carregamento de protensão nos tirantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 11682:2009: Estabilidade de encostas**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2009.

ABNT. **NBR 5629:2018: Tirantes ancorados no terreno — Projeto e execução**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2018.

ABNT. **NBR 6118:2023: Projeto de estruturas de concreto**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2023.

AGUIAR, L. M. **Estudo de viabilidade técnica-econômica de estabilização de talude na cidade de São Luís-MA**. Trabalho de Conclusão de Curso—Pombal, PB: Universidade Federal de Campina Grande, 19 dez. 2022.

ALVES, L. DE L. **Análise para otimização dos custos de cortinas atirantadas**. Projeto de Graduação—Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de Concreto Armado vol 4**. Rio Grande, RS: editora dunas, 2014. v. 4.

CORRALES, L. A. G. **Análise comparativa da estabilidade interna de cortinas atirantadas utilizando métodos analíticos e simulações numéricas 2D**. Dissertação de Mestrado—Brasília, DF: Universidade de Brasília, 22 mar. 2018.

DAS, B.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 3ª edição ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2014.

DUTRA, V. A. DE S. **Projeto de estabilização de taludes e estruturas de contenção englobando dimensionamento geotécnico e estrutural**. Trabalho de Conclusão de Curso—Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, abr. 2013.

FAGUNDES, G. **Estudo de Dimensionamento e Execução de Obra de Contenção em Cortina Atirantada na Rodovia BR-116/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso—Joinville, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

FERNANDES, M. A. **Estudo dos mecanismos de instabilização em um talude de solo arenoso não saturado localizado na região Centro-Oeste paulista**. Tese (Doutorado)—São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 2016.

FERREIRA, J. V. **Projeto de contenção de talude com cortina atirantada**. Trabalho de Conclusão de Curso—Ilha Solteira, SP: Universidade Estadual Paulista, 2021.

FINE LTD. **GEO5: Guia de usuário**. , 2018. Disponível em: <[www.finesoftware.com.br](http://www.finesoftware.com.br)>. Acesso em: 26 set. 2023

GERSCOVICH, D.; DANZIGER, B. R.; SARAMAGO, R. **Contenções: Teoria e Aplicações em Obras**. 2ª edição ed. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, 2019.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2ª edição ed. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, 2016.

HACHICH, W. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed ed. São Paulo: Pini, 1998.

INFRASOLO ENGENHARIA. **Tirantes Protendidos**. *Infrasolo Engenharia*, 15 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.infrasoloengenharia.com.br/tirantes-protendidos/>>. Acesso em: 21 out. 2023

JOPPERT JÚNIOR, I. DE O. **Fundações e Contenções de Edifícios. Qualidade Total na Gestão do Projeto e Execução**. 1ª edição ed. São Paulo, SP: Pini, 2007.

LIMA, A. P. **Comportamento de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss**. Tese (Doutorado)—Rio de Janeiro, Brazil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 17 abr. 2007.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2ª edição ed. São Paulo, SP: Editora Oficina de Textos, 2010.

MENDES, F. B. **O uso de ferramenta computacional na avaliação e dimensionamento de cortina atirantada**. Dissertação de Mestrado—Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

MENDONÇA, A. K. **Estudo comparativo de duas estruturas de Contenção em uma obra em Goiânia/GO**. Trabalho de Conclusão de Curso—Goiânia, GO: Universidade Federal de Goiás, 2015.

OLIVEIRA, A. M. DE. **Dimensionamento geotécnico e estrutural de uma estrutura de contenção**. Trabalho de Conclusão de Curso—São Luís, MA: Universidade Federal do Maranhão, 2018.

OLIVEIRA, P. R. F. DE. **Desenvolvimento de rotina no excel para cálculo de armaduras de punção em lajes lisas com ou sem esforços de protensão**. Trabalho de Conclusão de Curso—Pombal, PB: Universidade Federal de Campina Grande, 7 fev. 2023.

OSEROW, A. C. **Dimensionamento de cortina atirantada na ers-235 km 35+300**. Trabalho de Conclusão de Curso—Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

PORTO, T. B. **Ancoragem em solos: comportamento geotécnico e metodologia via web para previsão e controle**. Tese (Doutorado)—Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

PRINZ, G. F. et al. **Aspectos a serem considerados na construção de cortinas atirantadas**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...** Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. ABMS, 2020. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0286.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2023

SANTOS, F. A. DOS. **Avaliação do desempenho de uma cortina de estacas espaçadas, atirantada, em areia.** Dissertação de Mestrado—Natal, RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 16 dez. 2013.

SILVA, H. O. W. DA. **Tirantes em estruturas de contenção de solo: diretrizes para projeto e execução.** Trabalho de Diplomação—Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

SOLOTRAT. **Tirantes.** Disponível em: <<https://www.solotrat.com.br/pdf/cortina-atirantada-solotrat.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2023a.

SOLOTRAT. **Protensão de Tirantes Monobarra.** Disponível em: <<https://www.solotrat.com.br/protensao-de-tirantes-monobarra.php>>. Acesso em: 21 out. 2023b.

## APÊNDICE A - DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO MÉTODO BRASILEIRO

### Parâmetros do solo

$$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)} = 19$$

$$c \text{ (kPa)} = 15$$

$$\varphi \text{ (}^\circ\text{)} = 21$$

### Geometria do talude

$$i \text{ (}^\circ\text{)} = 90$$

$$\delta \text{ (}^\circ\text{)} = 5$$

$$H \text{ (m)} = 7,5$$

$$C \text{ (m)} = 15$$

$$q \text{ (kPa)} = 20$$

$$\theta_{\text{crít}} \text{ (}^\circ\text{)} = 55,5$$

$$l \text{ (m)} = 9,68$$

$$W \text{ (kN/m)} = 500,45$$

### Talude e Tirante

$$\alpha \text{ (}^\circ\text{)} = 20$$

$$\beta \text{ (}^\circ\text{)} = 75,5$$

### Ângulo de ancoragem

$$\theta_{\text{ac}} \text{ (}^\circ\text{)} = 29,67$$

$$FS_{\text{ac}} = 1,500$$

$$\text{erro} = 0,000$$

### Dimensionamento dos tirantes

Inco 22D	Sistema	$F_{\text{adm}}$ (tf)
30 mm	Permanente	20

### Fator de segurança desejado

$$FS_{\text{desejado}} = 1,5$$

### Fator de segurança mínimo

$$FS_{\text{mín}} = 0,613$$

### Razão $\lambda$

$$\lambda = 2,45$$

### Força de protensão

$$F \text{ (kN/m)} = 288,77$$

### Número de tirantes

$$S_h \text{ (m)} = 1,5$$

$$S_v \text{ (m)} = 2,50$$

$$F_{\text{adm}} \text{ (kN)} = 200$$

$$N_t \text{ (un)} = 2,17$$

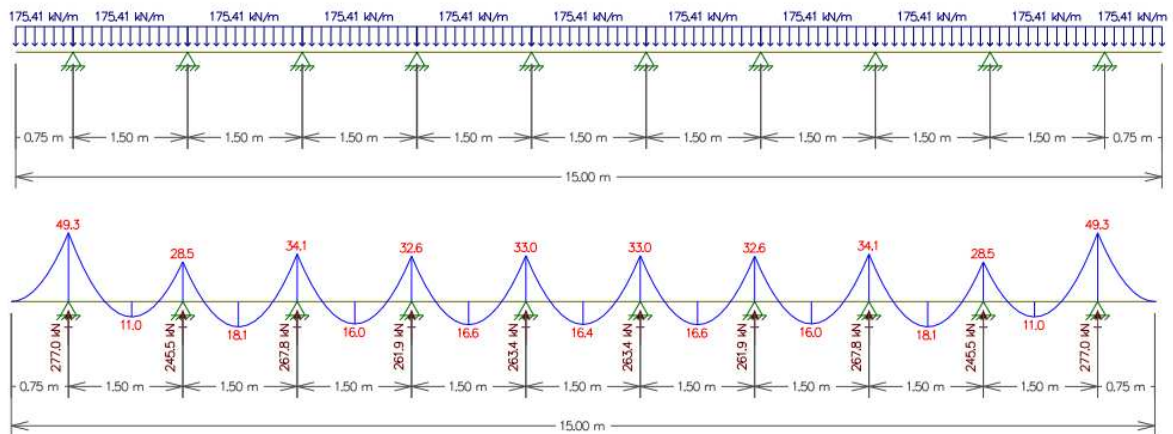
$$N_{\text{adot}} \text{ (un)} = 3$$

### Bulbo de ancoragem

$$L_a \text{ (m)} = 6,00$$

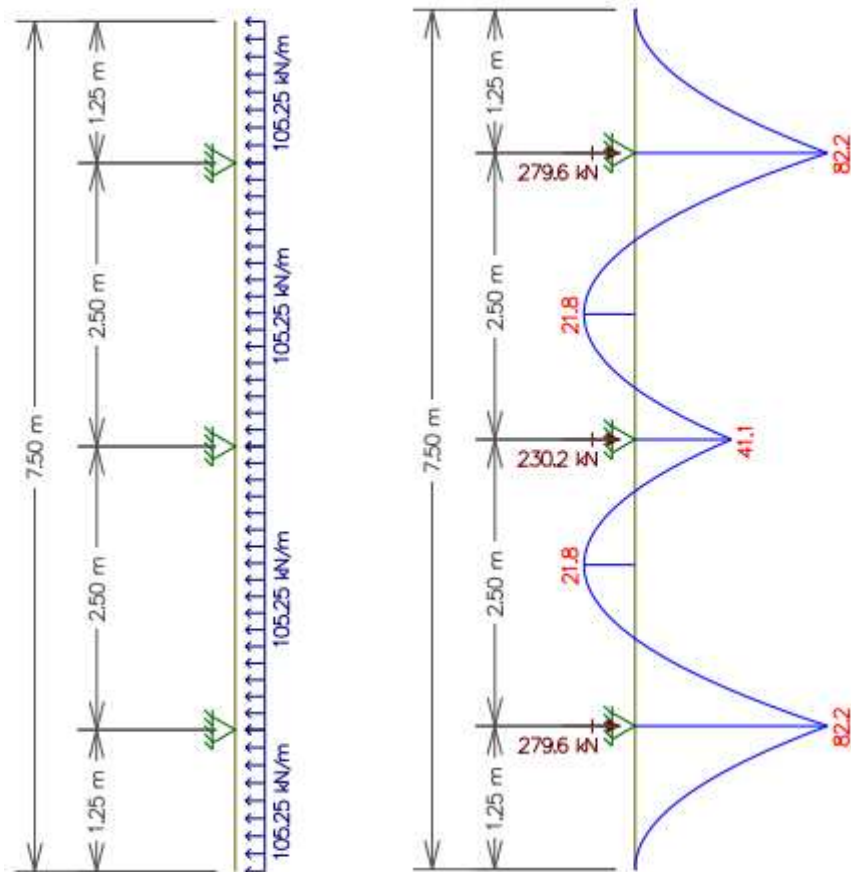
## APÊNDICE B - DIAGRAMAS DE MOMENTO FLETOR

Figura 25 - Carregamento e diagrama de momento fletor da viga horizontal



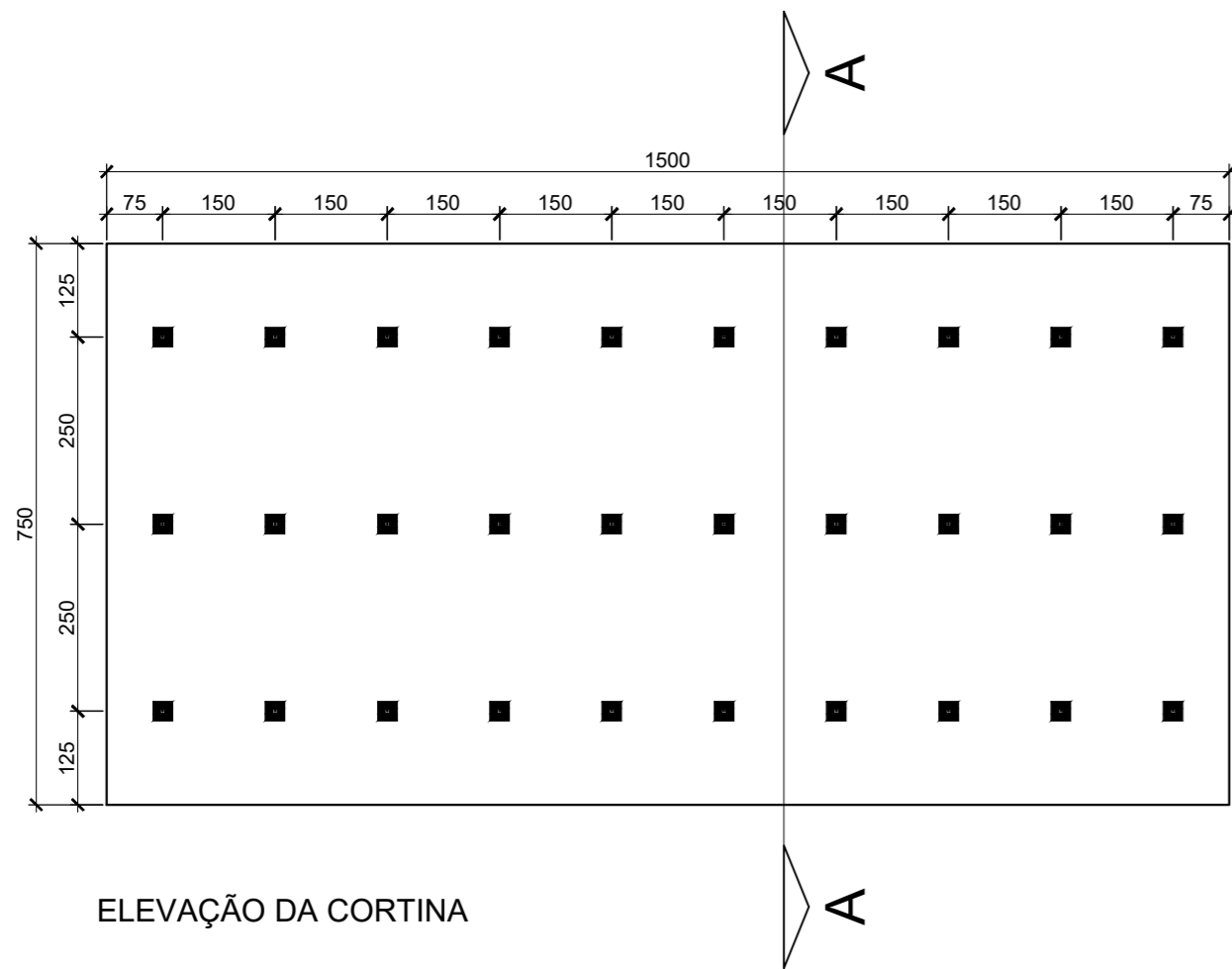
Fonte: Autor (2023)

Figura 26 - Carregamento e diagrama de momento fletor da viga vertical

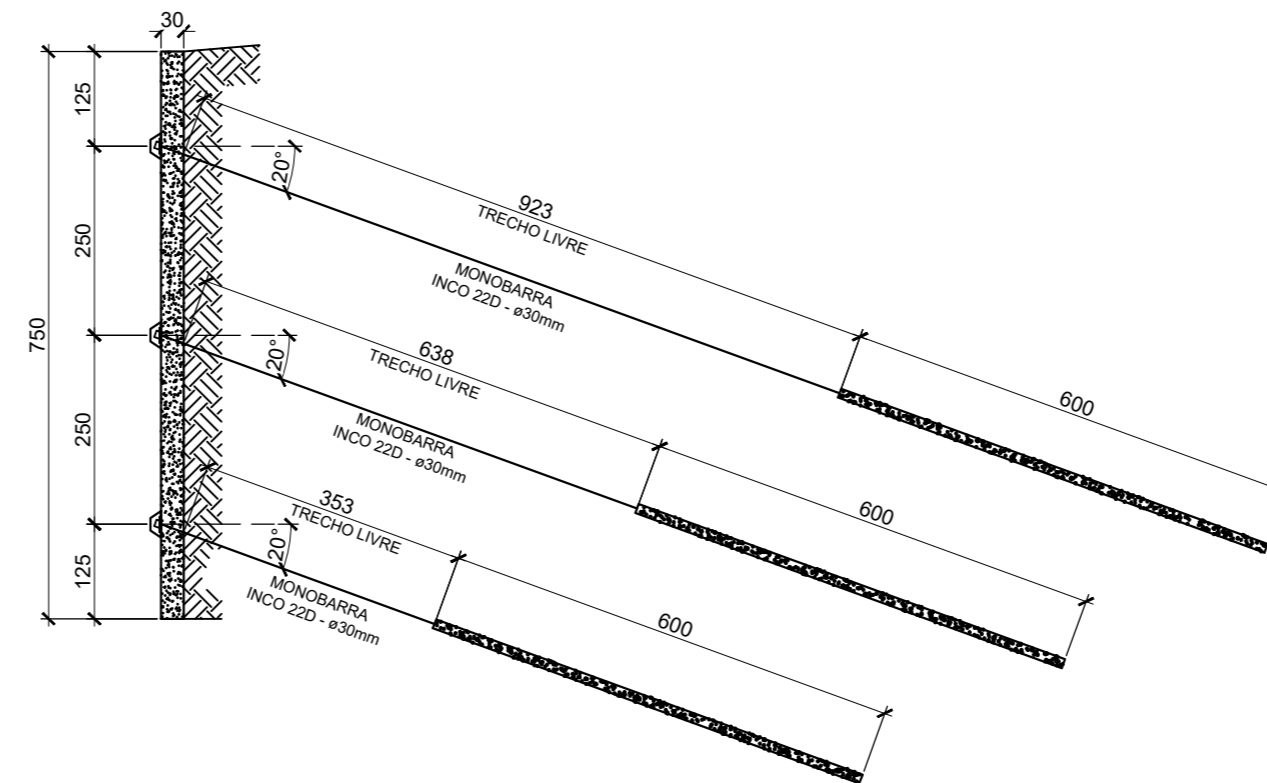


Fonte: Autor (2023)

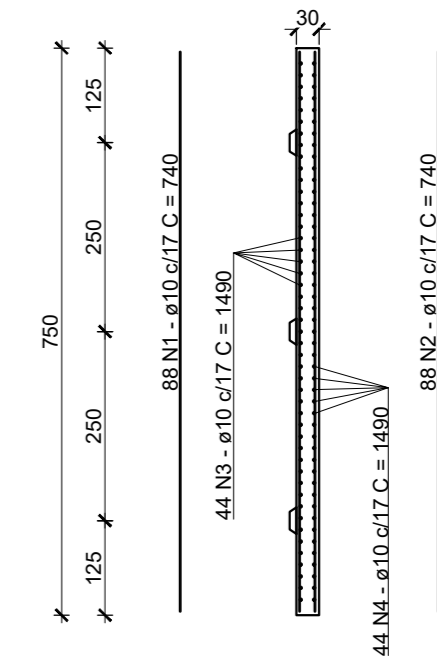
## APÊNDICE C - DETALHAMENTO DA ARMADURA



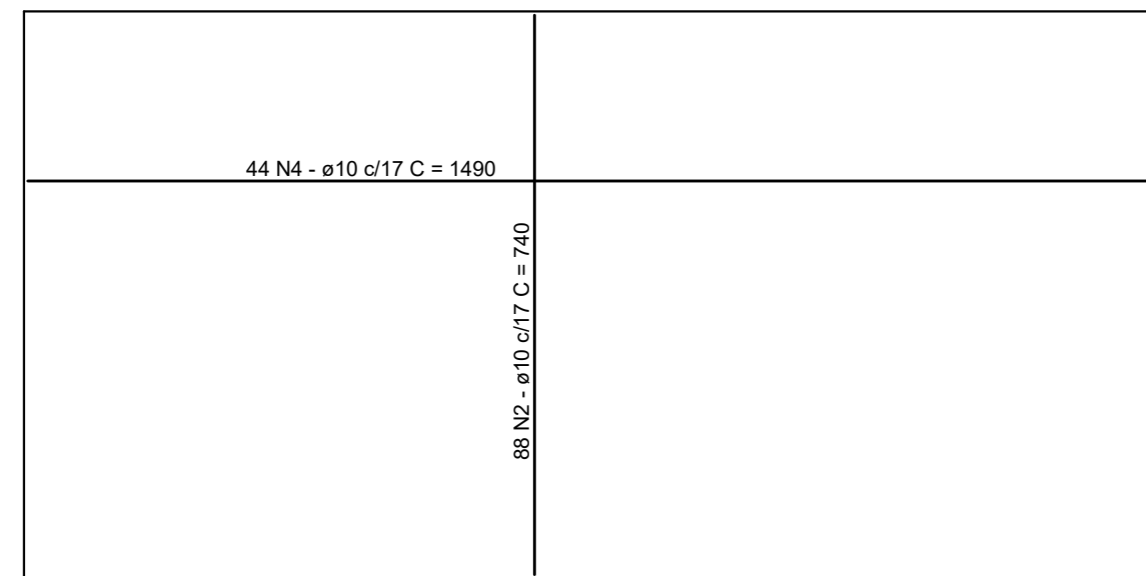
ELEVAÇÃO DA CORTINA



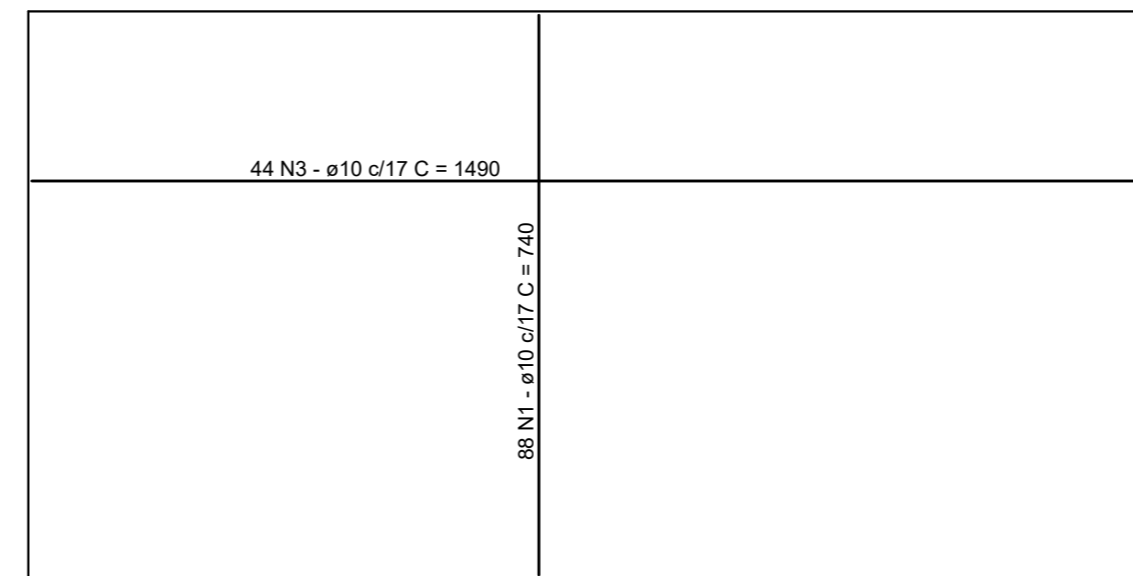
DETALHE ESQUEMÁTICO DA ANCORAGEM



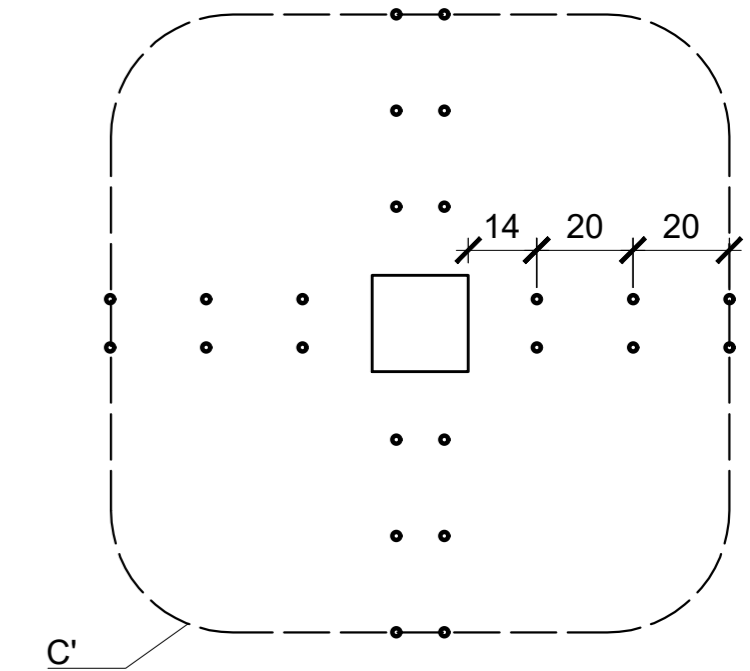
CORTE A-A (ARMAÇÃO)



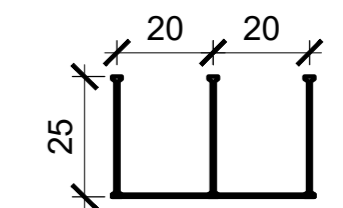
ARMADURA NEGATIVA (LADO DO SOLO)



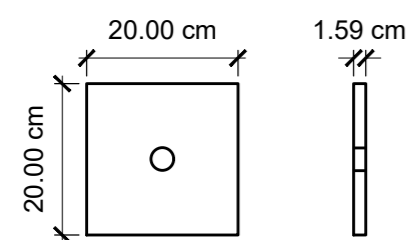
ARMADURA POSITIVA (LADO LIVRE)



ARMADURA CONTRA PUNÇÃO



CONNECTORES DE ø10.0



PLACA DE ANCORAGEM

Tirante	Tipo	Diâmetro	Área	Quantidade	Carga de escoamento	Carga de ruptura	Carga de trabalho conforme ABNT NBR 5629 (2018)			
							Ensaio	Permanente	Provisória	Prova de carga
Monobarra	Inco 22D ou similar	30 mm	648 mm <sup>2</sup>	30	38,9 tf	46,7 tf	35 tf	20 tf	23 tf	29,2 tf



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR

PROJETO: DIMENSIONAMENTO DE CORTINA ATIRANTADA	ESCALA: 1/100
RESPONSÁVEL TÉCNICO: LUCAS WESLEY DE SOUZA ARRUDA	Nº: 01/01
DESCRIÇÃO: DETALHAMENTO ESTRUTURAL DO PAINEL	



## ANEXO A - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS TIRANTES MONOBARRAS

Tabela 11 - Tirantes monobarra incotep

Tirante Monobarra	Diâmetro		Área [mm <sup>2</sup> ]	Massa Linear [kg/m]	Propriedades Mecânicas Mínimas [kgf/mm <sup>2</sup> ]		Cargas [tf]					
	Nominal D [mm]	Efetivo [mm]			Limite de escoamento	Limite de ruptura	Cargas Limites		Trabalho Conforme norma ABNT NBR 5629:2018			
							Carga de escoamento	Carga de Ruptura	Ensaio	Permanente	Provisória	Prova de Carga
Inco 22D	30	28,7	648	5	60	72	38,9	46,7	35	20	23	29,2
Inco 35D	40	38	1134	9	60	72	68,1	81,7	61	35	41	51,1
Inco 45D	44	41	1319	10,5	68	87	89,7	114,7	81	46	54	67,3
Inco 50D	50	45,9	1653	14,1	60	72	99,2	119	89	51	60	74,4
Inco 60D	53	49,8	1944	16	60	72	116,7	140	105	60	70	87,5
Inco 70D	57	53,7	2269	18,1	60	72	136,1	163,3	123	70	82	102,1
Inco 90D	63	60,9	2917	22,6	60	72	175	210	158	90	105	131,3
Inco 100D	69	64,2	3241	27,4	60	72	194,4	233,3	175	100	117	145,8

Fonte: incotep.com.br (2023)