

**LARISSA BICUDO SOARES ABBAS**

**Análise estrutural e geotécnica de uma contenção de talude: Estudo de caso**

**Larissa Bicudo Soares Abbas**

**Análise estrutural e geotécnica de uma contenção de talude: Estudo de caso**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Guaratinguetá - SP  
2018

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A122a | <p>Abbas, Larissa Bicudo Soares</p> <p>Análise estrutural e geotécnica de uma contenção de talude: estudo de caso / Larissa Bicudo Soares Abbas – Guaratinguetá, 2018.</p> <p>74 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 70-71</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes</p> <p>1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Taludes (Mecânica do solo).<br/>3. Geologia estrutural. I. Título.</p> <p>CDU 551.243</p> |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

**LARISSA BICUDO SOARES ABBAS**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM NOME DO CURSO"

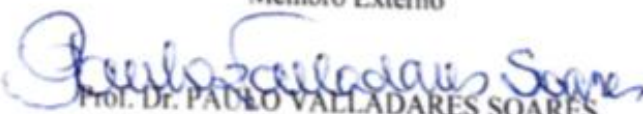
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

  
Prof.ª Dr.ª MARCIA REGINA DE FREITAS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES  
Orientador/UNESP-FEG- VOLUNTÁRIO

  
Prof.ª Dr.ª MARIANA F. BENESSIUTI MOTTA  
Membro Externo

  
Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES  
UNESP- FEG

Dezembro 2018

Dedico este trabalho, com saudades, ao meu  
avô Edson Edenei Soares (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida e pela constante proteção ao longo da minha trajetória.

À minha família pela educação que me foi dada, pelo amor e amparo em todas as fases de minha vida. Principalmente aos meus pais, pela oportunidade de estudar exclusivamente e por todo o apoio para chegar até aqui.

Ao meu pai, Nasie Mohamed Abbas, engenheiro formado pela FEG em 1988 na primeira turma de Engenharia Civil, por ser meu maior exemplo e referência profissional. Agradeço pelo esforço e auxílio para que a finalização deste trabalho fosse possível e pela parceria e confiança em minha capacidade em todas as situações pessoais e profissionais.

À empresa CLM Construções e Empreendimentos Imobiliários por viabilizar a realização deste estudo de caso.

À empresa ZF & Engenheiros Associados pelo apoio oferecido, em especial aos engenheiros Marco Aurélio de Oliveira e Bruno Abrahão de Barros pela dedicação e interesse em acompanhar a execução deste trabalho.

À equipe de funcionários e docentes da FEG que contribuíram positivamente para minha formação, principalmente ao meu orientador, professor George de Paula Bernardes, por sua orientação e auxílio ao longo da confecção deste trabalho.

À República das Ursas por terem me acolhido e se tornado minha segunda família ao longo da graduação. Por terem trazido conforto e segurança enquanto estava longe de minha cidade natal.

À Lobateria por toda a distração e diversão, pelas conquistas, pelos incríveis momentos passados juntos e por terem me proporcionado um enorme crescimento pessoal paralelo às atividades acadêmicas.

Aos amigos da FEG por terem feito essa jornada mais leve e aos amigos externos à graduação pelo apoio e compreensão e por se manterem presentes mesmo que à distância.

## RESUMO

O desenvolvimento urbano gera maior demanda por espaço para construir, muitas vezes sendo necessário alterar a topografia de terrenos para que se adequem aos projetos concebidos. Este trabalho contém uma análise estrutural e geotécnica da estabilidade de um talude escavado para a execução de dois pavimentos de subsolo de um edifício residencial na zona leste da cidade de São Paulo, contando com tubulões a céu aberto, tirantes e solo grampeado para conter o carregamento horizontal proveniente do maciço de solo. Apresenta-se o dimensionamento estrutural de um tubulão a céu aberto utilizando o método de Blum e o software FTool. Já a análise geotécnica de estabilidade global foi realizada em diferentes etapas de escavação para duas seções da estrutura de contenção segundo o método de Bishop Simplificado através do software Slide da plataforma Rocscience. O dimensionamento estrutural resultou em um tubulão de 14 metros de altura e 1 metro de diâmetro com armadura composta por 13 barras de aço CA50 de 20mm de diâmetro. Os resultados obtidos na análise de estabilidade global mostram que a segurança da contenção do talude está garantida com base na normatização brasileira, com fator de segurança dentro da faixa aceitável, ou seja, maior que 1,50, em ambas as seções estudadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tubulões a céu aberto. Carregamento horizontal. Tirante. Solo grampeado. Estabilidade de talude.

## **ABSTRACT**

Urban development generates greater demand for space to build, often being necessary to change the topography of land to suit the projects designed. This work presents the slope stability analysis of an excavated for the execution of two underground floors of a residential building in the eastern part of the city of São Paulo, with caissons, grouted tieback and soil nailing to contain the horizontal loading from the massive soil. The structural design of a caisson using the Blum method and the FTool software is presented. The geotechnical analysis of global stability was performed in different stages of excavation for two sections of the containment structure according to the Simplified Bishop method through the software Slide of the Rocscience platform. The structural design resulted in a 14 meter high and 1 meter diameter caisson with reinforcement composed of 13 bars of CA50 steel of 20mm in diameter. The results obtained in the global stability analysis show that the safety of slope containment is guaranteed based on Brazilian standardization, since a safety factor was obtained within the acceptable range, that is, greater than 1.50, in both sections studied

**KEYWORDS:** Caissons. Horizontal loading. Grouted tieback. Soil nailing. Slope stability.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Equipamentos para execução de sondagem a percussão.....                     | 17 |
| Figura 2 – Tubulões.....                                                               | 21 |
| Figura 3 – Partes constitutivas do tirante.....                                        | 22 |
| Figura 4 – Estabilidade global.....                                                    | 23 |
| Figura 5 – Fases construtivas de solo grampeado em corte com equipamentos pesados..... | 24 |
| Figura 6 – Partes constitutivas de um chumbador.....                                   | 25 |
| Figura 7 – Arranjo de equipe e equipamento para concreto projetado por via seca.....   | 26 |
| Figura 8 – Empuxo em estruturas de contenção.....                                      | 27 |
| Figura 9 – Método das fatias.....                                                      | 31 |
| Figura 10 – Esforços na fatia n.....                                                   | 32 |
| Figura 11 – Empuxos atuantes em cortina em balanço.....                                | 34 |
| Figura 12 – Cortina atirantada com extremidade inferior apoiada.....                   | 35 |
| Figura 13 – Formato do ábaco de Walter Pfeil.....                                      | 36 |
| Figura 14 – Corte do edifício.....                                                     | 40 |
| Figura 15 – Levantamento topográfico.....                                              | 41 |
| Figura 16 – Topografia final.....                                                      | 42 |
| Figura 17 – Escavação provisória.....                                                  | 43 |
| Figura 18 – Elevação da contenção do talude.....                                       | 43 |
| Figura 19 – Escavação manual dos tubulões.....                                         | 44 |
| Figura 20 – Concretagem dos tubulões.....                                              | 44 |
| Figura 21 – Detalhe para armação dos tubulões.....                                     | 45 |
| Figura 22 – Execução da viga de coroamento dos tubulões.....                           | 46 |
| Figura 23 – Tubulões finalizados.....                                                  | 46 |
| Figura 24 – Posicionamento dos tirantes entre os tubulões.....                         | 47 |
| Figura 25 – Detalhe da cabeça do tirante permanente.....                               | 48 |
| Figura 26 – Tirantes executados.....                                                   | 48 |
| Figura 27 – Detalhe do solo grampeado.....                                             | 49 |
| Figura 28 – Escavação para implantação de solo grampeado.....                          | 49 |
| Figura 29 – Execução do concreto projetado em solo grampeado.....                      | 50 |
| Figura 30 – Detalhe do dreno horizontal profundo.....                                  | 50 |
| Figura 31 – Visão geral da contenção do talude sendo executada.....                    | 51 |
| Figura 32 – Seções de estudo.....                                                      | 53 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 33 – Diagrama de tensões horizontais para a primeira escavação .....       | 55 |
| Figura 34 – Diagrama de momento fletor da primeira escavação .....                | 56 |
| Figura 35 – Diagrama de tensões horizontais para a segunda escavação .....        | 57 |
| Figura 36 – Diagrama de empuxo ativo regularizado da segunda escavação .....      | 57 |
| Figura 37 – Diagrama de momento fletor da segunda escavação .....                 | 58 |
| Figura 38 – Diagrama de tensões horizontais para a terceira escavação .....       | 58 |
| Figura 39 – Diagrama de empuxo ativo regularizado da terceira escavação .....     | 59 |
| Figura 40 – Diagrama de momento fletor da terceira escavação .....                | 59 |
| Figura 41 – Seção AA para análise de estabilidade global do talude.....           | 61 |
| Figura 42 – Estabilidade global do talude original na seção AA .....              | 62 |
| Figura 43 – Estabilidade global do talude escavado na seção AA .....              | 62 |
| Figura 44 – Contenção do talude escavado na seção AA.....                         | 63 |
| Figura 45 – Estabilidade global da contenção do talude escavado na seção AA ..... | 63 |
| Figura 46 – Seção BB para análise de estabilidade global do talude .....          | 64 |
| Figura 47 – Estabilidade global do talude original na seção BB.....               | 65 |
| Figura 48 – Estabilidade global do talude escavado na seção BB.....               | 65 |
| Figura 49 – Contenção do talude escavado na seção BB .....                        | 66 |
| Figura 50 – Estabilidade global da contenção do talude escavado na seção BB.....  | 66 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Estados de compacidade e de consistência .....                                | 18 |
| Tabela 2 – Correlação entre o $N_{SPT}$ e os parâmetros do solo .....                    | 19 |
| Tabela 3 – Coeficiente de empuxo e ângulo de ruptura para os casos ativo e passivo ..... | 29 |
| Tabela 4 – Padrões de segurança quanto à utilização de modelos matemáticos .....         | 31 |
| Tabela 5 – Dimensões dos tirantes .....                                                  | 47 |
| Tabela 6 – Estabilidade global das etapas de escavação na seção AA .....                 | 64 |
| Tabela 7 – Estabilidade global das etapas de escavação na seção BB .....                 | 67 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR Norma Brasileira

SPT Standart Penetration Test (Ensaio de Penetração Dinâmica de Simples Reconhecimento)

## SUMÁRIO

|          |                                                  |    |
|----------|--------------------------------------------------|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                | 13 |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b>                                 | 14 |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                     | 15 |
| 3.1      | INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA                          | 15 |
| 3.1.1    | Standard Penetration Test (SPT)                  | 16 |
| 3.1.2    | Parâmetros de resistência do solo                | 19 |
| 3.2      | ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO                          | 20 |
| 3.2.1    | Tubulões a céu aberto                            | 20 |
| 3.2.2    | Tirantes                                         | 22 |
| 3.2.3    | Solo grampeado                                   | 24 |
| 3.3      | EMPUXOS DE TERRA                                 | 26 |
| 3.3.1    | Empuxo no repouso                                | 27 |
| 3.3.2    | Empuxo ativo e passivo                           | 27 |
| 3.3.3    | Estado de equilíbrio plástico                    | 28 |
| 3.3.4    | Teoria de Rankine                                | 28 |
| 3.4      | ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES               | 30 |
| 3.4.1    | Métodos de equilíbrio limite                     | 30 |
| 3.4.1.1  | Método de Fellenius                              | 32 |
| 3.4.1.2  | Método de Bishop Simplificado                    | 32 |
| 3.5      | DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS                   | 33 |
| 3.5.1    | Tubulões a céu aberto carregados horizontalmente | 33 |
| 3.5.1.1  | Cortina em balanço                               | 34 |
| 3.5.1.2  | Cortina atirantada                               | 35 |
| 3.5.1.3  | Taxa de armadura                                 | 36 |
| 3.5.2    | Tirantes                                         | 37 |
| 3.5.3    | Solo grampeado                                   | 38 |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                       | 40 |
| 4.1      | PROJETO ARQUITETÔNICO                            | 40 |
| 4.2      | SONDAGENS                                        | 41 |
| 4.3      | TOPOGRAFIA                                       | 41 |
| 4.4      | PROJETO DA CONTENÇÃO                             | 41 |
| 4.4.1    | Tubulões a céu aberto                            | 44 |

|       |                                             |    |
|-------|---------------------------------------------|----|
| 4.4.2 | <b>Tirantes</b> .....                       | 47 |
| 4.4.3 | <b>Solo grampeado</b> .....                 | 48 |
| 4.4.4 | <b>Sequência executiva</b> .....            | 51 |
| 4.5   | <b>SOFTWARES UTILIZADOS</b> .....           | 51 |
| 4.5.1 | <b>FTool</b> .....                          | 51 |
| 4.5.2 | <b>Slide</b> .....                          | 52 |
| 5     | <b>ESTUDO DE CASO</b> .....                 | 53 |
| 5.1   | <b>PARÂMETROS DO SOLO</b> .....             | 54 |
| 5.2   | <b>DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL</b> .....     | 54 |
| 5.2.1 | <b>Cortina em balanço</b> .....             | 55 |
| 5.2.2 | <b>Cortina atirantada</b> .....             | 56 |
| 5.2.3 | <b>Taxa de armadura</b> .....               | 60 |
| 5.3   | <b>ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL</b> ..... | 61 |
| 5.3.1 | <b>Seção AA</b> .....                       | 61 |
| 5.3.2 | <b>Seção BB</b> .....                       | 64 |
| 6     | <b>CONCLUSÃO</b> .....                      | 68 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                    | 70 |
|       | <b>ANEXOS</b> .....                         | 72 |

## 1 INTRODUÇÃO

Um impasse enfrentado pela engenharia civil é administrar o aumento da demanda por novas edificações e a relativa diminuição de espaço disponível, principalmente nos grandes centros, devido ao crescimento e desenvolvimento urbano e populacional. Por isso, nesse contexto muitas vezes faz-se necessário implantar soluções de engenharia que envolvem a geotécnica.

Uma situação que pode ser encontrada é a necessidade de adequar o relevo da região onde será feita uma obra de construção civil. Ao se deparar por exemplo com a existência de um talude, deve-se avaliar e garantir sua estabilidade e, conseqüentemente, a segurança dos usuários do local.

Segundo DAS (2007), talude é uma superfície de solo exposta que forma um ângulo com a superfície horizontal, podendo ser natural ou artificial. A ABNT NBR 11682 (1991) classifica os taludes em naturais quando originados exclusivamente pela ação da natureza, e artificiais quando formados ou modificados por interferência humana.

Em alguns casos é preciso realizar cortes ou escavações em taludes para disponibilizar espaço para uma obra. A escavação de talude para implantação de subsolo de edifícios residenciais ou comerciais é necessária em muitas vezes, principalmente em grandes centros urbanos. Obras de contenção são comumente utilizadas para a estabilização de taludes artificiais e consistem em estruturas que oferecem resistência contra a movimentação ou ruptura do talude, suportando tanto o carregamento vertical descarregado pela construção, quanto o carregamento horizontal proveniente da massa de solo contida.

Para encontrar uma boa solução para a contenção de talude é fundamental levar em conta questões geotécnicas, estruturais e executivas. É necessário um estudo minucioso por meio de investigação geotécnica a fim de conhecer a composição e o comportamento do solo da região. Além disso, também são importantes as informações a respeito da estrutura que se pretende implantar, como seu dimensionamento e método executivo.

Visto que muitas podem ser as alternativas para a contenção de um talude levando em conta os critérios citados acima, este trabalho propõe a análise estrutural e geotécnica da solução dada como melhor opção no caso de um talude escavado na zona leste da cidade de São Paulo, cuja contenção é composta por tubulões a céu aberto, tirantes e solo grampeado.

## **2 OBJETIVOS**

O presente trabalho visa analisar do ponto de vista estrutural e geotécnico a contenção de um talude escavado para a execução de dois pavimentos de subsolo de um edifício residencial. Para isso, são colocados os objetivos específicos apresentados a seguir:

- Apresentar especificações para dimensionamento estrutural de tubulões a céu aberto, tirantes e solo grampeado;
- Apresentar conceitos para análise de estabilidade de taludes;
- Apresentar o material referente ao projeto estudado;
- Apresentar os métodos utilizados na análise;
- Definir os parâmetros geotécnicos do solo;
- Dimensionar estruturalmente um tubulão a céu aberto atirantado carregado horizontalmente;
- Analisar a estabilidade global do talude em duas seções.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

O primeiro passo para um projeto geotécnico é a investigação do subsolo para o reconhecimento de suas características como o tipo de solo em diversas profundidades, a resistência de cada camada do subsolo e a posição do lençol freático. CAPUTO (1988) frisa a importância de iniciar uma obra após obter o melhor conhecimento possível a respeito do terreno de fundação, afim de minimizar riscos ao prever e adotar medidas que evitem o colapso da obra.

Para VELLOSO & LOPES (2010), a investigação do subsolo para fins de projeto de fundações deve ser dividida em três etapas: preliminar, complementar e executiva. Na etapa preliminar são executadas em geral apenas sondagens à percussão para reconhecimento das principais características do subsolo. A investigação complementar tem o objetivo de determinar as propriedades mais importantes do solo em cada caso, com a realização de outros ensaios de campo e de laboratório. A investigação para a fase de execução deve confirmar as condições de projeto na prática.

Com interpretação adequada dos resultados, a investigação geotécnica contribui para a diminuição de erros e redução de custos adicionais com alterações de projeto ou remediações pós-construtivas. No Brasil, o custo de sondagens de reconhecimento geralmente é de 0,2% a 0,5% do custo total de obras convencionais. Investigações não satisfatórias podem levar a atrasos no cronograma que, por sua vez, podem gerar custos superiores aos valores que teriam sido despendidos em procedimentos eficientes (SCHNAID & ODEBRECHT, 2012).

De acordo com CAPUTO (1988) existem sempre três partes interessadas em uma obra, que devem trabalhar em conjunto em prol de um bom resultado. Tais interessados são o proprietário, o projetista e o construtor, cada um tendo sua parcela de responsabilidade. A eficiência da investigação geotécnica é vantajosa para todos, uma vez que pode evitar desperdício de recursos financeiros e de tempo, fornece melhores informações ao projeto e facilita a execução de métodos construtivos ao promover um bom reconhecimento do subsolo.

Para a execução de fundações, a ABNT NBR 6122 (2010) torna indispensável a realização de sondagem de simples reconhecimento a percussão para determinar a estratigrafia e classificar o solo, conhecer a posição do nível d'água e medir o índice de resistência à penetração,  $N_{SPT}$ . Outras sondagens mecânicas e ensaios de campo podem ser feitos conforme necessidade.

A ABNT NBR 8044 (1983) lista procedimentos que podem ser realizados, tanto em campo quanto em laboratório, para classificação e determinação dos parâmetros do solo e de sua estratigrafia. A investigação geotécnica envolve uma ou mais das atividades descritas pela norma, a depender das características do meio físico, complexidade da obra e riscos envolvidos.

Quanto ao projeto de fundações, ALONSO (1991) diz que os ensaios de campo são mais recomendados do que os de laboratório, por não dependerem da qualidade das amostras recolhidas. Segundo ele, o projeto de fundações vai desde as investigações do subsolo até o término da execução da fundação, portanto é de suma importância que todas as etapas tenham um bom projeto, execução e controle da qualidade.

Embora já existam novos e modernos equipamentos de investigação capazes de obter rapidamente informações detalhadas do subsolo em diversas condições, ainda são muito utilizados procedimentos tradicionais como o ensaio SPT. No Brasil costuma-se realizar com maior frequência os ensaios SPT, cone, piezocone, pressiômetro, palheta e dilatômetro. A escolha do ensaio deve ser feita com base nas características gerais do solo e nas propriedades que se deseja obter, dependendo da complexidade da obra a ser realizada (SCHNAID & ODEBRECHT, 2012).

### **3.1.1 Standard Penetration Test (SPT)**

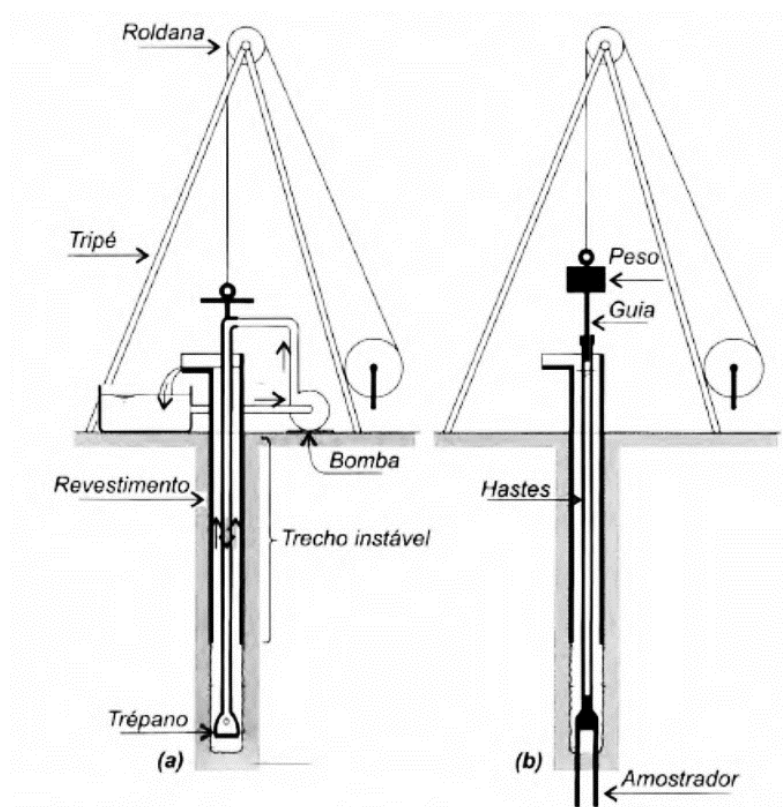
A sondagem à percussão associada ao ensaio de penetração dinâmica (SPT) é utilizada amplamente no Brasil por ser de simples execução e baixo custo, fornecendo resultados úteis para a engenharia. Através do ensaio SPT é possível determinar em campo a posição do nível d'água, o tipo de solo e suas respectivas profundidades de ocorrência, o índice de resistência a cada metro do perfil e obter amostras para ensaios de laboratório a fim de determinar parâmetros como granulometria, teor de umidade, cor e presença de matéria orgânica (QUARESMA et al., 1998; SCHNAID & ODEBRECHT, 2012)

A ABNT NBR 6484 (2001) regulamenta o ensaio, especificando os equipamentos e procedimentos necessários. O ensaio consiste basicamente em um furo, aberto para a cravação de um amostrador de 45cm a cada metro de solo utilizando a queda do martelo sobre uma cabeça de bater, anotando o número de golpes necessário para cravar cada 15cm do amostrador e recolhendo amostras de solo (QUARESMA et al., 1998; VELLOSO & LOPES, 2010). A Figura 1, apresentada a seguir, representa os equipamentos para a realização do ensaio.

O valor do índice de resistência à penetração,  $N_{SPT}$ , é determinado de forma geral pela soma do número de golpes necessário para cravar os 30cm finais do amostrador. Além disso, o

número de golpes correspondente à penetração dos 30cm iniciais do amostrador também pode ser apresentado. Grandes diferenças entre o número de golpes referentes aos primeiros e aos últimos 30cm do amostrador podem indicar amolgamento do solo ou deficiência na limpeza do fundo do furo de sondagem. (SCHNAID & ODEBRECHT, 2012).

Figura 1 – Equipamentos para execução de sondagem a percussão



Fonte: Velloso; Lopes (2010)

A cravação é interrompida antes da penetração dos 45cm do amostrador em três situações: quando o número de golpes para cravar qualquer um dos segmentos é superior a 30, quando o total de golpes atinge o valor de 50 ou quando com 5 golpes sucessivos não se observa penetração do amostrador (ABNT NBR 6484/2001, item 6.3.12).

Diversos critérios de paralisação do ensaio podem ser adotados a depender do tipo de obra, características do projeto e natureza do solo. A ABNT NBR 6484 (2001) cita no item 6.4 alguns critérios, entre eles: O processo de perfuração por circulação de água, associado aos ensaios penetrométricos, deve ser utilizado até onde se obtiver, nesses ensaios, uma das seguintes condições:

- a) Quando, em 3m sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15cm iniciais do amostrador-padrão;

- b) Quando, em 4m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30cm iniciais do amostrador-padrão; e
- c) Quando, em 5m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 45cm do amostrador-padrão;

A Tabela 1, a seguir, apresenta uma primeira correlação que pode ser feita entre o tipo de solo observado na identificação tátil-visual e o índice de resistência à penetração:

Tabela 1 – Estados de compactidade e de consistência

| <b>Solo</b>                   | <b>Índice de resistência<br/>à penetração<br/>N</b> | <b>Designação</b>        |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| Areias e siltes<br>arenosos   | $\leq 4$                                            | Fofa(o)                  |
|                               | 5 a 8                                               | Pouco compacta(o)        |
|                               | 9 a 18                                              | Medianamente compacta(o) |
|                               | 19 a 40                                             | Compacta(o)              |
|                               | $> 40$                                              | Muito compacta(o)        |
| Argilas e siltes<br>argilosos | $\leq 2$                                            | Muito mole               |
|                               | 3 a 5                                               | Mole                     |
|                               | 6 a 10                                              | Média(o)                 |
|                               | 11 a 19                                             | Rija(o)                  |
|                               | $> 19$                                              | Dura(o)                  |

Fonte: ABNT NBR 6484 (2001)

Além disso, outros parâmetros podem ser estimados a partir do tipo de solo e do índice de resistência à penetração, como ângulo de atrito interno, coesão, resistência à compressão, peso específico, densidade.

Os resultados do ensaio são apresentados em forma de planilha indicando a posição e a cota do furo de sondagem e descrevendo as características de cada camada de solo, o número de golpes necessário para a penetração de cada trecho do amostrador e a profundidade do nível d'água. É recomendado utilizar amostras do solo para ensaios de laboratório (SCHNAID & ODEBRECHT, 2012).

### 3.1.2 Parâmetros de resistência do solo

Diversas são as maneiras de estimar os parâmetros de resistência do solo, sendo prática comum a correlação entre tais fatores e os resultados obtidos no ensaio SPT. As formas de fazer tal correlação também são amplas e será adotada neste trabalho a Tabela 2 proposta por JOPPERT JR (2007).

Tabela 2 – Correlação entre o  $N_{SPT}$  e os parâmetros do solo

| Tipo de solo                             | Faixa de SPT | Módulo de elasticidade (t/m <sup>2</sup> ) | Peso específico (g)         |                              | Ângulo de atrito efetivo (f) | Coesão efetiva (tf/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
|                                          |              |                                            | Natural (t/m <sup>2</sup> ) | Saturado (t/m <sup>2</sup> ) |                              |                                     |
| Areia pouco siltosa / pouco argilosa     | 0 - 4        | 2000 - 5000                                | 1,7                         | 1,8                          | 25°                          | -                                   |
|                                          | 5 - 8        | 4000 - 8000                                | 1,8                         | 1,9                          | 30°                          | -                                   |
|                                          | 9 - 18       | 5000 - 10000                               | 1,9                         | 2,0                          | 32°                          | -                                   |
|                                          | 19 - 41      | 8000 - 15000                               | 2,0                         | 2,1                          | 35°                          | -                                   |
|                                          | ≥ 41         | 16000 - 20000                              | 2,0                         | 2,1                          | 38°                          | -                                   |
| Areia média e fina muito argilosa        | 0 - 4        | 2000                                       | 1,7                         | 1,8                          | 25°                          | 0                                   |
|                                          | 5 - 8        | 4000                                       | 1,8                         | 1,9                          | 28°                          | 0,5                                 |
|                                          | 9 - 18       | 5000                                       | 1,9                         | 2,0                          | 30°                          | 0,75                                |
|                                          | 19 - 41      | 10000                                      | 2,0                         | 2,1                          | 32°                          | 1,0                                 |
| Argila porosa vermelha e amarela         | 0 - 2        | 200 - 500                                  | 1,5                         | 1,7                          | 20°                          | 0,75                                |
|                                          | 3 - 5        | 500 - 1000                                 | 1,6                         | 1,7                          | 23°                          | 1,5                                 |
|                                          | 6 - 10       | 1000 - 2000                                | 1,7                         | 1,8                          | 25°                          | 3,0                                 |
|                                          | ≥ 10         | 2000 - 3000                                | 1,8                         | 1,9                          | 25°                          | 3,0 - 7,0                           |
| Argila siltosa pouco arenosa (terciário) | 0 - 2        | 100                                        | 1,7                         | 1,8                          | 20°                          | 0,75                                |
|                                          | 3 - 5        | 100 - 250                                  | 1,8                         | 1,9                          | 23°                          | 1,5                                 |
|                                          | 6 - 10       | 250 - 500                                  | 1,9                         | 1,9                          | 24°                          | 2,0                                 |
|                                          | 11 - 19      | 500 - 1000                                 | 1,9                         | 1,9                          | 24°                          | 3,0                                 |
|                                          | 20 - 30      | 3000 - 10000                               | 2,0                         | 2,0                          | 25°                          | 4,0                                 |
|                                          | ≥ 30         | 10000 - 15000                              | 2,0                         | 2,0                          | 25°                          | 5,0                                 |
| Argila arenosa pouco siltosa             | 0 - 2        | 500                                        | 1,5                         | 1,7                          | 15°                          | 1,0                                 |
|                                          | 3 - 5        | 500 - 1500                                 | 1,7                         | 1,8                          | 15°                          | 2,0                                 |
|                                          | 6 - 10       | 1500 - 2000                                | 1,8                         | 1,9                          | 18°                          | 3,5                                 |
|                                          | 11 - 19      | 2000 - 3500                                | 1,9                         | 1,9                          | 20°                          | 5,0                                 |
|                                          | ≥ 20         | 3500 - 5000                                | 2,0                         | 2,0                          | 25°                          | 6,5                                 |
| Turfa / argila orgânica (quaternário)    | 0 - 1        | 40 - 100                                   | 1,1                         | 1,1                          | 15°                          | 0,5                                 |
|                                          | 2 - 5        | 100 - 150                                  | 1,2                         | 1,2                          | 15°                          | 1,0                                 |
| Silte arenoso pouco argiloso (residual)  | 5 - 8        | 8000                                       | 1,8                         | 1,9                          | 25°                          | 1,5                                 |
|                                          | 9 - 18       | 10000                                      | 1,9                         | 2,0                          | 26°                          | 2,0                                 |
|                                          | 19 - 41      | 15000                                      | 2,0                         | 2,0                          | 27°                          | 3,0                                 |
|                                          | ≥ 41         | 20000                                      | 2,1                         | 2,1                          | 28°                          | 5,0                                 |

Fonte: Joppert Júnior, 2007

### 3.2 ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO

Muitas são as situações em que se faz necessário implementar estruturas de contenção em obras. Alguns exemplos são projetos de estradas, pontes, estabilização de encostas, canalizações, escavação de subsolo para estacionamento de edifícios, cortes ou aterros para a criação de plataformas, entre outros (RANZINI & NEGRO JR, 1998).

A escolha de uma estrutura de contenção deve atender a requisitos funcionais, construtivos, econômicos e de segurança, conforme citado por SAES, STUCCHI & MILITTISKY (1998). Tais estruturas devem ser concebidas afim de suportar empuxos de terra, controlar a água e sustentar interferências de construções vizinhas. A estabilidade do terreno deve ser mantida através de estruturas que desempenhem função de paramento (estabilidade local) e escoramento (estabilidade global), conforme a necessidade de cada caso específico a depender da viabilidade de execução e da relação entre a resistência do maciço e a resultante de ações.

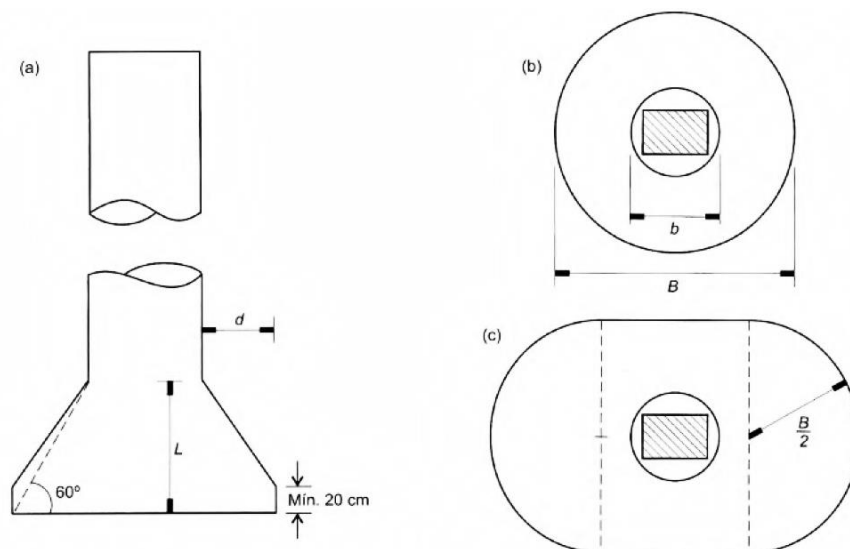
O escoramento de uma contenção pode ser exercido por estroncas, tirantes, bermas, pela estrutura definitiva (lajes e vigas de subsolos) ou por uma combinação entre esses tipos. Em geral as estruturas de escoramento independem do tipo de solo, do nível do lençol freático e do espaço disponível para implantação, o que torna relativamente mais simples a escolha do elemento a ser adotado. Já o desempenho do paramento da contenção leva em conta as características do subsolo, as condições do nível d'água, o espaço disponível e as construções vizinhas, tornando mais complexa a escolha do tipo a implantar. Para essa função podem ser utilizadas estacas-prancha, perfil pranchado, cortinas de estacões, cortinas de tubulões, estruturas de gravidade, muros de flexão, paredes-diafragma, entre outros. (SAES, STUCCHI & MILITTISKY, 1998).

Neste tópico serão apresentadas mais a fundo as estruturas que fazem a contenção a que este trabalho se refere. Sendo elas: tubulões a céu aberto, tirantes e solo grampeado.

#### 3.2.1 Tubulões a céu aberto

Como definido pela NBR 6122/2010, tubulões são um tipo de fundação profunda em que ocorre a descida de um operário em seu interior durante a execução. São caracterizados por fuste cilíndrico e base alargada – circular ou elíptica – ou não, como ilustra a seguir a Figura 2. A geometria do alargamento da base adota um ângulo de 60° com a horizontal para que a forma final da base não necessite de armadura (VELLOSO & LOPES, 2010).

Figura 2 – Tubulões: (a) em perfil, sem e com alargamento de base e formas de base usuais: (b) circular e (c) “falsa elipse”



Fonte: Velloso; Lopes (2010)

Segundo ALONSO (2010), o diâmetro mínimo do fuste é de 70cm para permitir a entrada e saída de operários, enquanto a base deve ter diâmetro máximo de 4m, podendo ser maior apenas em terrenos bem conhecidos e experimentados. Em caso de base em formato de falsa elipse, a relação entre o eixo longitudinal e transversal não deverá ser superior a 2,5.

ALONSO (2010) cita que os tubulões a céu aberto devem executados acima do nível d'água ou em solos argilosos saturados desde que seja possível bombear a água sem risco de desmoronamento e devem ser armados quando houver ocorrência de carga horizontal. Quando há risco de desmoronamento durante a escavação do fuste, VELLOSO & LOPES (2010) recomenda a utilização de revestimento de concreto ou metálico durante a escavação.

Cortinas de tubulões a céu aberto podem ser utilizadas como elemento de paramento de contenções, de acordo com SAES, STUCCHI & MILITTISKY (1998). Em geral, esse tipo de estrutura possui grande rigidez, o que permite maior espaçamento entre os elementos de escoramento da contenção (como tirantes e estroncas), sendo um ponto favorável economicamente. Além disso, cortinas de tubulões são uma boa alternativa em locais em que o acesso de equipamentos pesados é difícil ou quando a existência de matacões impede a utilização desses equipamentos.

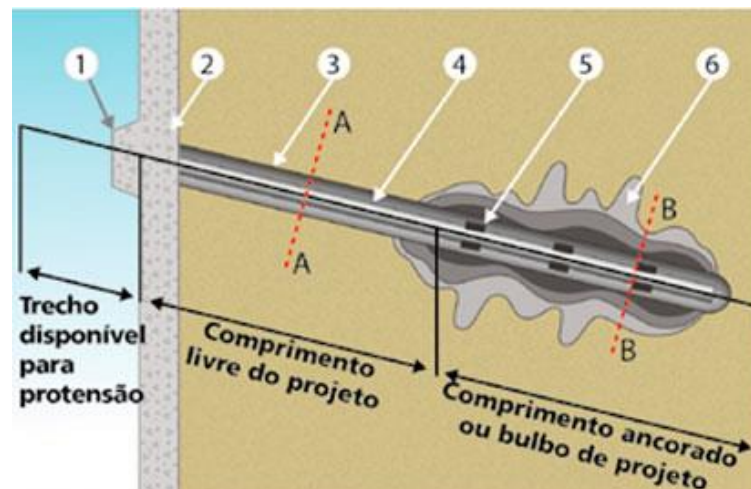
A utilização de tubulões para contenção de solo é recomendada principalmente quando a região é formada por argilas médias, rijas e duras ou, ainda, solos acima do nível do lençol freático que apresentem certa coesão, permitindo espaçar os tubulões compensando, assim, o maior consumo de concreto e aço por m<sup>2</sup> de paramento em comparação com outras estruturas,

decorrente de sua forma circular de diâmetro elevado. Em situações de solos formados por camadas de areias, argilas moles ou siltes fofos, abaixo do nível d'água, deve-se rebaixar o lençol freático para a utilização desse tipo de contenção. Entre os tubulões deve ser realizada escavação manual e a contenção do solo, podendo utilizar concreto projetado, armado ou não, cortina convencional de concreto armado ou até parede de alvenaria, conforme conveniência e viabilidade (SAES, STUCCHI & MILITTISKY, 1998).

### 3.2.2 Tirantes

Utilizados como elementos de escoramento em obras de contenção, os tirantes são capazes de transmitir esforços de tração entre suas extremidades, conhecidas como cabeça e bulbo de ancoragem. A ABNT NBR 5629 (2006) apresenta definições e métodos de execução de tirantes.

Figura 3 – Partes constitutivas do tirante



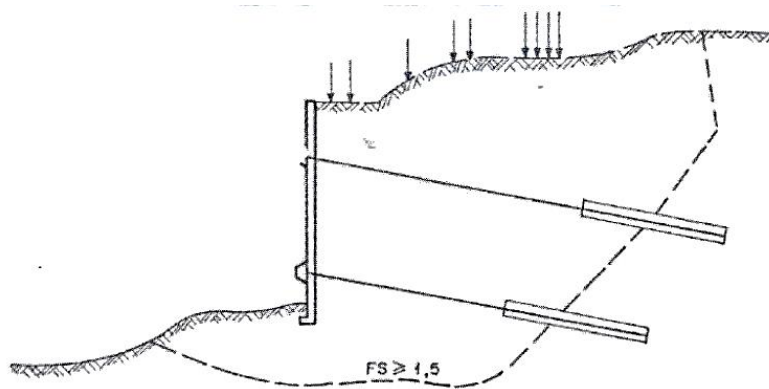
Fonte: Solotrat (2018)

O Manual de Serviços Geotécnicos SOLOTRAT (2018) apresenta a Figura 3, acima, onde estão representadas as principais partes de um tirante. São elas: (1) cabeça do tirante, (2) estrutura de reação, (3) perfuração do terreno, (4) bainha coletiva, (5) aço, fibra, etc. e (6) bulbo de ancoragem. Ainda na Figura 3, observa-se o trecho disponível para protensão do tirante, comprimento livre e comprimento ancorado de projeto.

O bulbo de ancoragem é responsável por transmitir esforços do tirante ao terreno através da calda de cimento injetada e deve ser projetado de modo a atingir horizontes resistentes, ficando fora da superfície de ruptura global do solo, como mostra a seguir a Figura 4. O trecho

livre é isolado da calda de cimento e transfere os esforços entre as extremidades. A cabeça do tirante transfere a carga do tirante para a estrutura a ser ancorada.

Figura 4 – Estabilidade global



Fonte: ABNT NBR 5629 (2006)

A NBR 5629/2006 exige a proteção do elemento resistente à tração do tirante contra a corrosão, visando a segurança durante a vida útil da estrutura. Tal proteção deve ser executada de acordo com a norma e a escolha do tipo de proteção está condicionada ao grau de consequência de ruptura da estrutura e à agressividade do meio.

A execução dos tirantes é iniciada pela perfuração, que deve seguir rigorosamente a locação, inclinação e direção de projeto e pode ser realizada por qualquer sistema de perfuração, respeitando as limitações do tipo de terreno, desde que sejam garantidos o alinhamento e estabilidade do furo. Terminada a perfuração, posiciona-se o tirante no furo. Em geral os tirantes são constituídos de barras, fios ou cordoalhas de aço devido à resistência desse material a esforços de tração (YASSUDA & DIAS, 1998). Outros materiais são permitidos pela norma desde que tenham a comprovação experimental atestada por órgãos competentes.

Em seguida é feita a injeção de calda de cimento ou outro aglutinante, preenchendo o furo e realizando a ancoragem do bulbo. Esse procedimento pode ser realizado em fase única ou em fases múltiplas controlando pressões e volumes de injeção afim de não interferir em construções vizinhas. A calda de cimento utilizada na injeção em geral tem fator água/cimento de 0,5 (em peso) (SOLOTRAT, 2018).

A etapa seguinte é a protensão dos tirantes afim de testar a capacidade de carga e posteriormente incorporar carga à estrutura. Para a verificação de desempenho do tirante devem ser realizados ensaios previstos em norma, sendo eles: ensaio básico, de qualificação, de recebimento e de fluência. Por fim, é executada a cabeça do tirante.

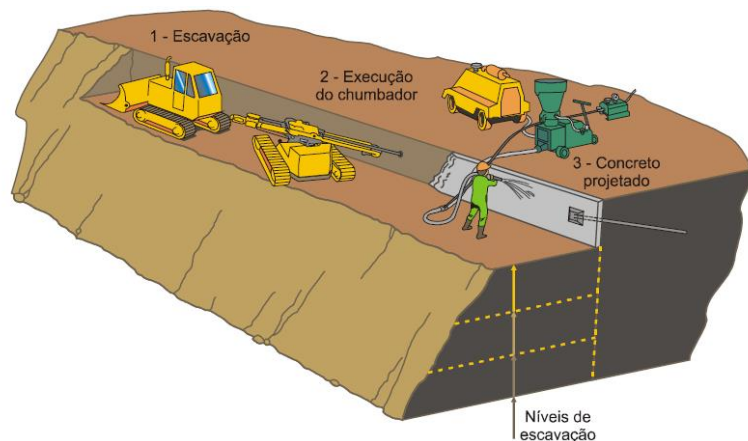
Como exposto por YASSUDA & DIAS (1998), os tirantes são muitas vezes vantajosos por suportarem cargas elevadas com estruturas de pequeno porte, além de apresentarem simplicidade construtiva uma vez que a carga de reação é obtida no interior do maciço e os elementos utilizados são simples e de fácil manuseio quando comparados com outras estruturas. Outra vantagem é que todos os tirantes executados devem ser ensaiados na obra, aumentando a qualidade quanto ao respeito às cargas de projeto. Entretanto, na maioria das vezes, os tirantes avançam em terrenos vizinhos, o que torna obrigatória a autorização dos mesmos para sua realização por questões de legalidade e segurança.

### 3.2.3 Solo grampeado

A técnica de solo grampeado é amplamente utilizada na estabilização de taludes, tanto naturais quanto escavados. Consiste na introdução de reforço com elementos resistentes a flexão composta (grampos ou chumbadores) para a estabilização geral de um maciço de solo, associado à aplicação de revestimento da face do talude (em geral, concreto projetado armado) garantindo a estabilidade local junto ao paramento e instalação de drenos que auxiliam na estabilidade local e global (ABRAMENTO, KOSHIMA & ZIRLIS, 1998).

O processo construtivo do solo grampeado em taludes escavados inicia-se com o corte na geometria de projeto, prosseguindo com a execução dos chumbadores e aplicação do revestimento de concreto projetado, como mostrado abaixo na Figura 5. Em seguida realiza-se o próximo nível de escavação e assim sucessivamente. Caso não haja necessidade de escavação, pode-se reforçar o maciço de forma descendente ou ascendente, conforme a conveniência (ZIRLIS, 1999).

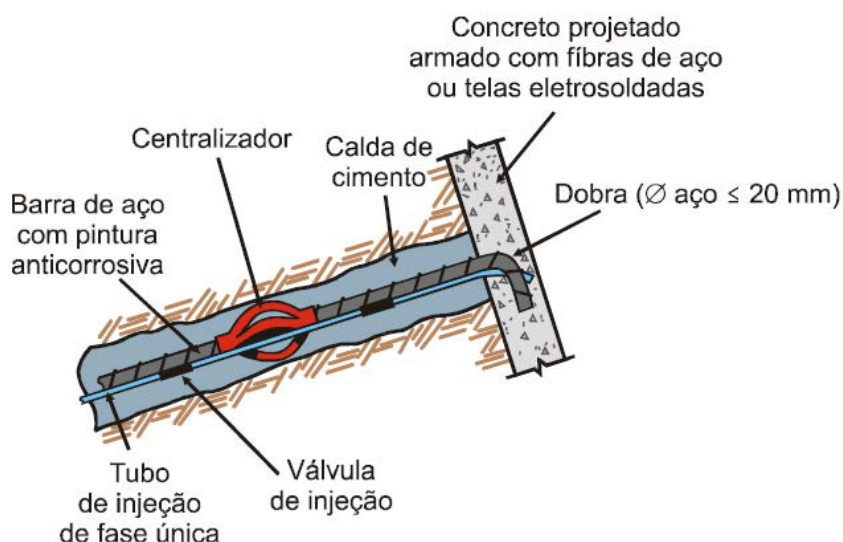
Figura 5 – Fases construtivas de solo grampeado em corte com equipamentos pesados



Fonte: Zirlis (1999)

Os chumbadores são, em geral, moldados in loco através de perfuração do maciço de solo, posicionamento da armadura e injeção de fluido cimentante. A perfuração é realizada usualmente por equipamentos leves, de fácil manuseio e instalação, facilitando o trabalho em variadas situações. Após abertura do furo, é posicionada a armadura, normalmente são utilizadas barras de aço, que devem receber dispositivos centralizadores para garantir recobrimento uniforme. Ao longo das barras também são fixadas mangueiras para injeção de fluido cimentante, em geral constituído de calda de cimento com fator água/cimento entre 0,5 e 0,7 (em peso) para solos ou resinas para materiais rochosos. A primeira fase de injeção denomina-se bainha e consiste em recompor a cavidade escavada. Em seguida, costuma-se realizar a injeção por fases ou setores, conforme o projeto, para a ancoragem do grampo no maciço (SOLOTRAT, 2018). Um exemplo de chumbador está representado na Figura 6, abaixo.

Figura 6 – Partes constitutivas de um chumbador



Fonte: Zirlis (1999)

Após a execução do grampo, é realizado o revestimento do paramento do talude com concreto projetado. Usualmente é utilizado o concreto por via seca (Figura 7), resultante da adição de água apenas no momento de aplicação do material. O material seco é misturado em betoneira e a massa é conduzida por ar comprimido até o bico de projeção, onde ocorre a mistura com água e eventuais aditivos líquidos e o lançamento sobre a estrutura a ser revestida.

Quanto à armação do concreto projetado, costumavam ser convencionalmente utilizadas as telas eletrosoldadas, conforme citado por ZILIS (1999). No entanto, o Manual de Serviços Geotécnicos SOLOTRAT (2018) apresenta como tendência a utilização de fibras de polietileno ou metálicas, adicionadas diretamente na betoneira. Essa substituição é vantajosa uma vez que

o concreto aplicado com as fibras se ajusta perfeitamente à superfície do talude evitando a existência de vazios entre o material a ser revestido e o concreto, além de reduzir a equipe de trabalho ao dispensar o preparo e instalação das telas.

Figura 7 – Arranjo de equipe e equipamento para concreto projetado por via seca



Fonte: Solotrat (2018)

Por fim, deve ser executado o sistema de drenagem do solo grampeado, formado por drenos profundos, de paramento e de superfície. Para a drenagem profunda é utilizado o Dreno Sub-Horizontal Profundo (DHP), com comprimento entre 6 e 24 metros, para captar a água distante da face do talude antes que nele aflorem. A drenagem superficial é composta por drenos de paramento e drenos de superfície (canaletas). Recomenda-se a execução do sistema de drenagem profunda e superficial mesmo quando não houver indicação de água na preparação do projeto (SOLOTRAT, 2018).

### 3.3 EMPUXOS DE TERRA

Empuxo de terra trata-se da ação horizontal gerada por um maciço de solo. Para projetar contenções é fundamental conhecer o empuxo de terra existente pois seu valor resultante aliado à distribuição de tensões horizontais ao longo de uma estrutura auxiliará no dimensionamento dos elementos de contenção submetidos ao processo de interação solo-estrutura (GERSCOVICH, 2010).

### 3.3.1 Empuxo no repouso

O empuxo no repouso é determinado pela geração de tensões horizontais com deformação lateral nula do solo. GERSCOVICH (2010) explica que a inexistência de deformação lateral ocorre devido a tensões horizontais efetivas que anulam o deslocamento do solo, visto que tal deslocamento ocorreria a partir de mudanças nas tensões entre os grãos. O coeficiente de empuxo no repouso ( $K_0$ ) refere-se às propriedades de deformação do solo e relaciona as tensões efetivas horizontal e vertical, conforme a equação (1), na condição de deformação horizontal nula.

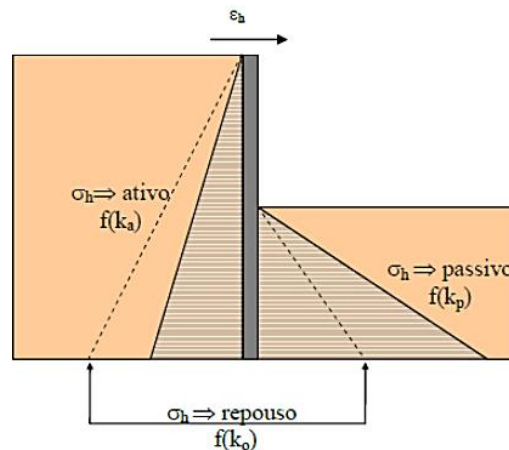
$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (1)$$

Segundo RANZINI & NEGRO JR (1998), as tensões laterais dependem consideravelmente do valor inicial de  $K_0$  quando uma situação não está próxima dos estados limite de ruptura, isto é, quando as deformações laterais são limitadas. No entanto, o parâmetro  $K_0$  não é considerado tão relevante na prática, uma vez que é comum projetar estruturas de contenção com base no estado limite de ruptura.

### 3.3.2 Empuxo ativo e passivo

A partir do momento em que uma estrutura é construída em uma massa de solo, passa a existir a possibilidade de deformação do solo e deslocamento da estrutura. Nesse caso, o empuxo de terra pode pertencer a duas categorias: empuxo ativo ou empuxo passivo (Figura 8).

Figura 8 – Empuxo em estruturas de contenção



Fonte: Gerscovich (2008)

Na primeira categoria ocorre alívio de tensões e o solo exerce uma força de natureza ativa na estrutura, que reage tendendo a afastar-se do maciço, enquanto na segunda, as tensões no solo aumentam e a estrutura empurra o solo, que tem comportamento passivo. Tais empuxos podem ser calculados de maneira análoga ao empuxo no repouso, substituindo  $K_0$  pelo coeficiente de empuxo ativo ( $K_a$ ) ou passivo ( $K_p$ ) (GERSCOVICH, 2010).

### **3.3.3 Estado de equilíbrio plástico**

O estado de equilíbrio plástico do solo é um estado limite último, ligado à condição de colapso do terreno, causada por alterações nas tensões atuantes. Estados limites últimos correspondem ao esgotamento da capacidade da estrutura, ou seja, à condição de ruptura (RANZINI & NEGRO JR, 1998).

O estado limite ativo é atingido ao manter a tensão efetiva vertical constante e diminuir a tensão efetiva horizontal até a condição de ruptura. Já o estado limite passivo ocorre com o aumento progressivo da tensão efetiva horizontal até atingir o valor máximo na ruptura. Sabendo que no estado ativo o solo está submetido a esforços de tração e no estado passivo, a esforços de compressão, conclui-se que para mobilizar o estado ativo são necessárias deformações menores do que para mobilizar o estado passivo já que os solos possuem apenas resistência à compressão. Logo, pequenos alívios de tensões horizontais são suficientes para a ruptura do solo por tração (GERSCOVICH, 2010).

### **3.3.4 Teoria de Rankine**

Desenvolvida a fim de determinar os empuxos de terra a que uma estrutura está submetida, a Teoria de Rankine considera algumas hipóteses fixadas pelo autor, sendo elas:

- a) Solo não coesivo, seco, isotrópico e homogêneo;
- b) Superfície do terreno plana;
- c) Estrutura vertical e sem atrito com o solo contido;
- d) Massa de solo em estado de equilíbrio plástico;
- e) Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

A partir dos estudos em Mecânica dos Solos, chegou-se a correlações para os valores dos coeficientes de empuxo ativo e passivo e ângulos de ruptura de cada caso, em função do ângulo de atrito do solo ( $\phi'$ ), como resumido na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 – Coeficiente de empuxo e ângulo de ruptura para os casos ativo e passivo

|                       | <b>CASO ATIVO</b>                                                                       | <b>CASO PASSIVO</b>                                                                     |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Coeficiente de empuxo | $Ka = \frac{\sigma'_{ha}}{\sigma'_v} = \frac{1 - \text{sen}\phi'}{1 + \text{sen}\phi'}$ | $Kp = \frac{\sigma'_{hp}}{\sigma'_v} = \frac{1 + \text{sen}\phi'}{1 - \text{sen}\phi'}$ |
| Ângulo de ruptura     | $\theta_r = 45^\circ + \frac{\phi'}{2}$                                                 | $\theta_r = 45^\circ - \frac{\phi'}{2}$                                                 |

Fonte: Autora, 2018

A aplicação da teoria de Rankine se faz ao determinar a distribuição de tensões horizontais ao longo da estrutura vertical para o cálculo do empuxo atuante, seja ativo ou passivo. A equação (2), a seguir, apresenta-se a formulação geral para o cálculo do empuxo.

$$E = \int_0^H \sigma_h dH \quad (2)$$

Em solos não coesivos e secos, as tensões vertical e horizontal serão dadas respectivamente pelas expressões (3) e (4), tanto no caso ativo quanto no passivo, sendo H a profundidade da estrutura de contenção e  $\gamma$  o peso específico do solo.

$$\sigma_v = \gamma H \quad (3)$$

$$\sigma_h = K \sigma_v \quad (4)$$

Caso as condições do solo se afastem das hipóteses impostas, como presença de lençol freático, coesão, carregamento sobre o terreno, estratigrafia do maciço, entre outros, deve-se levar em conta as alterações no valor da tensão horizontal e consequentes mudanças nas equações utilizadas.

Para solos coesivos, com coesão representada por  $c'$ , a tensão horizontal é diferente para o caso ativo e passivo. Em solos drenados terá os valores apresentados a seguir.

$$\sigma'_{ha} = K_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_a} \quad (5)$$

$$\sigma'_{hp} = K_p \sigma'_v + 2c' \sqrt{K_p} \quad (6)$$

Logo, o empuxo será dado por:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2c' \sqrt{K_a} H \quad (7)$$

$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2c' \sqrt{K_p} H \quad (8)$$

Deve-se atentar para a possibilidade de surgimento de trincas de tração em solos coesivos próximo à superfície do terreno, na região onde a tensão horizontal efetiva pode ser anulada pela parcela coesiva. Nessa região o solo fica mais suscetível ao rompimento, pois não possui resistência à tração, resultando em valores de empuxo ativo muito baixos, nulos ou até mesmo negativos. Nesse caso, CAPUTO et al. (1998) cita a recomendação da avaliação do empuxo ativo mínimo por questões de segurança quanto aos parâmetros do solo e carregamentos adotados. A tensão horizontal para cálculo do empuxo mínimo será dada por:

$$\sigma'_{ha} = 0,20\gamma H \quad (9)$$

### 3.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise de estabilidade de taludes é fundamental para o desenvolvimento de estruturas de contenção afim de garantir a segurança contra a ruptura. Verificar precisamente a estabilidade é um processo complexo devido a diversos fatores envolvidos. Contudo, é possível realizar uma análise quantitativa da estabilidade do talude que fornece informações suficientes para o projeto da estrutura de contenção. Os métodos de análise de estabilidade de talude podem ser estudos em modelos físicos, modelos matemáticos ou métodos de equilíbrio limite. Cada um deles possui métodos de cálculo específicos com suas vantagens e limitações (GUIDICINI & NIEBLE, 1983).

#### 3.4.1 Métodos de equilíbrio limite

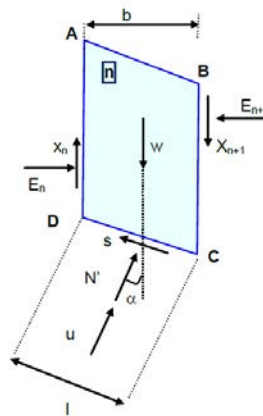
Conforme MASSAD (2010), os métodos de equilíbrio limite são os mais utilizados atualmente e consistem em considerar como corpo rígido-plástico uma massa de solo em equilíbrio na iminência de romper. A análise se dá por meio do fator de segurança (FS) ao relacionar, conforme a equação (10), esforços estabilizantes (solicitantes) e esforços instabilizantes (resistentes), sendo a condição de equilíbrio limite dada por  $FS = 1,0$ .

$$FS = \frac{\text{esforços resistentes}}{\text{esforços solicitantes}} \quad (10)$$

A NBR 11682/1991 determina um padrão de segurança mínimo a ser adotado quanto à utilização de modelos matemáticos, conforme mostra a Tabela 4. A norma permite a adoção de outros fatores, desde que devidamente justificados.



Figura 10 – Esforços na fatia n



Fonte: Gerscovich (2009)

O fator de segurança irá relacionar esforços resistentes e atuantes em busca de equilibrá-los. O problema torna-se estaticamente indeterminado, sendo necessário determinar a tensão normal na base da fatia ( $N'$ ). Existem diversos métodos que adotam hipóteses simplificadoras para prosseguir a análise de estabilidade do talude (MASSAD, 2010). A seguir serão descritos os métodos de Fellenius e Bishop Simplificado, que diferem pela maneira como a direção da resultante do equilíbrio de forças é considerada.

#### 3.4.1.1 Método de Fellenius

Desenvolvido por Fellenius em 1936, o método considera o equilíbrio de forças na direção normal à base da fatia para calcular  $N'$  e admite os esforços  $E$  e  $X$  iguais em magnitude, aplicados na mesma direção e em sentidos opostos, ou seja, os esforços entre as fatias se anulam (GERSCOVICH, 2009).

A simplificação do método de Fellenius tende a fornecer baixos valores de FS podendo gerar erros significativos, principalmente quando há presença de água no talude. Isso ocorre pois a poropressão também atua entre as fatias de solo e possui componente na direção normal à base da fatia. Ao desprezar esse fator no equilíbrio de forças, pode-se chegar a valores de FS pouco confiáveis (MASSAD, 2010).

#### 3.4.1.2 Método de Bishop Simplificado

O método de Bishop Simplificado encontra  $N'$  a partir do equilíbrio de forças na direção vertical. Originalmente, o método de Bishop, desenvolvido em 1955, levava em conta as forças

X entre as fatias. No entanto, desconsiderá-las facilita os cálculos e gera um erro no valor de FS de aproximadamente 1%. Dessa forma surgiu o método de Bishop Simplificado com a desconsideração das forças entre fatias (MASSAD, 2010).

Observa-se que a solução do método é iterativa, sendo recomendado utilizar o valor de FS obtido pelo método de Fellenius para iniciar a primeira iteração. O processo de cálculo se repete até a convergência do resultado (GERSCOVICH, 2009).

### 3.5 DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS

Para dimensionar a estrutura de contenção de um maciço de solo é necessário ter conhecimento de aspectos citados nos itens anteriores tais como os parâmetros de resistência do solo, posição do lençol freático, impacto ambiental e em construções vizinhas, esforços atuantes na estrutura e análise de estabilidade do talude. Baseado nisso, é analisada a viabilidade de algumas soluções, levando em conta a eficiência de estabilização, os métodos construtivos, os prazos e a relação custo-benefício. Vale lembrar que, em geral, na geotecnia não existem soluções únicas para os problemas. Mediante isso, podem surgir diversas opções a serem avaliadas de modo a encontrar resultados satisfatórios.

#### 3.5.1 Tubulões a céu aberto carregados horizontalmente

Quando submetidos a carregamentos horizontais, as estacas ou tubulões devem ser projetados levando em conta esses esforços, além das cargas verticais e momentos que também podem existir. Segundo VELLOSO & LOPES (2012), existem duas alternativas nesses casos: utilizar estruturas inclinadas que trabalhem predominantemente sob forças axiais de compressão ou tração, ou projetar estacas ou tubulões verticais submetidos a esforços de flexocompressão ou flexotração para absorver as cargas horizontais.

Na utilização desse tipo de estrutura como composição de um muro para contenção de talude, é usual que parte dos tubulões fique embutida no solo. Tal embutimento é chamado de ficha e deve garantir a segurança contra o tombamento. A parte superior dos tubulões estará submetida ao empuxo ativo e a parte enterrada, ao empuxo ativo e passivo (SOUZA, 2012). Nesse caso, pode-se utilizar a teoria de dimensionamento de cortinas para calcular os tubulões, passando por basicamente três fases: cálculo de cortina em balanço, cálculo de cortina atirantada e cálculo da taxa de armadura dos tubulões.

Para o cálculo de cortinas, o método simplificado de Blum pode ser utilizado para determinar a ficha mínima, a partir da verificação de tombamento da cortina, como descrito de forma simplificada por BARROS (2015) e apresentado nos itens a seguir.

### 3.5.1.1 Cortina em balanço

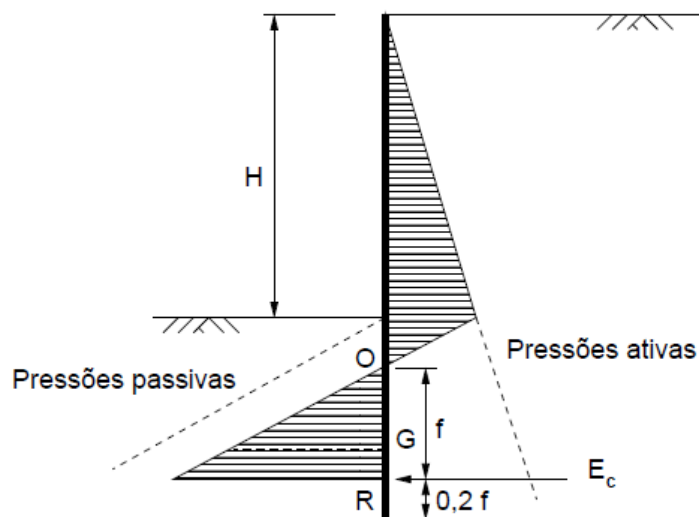
Cortinas em balanço são dimensionadas para resistir ao empuxo por meio de seu engastamento no solo. O primeiro passo para a determinação da ficha mínima consiste calcular os empuxos atuantes na estrutura para então determinar a posição do ponto R, mostrado na Figura 11.

Determina-se o ponto R por tentativas a partir do fator de segurança contra o tombamento, dado pela equação (11):

$$FS = \frac{Mr}{Ma} \geq 1,5 \text{ (provisório) a } 2,0 \text{ (permanente)} \quad (11)$$

Onde  $Mr$  é o momento resultante do empuxo passivo entre o ponto O e o ponto R e  $Ma$  é o momento resultante do empuxo ativo até o ponto O, ambos em relação a R.

Figura 11 – Empuxos atuantes em cortina em balanço



Fonte: Barros (2015)

Ao determinar a posição do ponto R, tem-se o valor de f. Então, acrescenta-se 0,2f ao ponto R, valor que costuma ser suficiente para mobilizar o contra empuxo  $E_c$ , que não influenciará o equilíbrio de momentos, mas atuará no equilíbrio de forças horizontais, caso o empuxo passivo disponível real seja menor que o calculado.

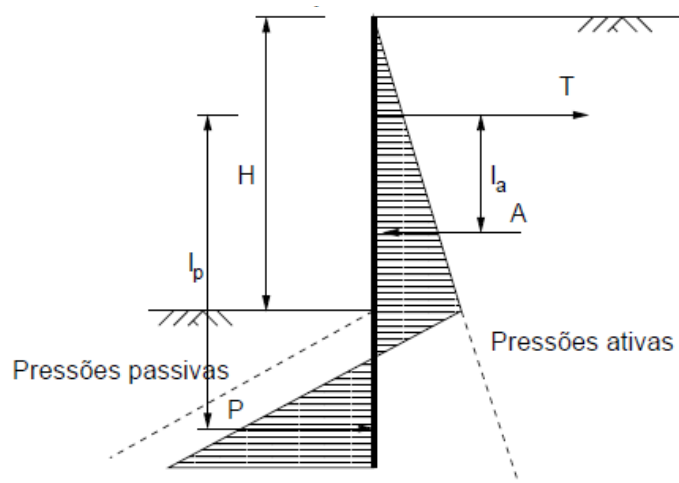
Após o cálculo da ficha mínima, determina-se o momento máximo atuante na cortina encontrando o ponto G, mostrado na Figura 11, onde a força cortante na estrutura é nula. Neste ponto o momento resultante alcança seu valor máximo.

### 3.5.1.2 Cortina atirantada

Em casos de escavações maiores, as cortinas em balanço não são suficientes para conter o empuxo de terra. Dessa forma, podem ser utilizados tirantes como apoios intermediários. Para cortinas com um nível de tirantes é necessário determinar a ficha mínima da cortina e a carga de trabalho do tirante.

Em cortina atirantada com extremidade inferior apoiada, a ficha não é suficiente para impedir a movimentação da estrutura. Logo, pode ocorrer rotação no nível do tirante.

Figura 12 – Cortina atirantada com extremidade inferior apoiada



Fonte: Barros (2015)

A ficha mínima é calculada por tentativas, por meio do fator de segurança contra o giro da estrutura em relação ao ponto de implantação do tirante, dado pela equação (12):

$$FS = \frac{Pl_p}{Al_a} \geq 1,5 \text{ (provisório) a } 2,0 \text{ (permanente)} \quad (12)$$

Onde A e P são as tensões resultantes dos empuxos ativo e passivo, respectivamente, e  $l_a$  e  $l_p$  são seus braços de alavanca em relação à posição do tirante.

Para desníveis ainda maiores, podem ser utilizados dois ou mais tirantes como apoios intermediários. Nessa configuração, a resistência ao cisalhamento disponível não é totalmente mobilizada pelos deslocamentos do solo. Para dimensionar a cortina e as cargas nos tirantes,

podem ser utilizados diagramas de empuxo regularizados em relação ao ponto de fixação dos tirantes possuindo a mesma área dos diagramas originais.

### 3.5.1.3 Taxa de armadura

O cálculo da armadura é fundamental em estruturas submetidas a flexão composta, caso em que se enquadram os tubulões carregados horizontalmente. Para simplificar o dimensionamento, pode ser utilizado o ábaco para peças submetidas à flexo-compressão e flexo-tração, desenvolvido por Walter Pfeil (Anexo A).

O ábaco possui o formato indicado na Figura 13. Devem ser calculados os valores dos esforços solicitantes relativos  $\mu$  e  $\nu$  pra encontrar a taxa mecânica de armadura,  $\omega$ .

$$\nu = \frac{N_d}{A_c f_c} \text{ e } \mu = \frac{M_d}{f_c d^3} \quad (13) \text{ e } (14)$$

Onde:

$N_d$ : esforço normal

$A_c$ : área da seção de concreto

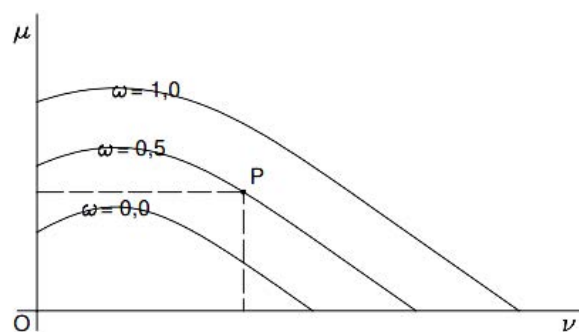
$M_d$ : momento fletor de cálculo

$d$ : diâmetro da seção de concreto

$$f_c = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \gamma_c = 1,8$$

$f_{ck}$ : resistência característica do concreto à compressão

Figura 13 – Formato do ábaco de Walter Pfeil



Fonte: Schäffer (2006)

Encontrado o valor de  $\omega$ , calcula-se a taxa geométrica de armadura,  $\rho$ .

$$\rho = \omega \frac{f_c}{f_s} \quad (15)$$

Onde:

$$f_s = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \gamma_s = 1,15$$

$f_{yk}$ : resistência característica de escoamento do aço

Por fim, é calculada a área de aço ( $A_s$ ) necessária na estrutura para combater os esforços solicitantes, através da equação (16):

$$A_s = \rho \frac{\pi d^2}{4} \quad (16)$$

A partir do valor encontrado, é possível realizar o detalhamento da armadura do tubulão utilizando barras de aço de modo a inserir quantas barras forem necessárias para completar a área de aço total calculada.

A NBR 6122/2010 indica para o cálculo da armadura mínima o valor dado pela expressão (17):

$$A_s = 0,5\% A_c \quad (17)$$

### 3.5.2 Tirantes

A aplicação mais comum de tirantes é para o combate a empuxos de terra, devendo ser ancorados em uma região estável do maciço de solo. O dimensionamento de uma estrutura com tirantes envolve o cálculo do empuxo, do comprimento livre do tirante ( $L_L$ ), comprimento do bulbo de ancoragem ( $L_B$ ) e dimensionamento estrutural da face da contenção. Admite-se que o comprimento livre deve atravessar toda a massa instável do maciço de solo e a ancoragem deve ser feita em terreno firme além da cunha ativa de ruptura (YASSUDA & DIAS, 1998).

O dimensionamento de tirantes é direcionado pela NBR 5629/2006 que fornece diretrizes para o cálculo da seção de aço a ser utilizada, além do cálculo do bulbo de ancoragem e critérios para análise da estabilidade global do maciço de solo. A norma admite para a execução de tirantes apenas os aços especificados pelas NBR7480, NBR7482 e NBR7483.

Segundo a norma, deve-se calcular os esforços solicitantes a partir de métodos consagrados pela mecânica dos solos considerando a composição do solo, a deslocabilidade da estrutura de contenção, o número de níveis de tirantes e a sequência executiva adotada.

Para obter a seção de aço a ser utilizada, deve-se partir do esforço máximo a que o tirante é submetido. A NBR 5629/2006 não permite que a seção individual de cada barra, fio ou cordoalha seja menor que 50mm<sup>2</sup>.

Segundo YASSUDA & DIAS (1998), a abordagem da NBR5629 é conservadora e útil para estimativa inicial do dimensionamento dos tirantes, pois não considera a influência da injeção de calda de cimento na capacidade de carga. A partir disso podem ser utilizadas abordagens de autores renomados para o dimensionamento de tirantes. A seguir apresenta-se a equação (18) sugerida por Costa Nunes em 1987 para dimensionamento do comprimento ancorado de tirantes.

$$F = \pi D_d L_B [c' + (\gamma h + \Delta p) \operatorname{tg} \emptyset] \quad (18)$$

Onde:

$F$ : capacidade de carga do bulbo de ancoragem

$D_d$ : diâmetro do furo

$L_B$ : comprimento do bulbo de ancoragem

$c'$ : aderência entre a calda de cimento e o solo (em geral, considerado igual à coesão do solo)

$\gamma$ : massa específica do solo acima do bulbo

$h$ : profundidade do centro do bulbo

$\Delta p$ : aumento da tensão normal devido à pressão residual de injeção (5 a 10 vezes o valor de  $\gamma h$ )

$\emptyset$ : ângulo de atrito do solo

Quanto à estabilidade global, o centro de ancoragem dos tirantes deve ser posicionado sobre ou além da superfície de ruptura com fator de segurança mínimo de 1,50. A partir do dimensionamento do comprimento de ancoragem e de sua posição, obtém-se o comprimento livre ( $L_L$ ), que deve ser de no mínimo 3 metros.

### 3.5.3 Solo grampeado

Para o dimensionamento de solo grampeado é preciso definir o comprimento dos grampos ( $L$ ), ângulo de instalação ( $\alpha$ ), espaçamento vertical ( $S_v$ ) e horizontal ( $S_h$ ). Alguns autores sugerem tratar o maciço como um muro de gravidade, que deve ser verificado quanto ao deslizamento, tombamento, à capacidade de carga do solo de fundação e à estabilidade global. Internacionalmente existem alguns métodos desenvolvidos para o dimensionamento de solo grampeado, como o método Francês (1991), Alemão (1979), de Davis (1981), Cinemático (1990), entre outros. Os métodos de cálculo diferem entre si por alguns fatores como tipo de análise de estabilidade, forma da superfície de ruptura, geometria da estrutura, estratificação do

solo e presença de água. Contudo, um ponto em comum entre os métodos é a divisão do maciço de solo em uma zona ativa e uma zona passiva durante a ruptura. Dessa forma, as análises de estabilidade devem considerar os esforços estabilizantes dos reforços atuando na zona ativa (ZIRLIS, et al., 2010).

No Brasil não há norma específica ou metodologia consagrada para o cálculo de solo grampeado. Em geral, utiliza-se de métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade do maciço de solo e da experiência do projetista para definir as dimensões a serem utilizadas. A estrutura deve ser projetada afim de conter todos os possíveis planos de ruptura após a implantação dos grampos. (ABRAMENTO, KOSHIMA & ZIRLIS, 1998).

Como guia para iniciar o dimensionamento, podem ser utilizados critérios citados por GONDIM (2018), baseados na FHWA-NHI-14-007 (2015), do Departamento de Transporte dos Estados Unidos, e nas recomendações de Clouterre (1991), na França. A seguir estão descritos alguns critérios.

Quanto ao comprimento dos grampos ( $L$ ), pode-se utilizar como medida de pré-dimensionamento o valor de 0,7 vezes a altura de escavação do talude ( $H$ ). O comprimento final recomendado fica entre  $0,5H$  e  $1,2H$ . Para valores maiores que  $1,2H$  é válido reconsiderar o uso de solo grampeado como estrutura de estabilização do talude. Na região da base da escavação o solo é menos solicitado. Logo, pode-se diminuir o comprimento dos grampos, desde que seja mantida a segurança contra a ruptura, para obter um projeto mais econômico (CLOUTERRE, 1991, apud GONDIM, 2018).

O ângulo de instalação dos grampos ( $\alpha$ ) é dado em relação à horizontal e recomenda-se valores entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$ . Em geral, utiliza-se  $\alpha = 15^\circ$ . Não é recomendado adotar ângulo de instalação menor que  $10^\circ$  para que não haja prejuízo com relação a resistência de aderência da estrutura devido a possibilidade de surgirem bolsas de ar durante a injeção de calda de cimento (GONDIM, 2018).

Em relação ao espaçamento entre os grampos, é recomendado adotar o espaçamento vertical ( $S_V$ ) aproximadamente igual ao espaçamento horizontal ( $S_H$ ). O valor dos espaçamentos deve ficar entre 1,20m e 1,80m e o produto entre  $S_V$  e  $S_H$  deve ser de  $3,30m^2$  a  $3,90m^2$ . Ainda deve-se considerar na direção vertical o espaçamento entre a primeira fileira de grampos e o ponto mais alto da escavação ( $S_{V0}$ ) entre 0,60m e 1,00m e o espaçamento entre o pé da escavação e a última fileira de grampos ( $S_{VN}$ ) entre 0,60m e 0,90m (GONDIM, 2018).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

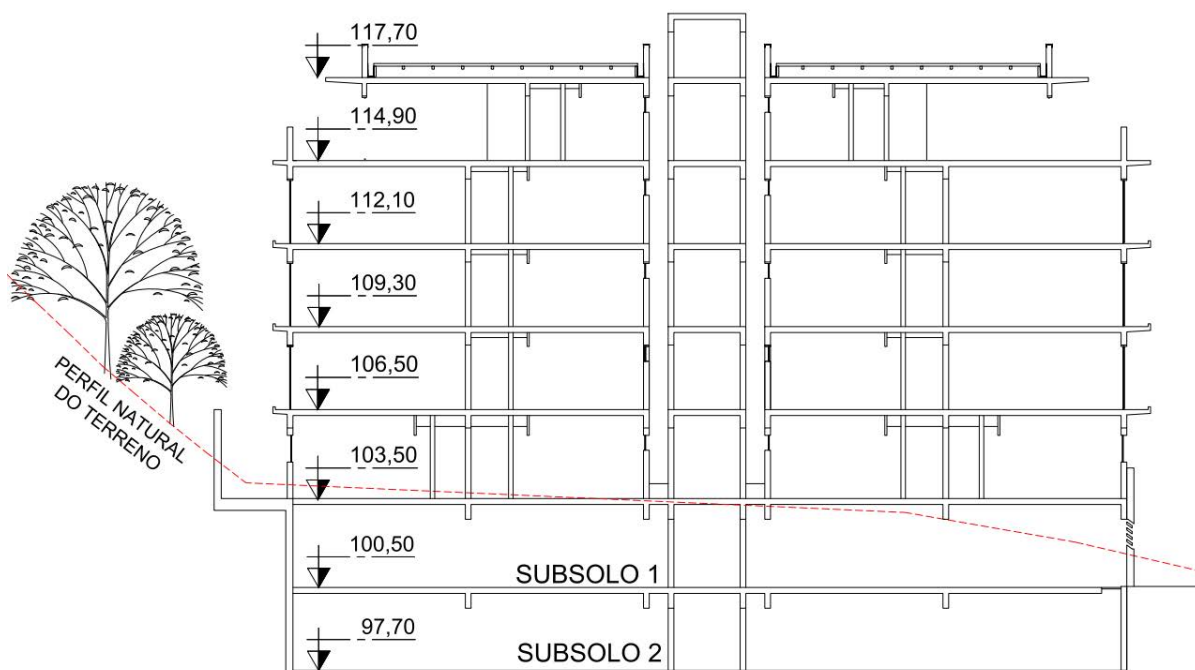
Os materiais a seguir foram fornecidos pela empresa executora da obra, assim como a descrição dos métodos utilizados. A reprodução neste trabalho de graduação foi devidamente autorizada.

### 4.1 PROJETO ARQUITETÔNICO

O projeto intitulado Pateo Jacuy consiste em duas torres de edifício residencial totalizando 74 apartamentos. Para a garagem houve necessidade de escavação do talude existente para executar dois pavimentos de subsolo com 120 vagas de estacionamento para automóveis e 12 para motocicletas.

A Figura 14, a seguir, apresenta o corte transversal do projeto arquitetônico do edifício, onde pode-se observar o perfil natural do terreno e a escavação necessária pra executar o subsolo.

Figura 14 – Corte do edifício



Fonte: Adaptado de CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2015)

Como pode-se observar na Figura 14, a escavação total é prevista até a cota 97,70 para execução do segundo subsolo e o pavimento térreo situa-se na cota 103,50.

## 4.2 SONDAGENS

Foram realizadas sondagens SPT no terreno para caracterização do subsolo em duas ocasiões:

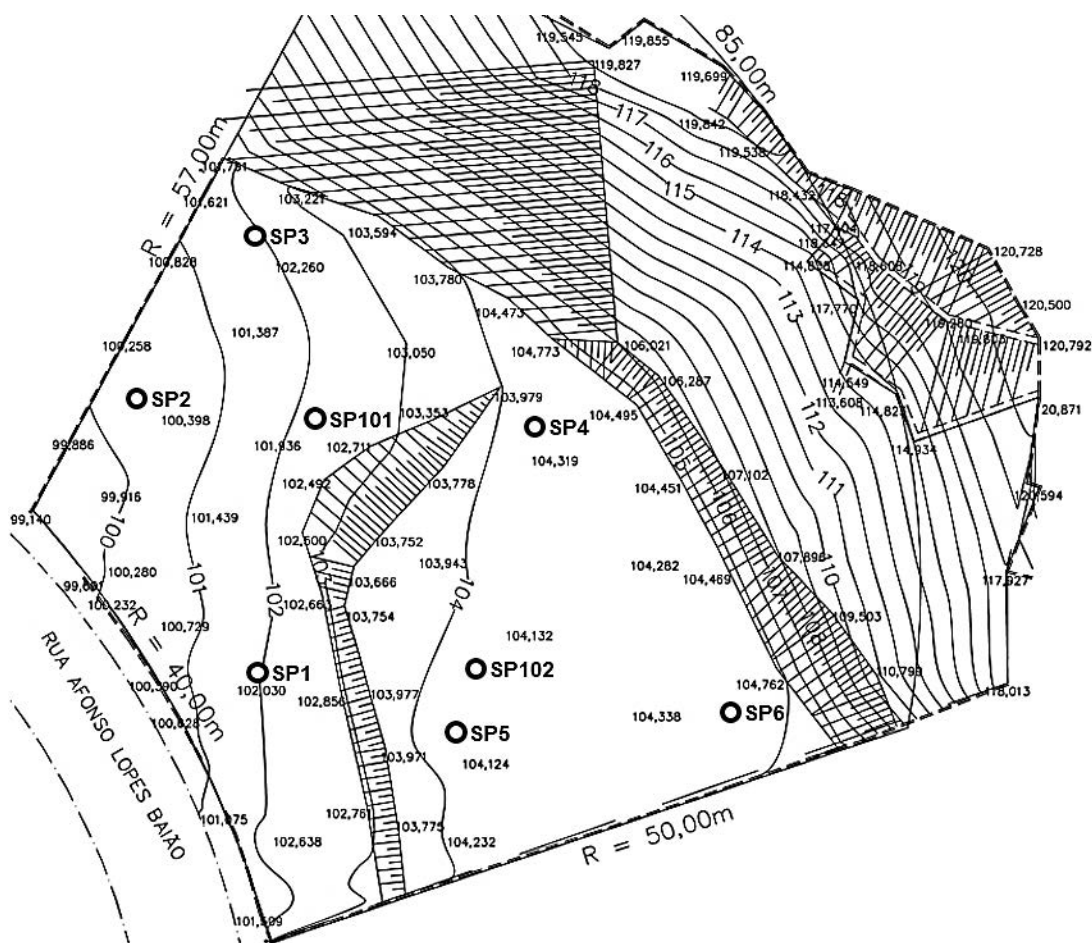
- Julho/2011: SP-01 a SP-06;
- Fevereiro/2012: SP-101 e SP-102;

O Anexo B apresenta um boletim de sondagem representativo da região. As localizações dos furos de sondagens estão representadas na Figura 15, no tópico a seguir. Observa-se que os ensaios foram realizados apenas abaixo da cota do pé do talude em estudo por questões de dificuldade de acesso ao local.

## 4.3 TOPOGRAFIA

O levantamento topográfico realizado antes da obra forneceu as informações apresentadas na Figura 15.

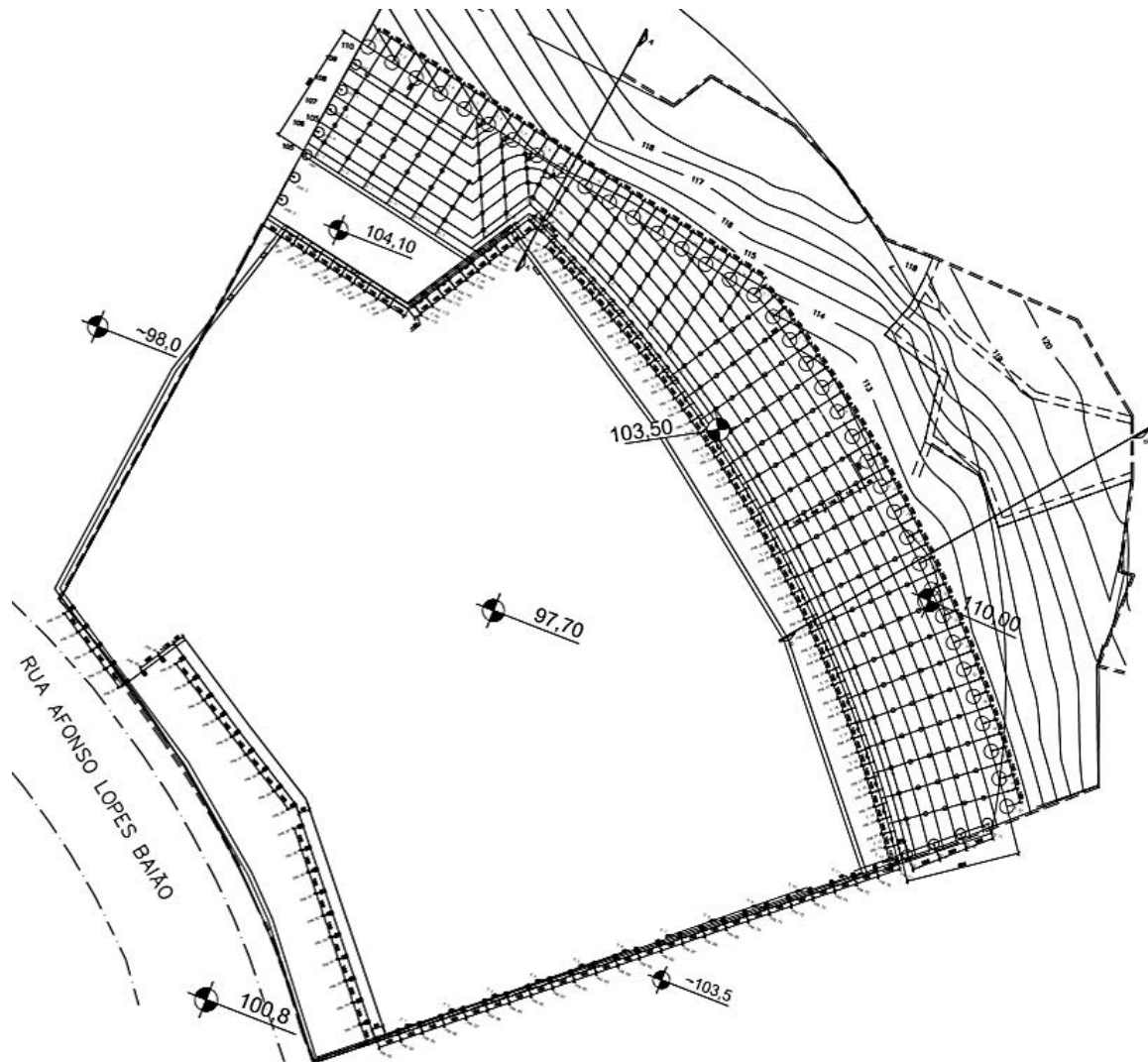
Figura 15 – Levantamento topográfico



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2015)

Para a execução do subsolo é necessária a escavação do terreno até a cota 97,7, conforme a Topografia final mostrada na Figura 16. Sabendo disso foi elaborado o projeto da contenção do talude, apresentado no tópico a seguir.

Figura 16 – Topografia final



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2015)

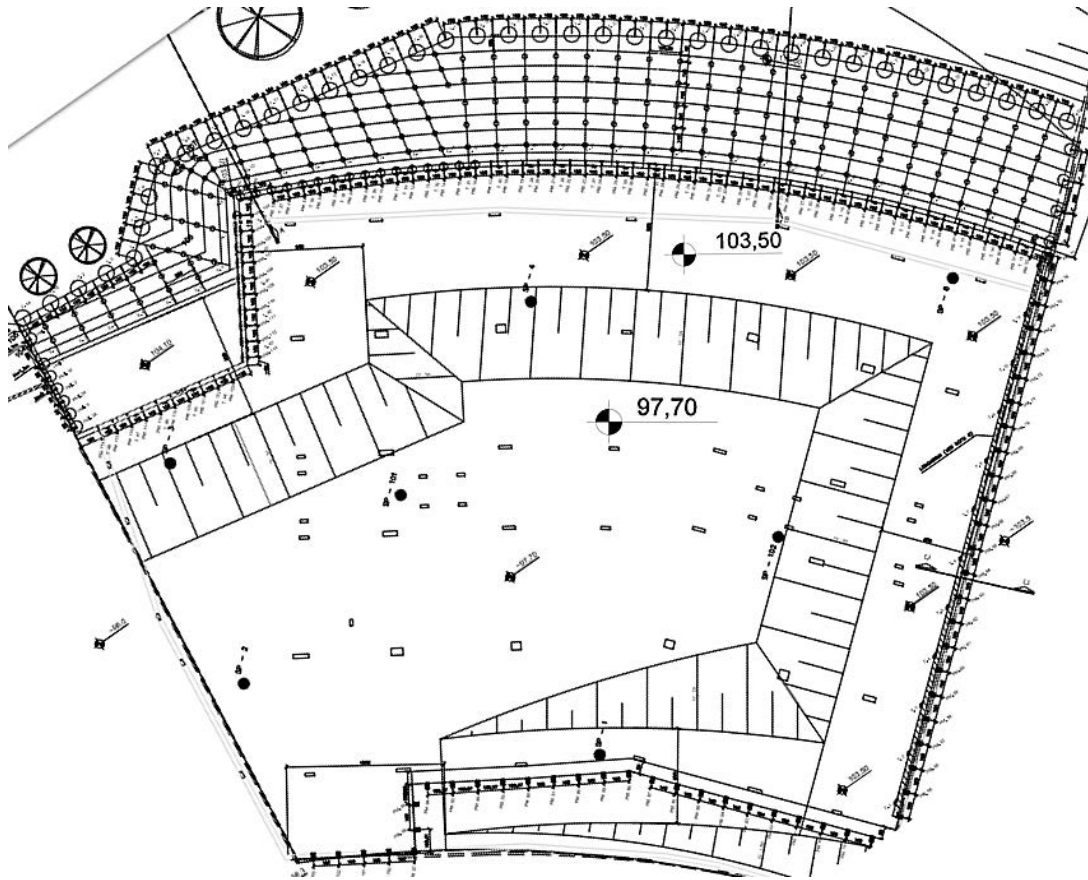
#### 4.4 PROJETO DA CONTENÇÃO

Para realizar a escavação mencionada no item 4.1 há necessidade de cortar e estabilizar o talude existente. O projeto arquitetônico prevê a escavação do subsolo até a cota 97,7. A execução foi idealizada em duas etapas: escavação provisória e escavação permanente. A Figura 17, a seguir, mostra o projeto da escavação provisória até a cota 103,5, nível do

pavimento térreo do edifício, com a implantação de tubulões a céu aberto, tirantes e solo grampeado para a contenção do talude, a qual será objeto de estudo deste trabalho. A Figura 18 mostra a elevação do projeto de contenção.

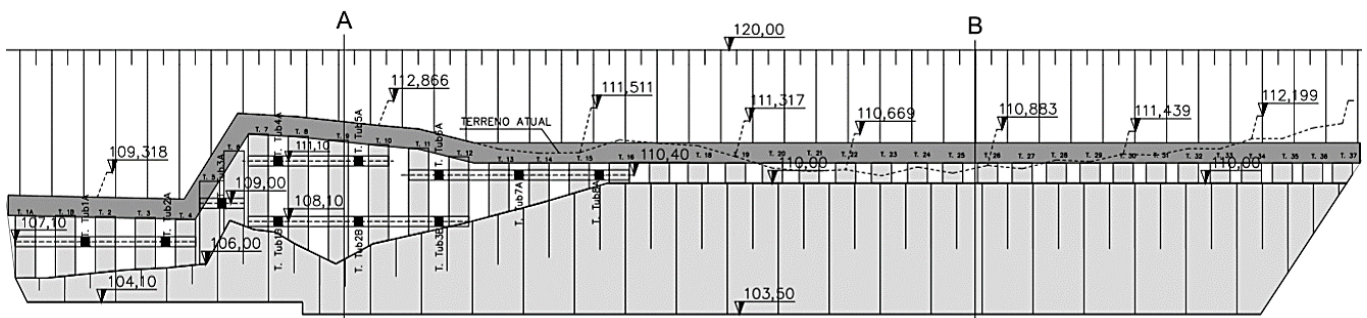
A escavação permanente até o nível do segundo subsolo ainda não foi realizada e está em discussão. Nesta etapa a contenção do talude continuará com a implantação de perfis metálicos e tirantes nas paredes do subsolo.

Figura 17 – Escavação provisória



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2015)

Figura 18 – Elevação da contenção do talude



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

#### 4.4.1 Tubulões a céu aberto

O projeto possui como elementos de contenção 38 tubulões a céu aberto (T.1 a T.37) com diâmetro de fuste de 100cm sem base alargada com espaçamento de 2 metros entre eixos. Os tubulões foram escavados manualmente (Figura 19) e o lançamento de concreto foi realizado após o posicionamento da armadura através de tubo tipo tremonha (Figura 20), evitando que o concreto atingisse as paredes do fuste.

Figura 19 – Escavação manual dos tubulões



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

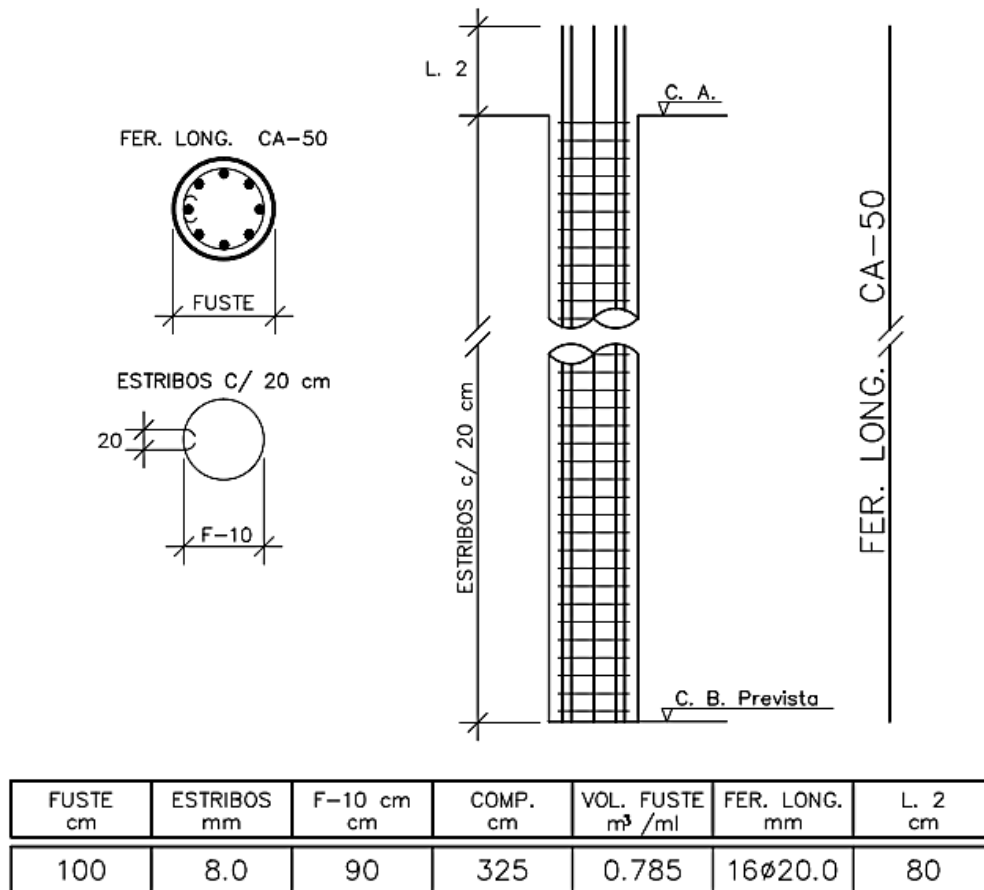
Figura 20 – Concretagem dos tubulões



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

A cota de base (C.B.) prevista para os tubulões T.1 ao T.19 é 99,0 e de T.20 ao T.37, 100,0, enquanto a cota de assentamento (C.A.) foi limitada pela topografia original do terreno. A Figura 21 mostra o detalhe da armação dos tubulões.

Figura 21 – Detalhe para armação dos tubulões



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

Quanto ao concreto, tem-se as seguintes especificações:

- $f_{ck} \geq 20$  MPa
- Abatimento  $9 \pm 1$  cm
- Consumo mínimo de cimento  $300 \text{ kg/m}^3$

A viga de coroamento (Figura 22) foi executada em concreto armado após o término de todos os tubulões, limpeza da ferragem do topo dos mesmos e apicoamento superficial da cabeça dos tubulões para garantir melhor aderência.

Figura 22 – Execução da viga de coroamento dos tubulões



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

A Figura 23 mostra o acabamento final da parte exposta dos tubulões.

Figura 23 – Tubulões finalizados

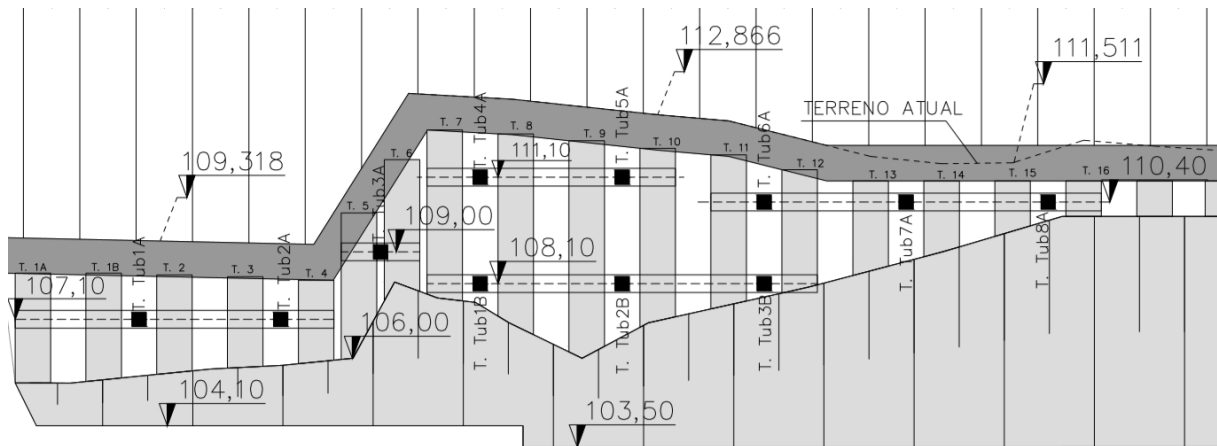


Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

#### 4.4.2 Tirantes

Aliados aos tubulões, existem 11 tirantes (T.Tub1A a T.Tub8A, T.Tub1B a T.Tub3B) definitivos que auxiliam na contenção do talude em alguns pontos, como indicado na Figura 24, a seguir.

Figura 24 – Posicionamento dos tirantes entre os tubulões



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

As dimensões dos tirantes estão indicadas na Tabela 5, a seguir:

Tabela 5 – Dimensões dos tirantes

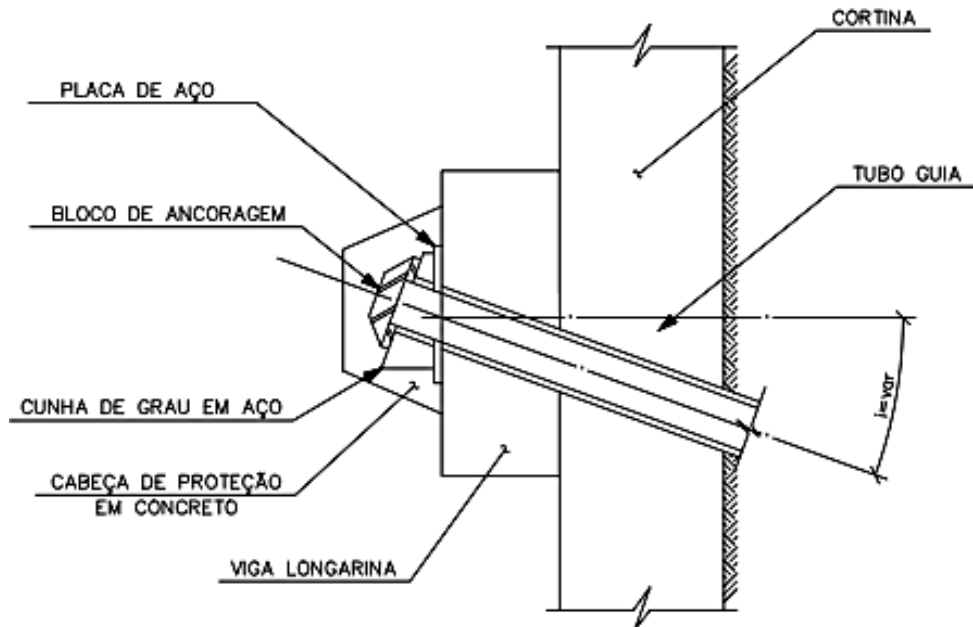
| TIRANTES     | CARGA (tf) | COMPRIMENTO (m) |          | COTA  |
|--------------|------------|-----------------|----------|-------|
|              |            | LIVRE           | ANCORADO |       |
| TUB1A e 2A   | 90         | 25              | 15       | 107,1 |
| TUB3A        | 90         | 25              | 15       | 109,0 |
| TUB4A e 5A   | 90         | 25              | 15       | 111,1 |
| TUB 6A ao 8A | 90         | 25              | 15       | 110,4 |
| TUB1B ao 3B  | 90         | 22              | 15       | 108,1 |

Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

Os tirantes foram executados e ensaiados devidamente conforme a Norma. Todos possuem inclinação de 20° em relação à horizontal e os materiais utilizados foram cordoalhas de 12,7mm de diâmetro, com aço CP 190 RB e calda de cimento com fator água/cimento de

0,5. A Figura 25 mostra em detalhe a cabeça dos tirantes e a Figura 26 mostra alguns tirantes executados.

Figura 25 – Detalhe da cabeça do tirante permanente



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

Figura 26 – Tirantes executados



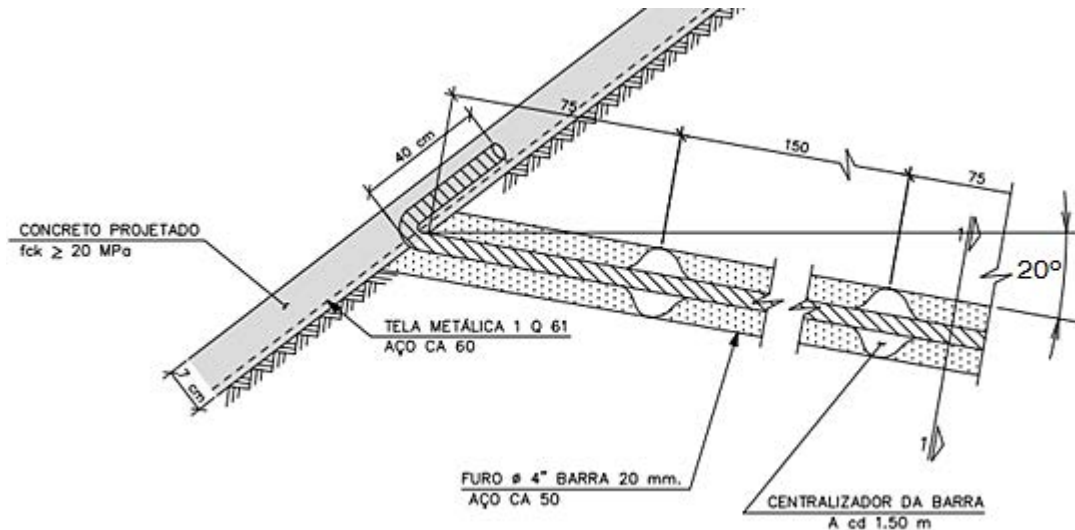
Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

#### 4.4.3 Solo grampeado

Foram executados 168 grampos com aço CA50 de diâmetro 20mm e comprimento 12m, inclinados 20° em relação a horizontal. Os grampos utilizados possuem espaçadores a cada

1,50m para garantir o recobrimento uniforme. A Figura 27 mostra o detalhe dos grampos executados.

Figura 27 – Detalhe do solo grampeado



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

As escavações para implantação do solo grampeado foram executadas em etapas, como mostrado na Figura 28, respeitando a geometria do projeto arquitetônico, as necessidades de implantação dos grampos em cada nível e a estabilidade geral do maciço.

Figura 28 – Escavação para implantação de solo grampeado



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

Logo após a perfuração e o posicionamento da barra, houve a injeção de argamassa com a utilização de bomba, através de bainha com tubo auxiliar removível. Após 12 horas houve reinjeção de argamassa. Foram realizados ensaios de qualificação de grampos executados em solo e ensaios de arrancamento de grampos.

O concreto projetado ( $f_{ck} \geq 20\text{MPa}$ ) foi aplicado em camadas, sendo a primeira de 3cm para o posicionamento da armadura em tela metálica aço CA60, e as demais sucessivamente até completar a espessura total de 7cm. A Figura 29, a seguir, mostra a aplicação do concreto projetado.

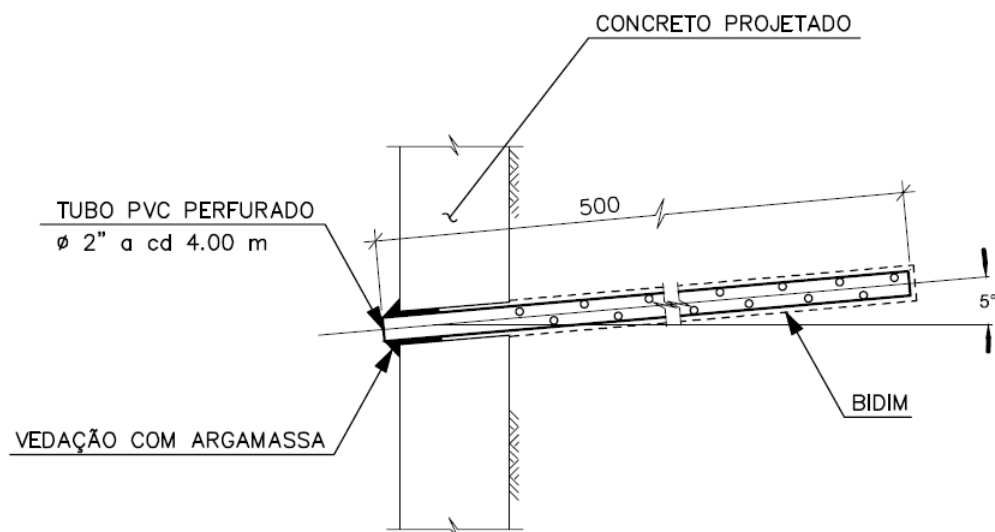
Figura 29 – Execução do concreto projetado em solo grampeado



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

Os drenos de paramento (fibro químicos) foram posicionados antes da execução do concreto projetado. Os drenos horizontais profundos (Figura 30) foram implantados após a execução dos grampos e concreto projetado.

Figura 30 – Detalhe do dreno horizontal profundo



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

#### 4.4.4 Sequência executiva

A sequência de execução das estruturas até alcançar a cota do piso térreo do edifício foi a seguinte:

- 1) Execução dos tubulões.
- 2) Execução da viga de coroamento dos tubulões.
- 3) Escavação até 0,50m abaixo da cota da 1ª linha de tirantes.
- 4) Execução dos tirantes T.TubA (1ª linha).
- 5) Escavação até cota 107,6.
- 6) Execução do solo grampeado até cota 107,6.
- 7) Execução dos tirantes T.TubB na cota 108,1.
- 8) Escavação até cota 103,5.
- 9) Execução do solo grampeado até cota 103,5.

Figura 31 – Visão geral da contenção do talude sendo executada



Fonte: CLM construções e empreendimentos imobiliários LTDA (2016)

#### 4.5 SOFTWARES UTILIZADOS

##### 4.5.1 FTool

Desenvolvido pelo professor Luiz Fernando Martha como parte de um projeto de pesquisa coordenado pelo professor Marcelo Gattas do Departamento de Informática da PUC-Rio, o software FTool possibilita o estudo do comportamento estrutural de pórticos planos de

forma relativamente simples. A utilização do programa parte da criação e caracterização do modelo a ser estudado. O processamento realiza análise pelo método de elementos finitos aplicado a pórticos planos e retorna rapidamente os resultados desejados, que podem ser diagramas ou linhas de influência de esforços normais, esforços cortantes ou momentos fletores, além de configuração deformada da estrutura.

Embora o criador do software não se responsabilize legalmente pelos resultados fornecidos, o mesmo é amplamente adotado principalmente no ambiente educacional por apresentar resultados coerentes e por ser gratuito, simples e otimizar o tempo de estudo.

Neste trabalho o FTool foi utilizado durante o dimensionamento estrutural de um tubulão a céu aberto pelo Método de Blum ao fornecer rapidamente os diagramas de momento fletor de uma estrutura vertical submetida a um carregamento horizontal. Nessa modelagem a estrutura vertical inserida no programa representa o tubulão e o carregamento horizontal refere-se ao empuxo de terra a que o mesmo está submetido.

O dimensionamento foi realizado com base na sequência executiva de escavações dada pelo projeto da contenção. A cada etapa foram calculados os empuxos de terra pela Teoria de Rankine e o valor do empuxo ativo atuante foi inserido como carregamento horizontal no FTool. Então foi obtido o diagrama de momento fletor e o momento fletor máximo em cada etapa de escavação.

#### **4.5.2 Slide**

O software Slide da plataforma Rocscience é renomado por ser completo e abrangente quanto à análise de encostas, aterros, barragens de terra e muros de contenção. Realiza análise de estabilidade por diferentes métodos de equilíbrio limite, além de possibilitar análises probabilísticas extensas. Permite a entrada de geometrias de acordo com a necessidade de usuário, com os respectivos parâmetros de resistência e comportamento hidráulico, cargas e estruturas de contenção e apoio.

A utilização deste programa é muito ampla, tendo sido aplicada neste estudo de caso para análise de estabilidade do talude em questão pelo método de Bishop Simplificado. O modelo foi inserido no programa seguindo a geometria dada pelo projeto da contenção em cada etapa executiva. Os parâmetros do solo utilizados e o nível d'água foram obtidos com base nos resultados das sondagens. A estabilidade do talude foi verificada em cada fase de escavação e de implantação das estruturas de contenção.

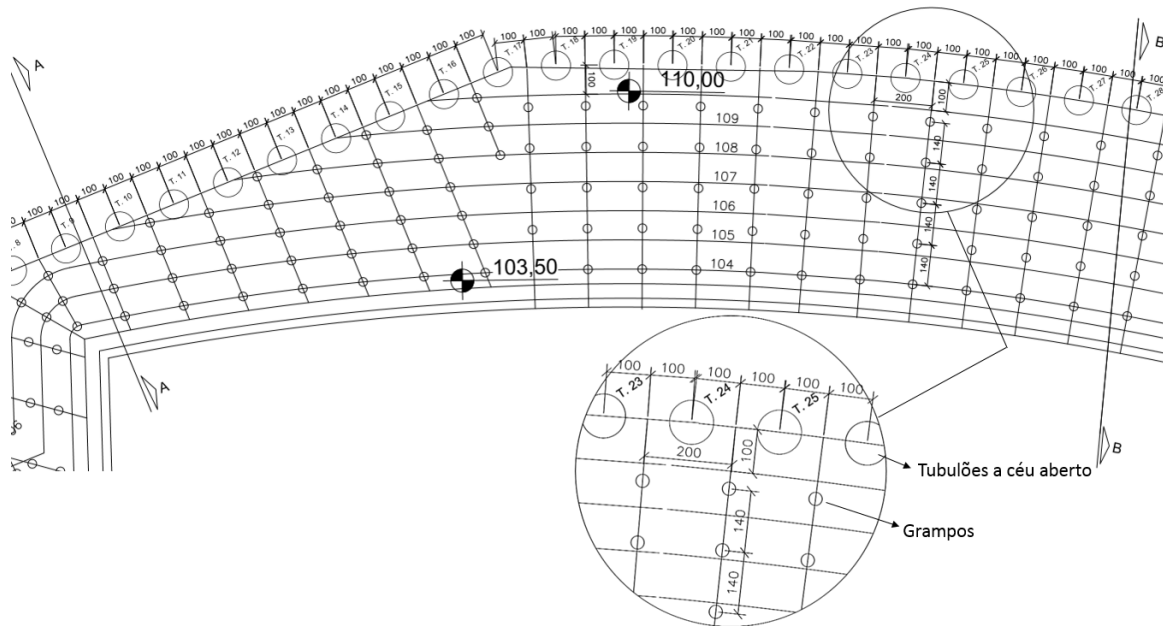
## 5 ESTUDO DE CASO

A partir do material teórico exposto no capítulo 3 e dos dados de projeto do capítulo 4, foi analisada a contenção do talude em dois aspectos: dimensionamento dos tubulões a céu aberto carregados horizontalmente com auxílio do programa FTool e análise de estabilidade global utilizando o software SLIDE.

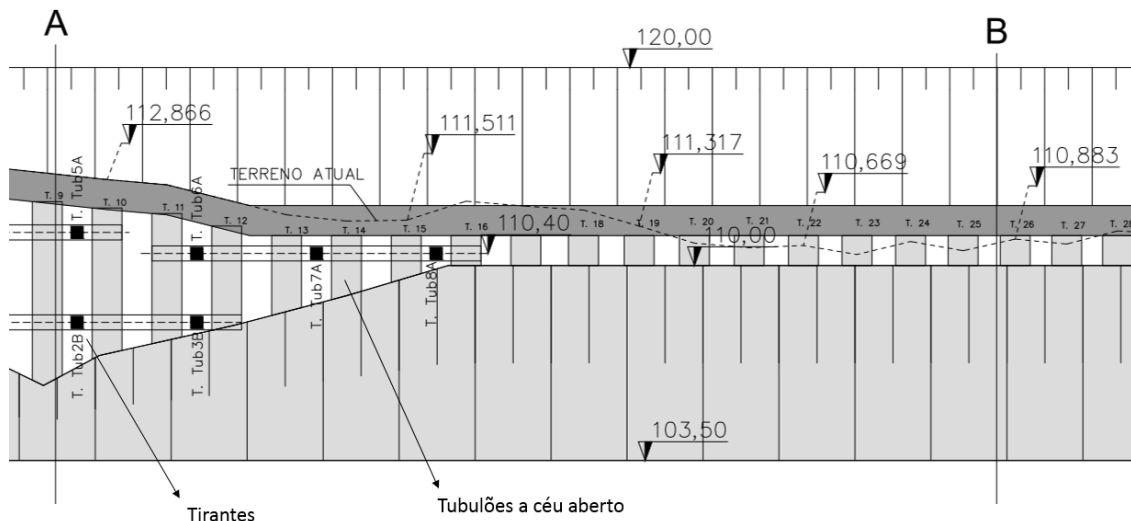
Para esse estudo foram adotadas duas seções do talude: Seção AA e Seção BB, conforme as Figuras 32a e 32b.

Figura 32 – Seções de estudo

(a) Situação em planta



(b) Elevação



Fonte: Adaptado de ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

## 5.1 PARÂMETROS DO SOLO

A partir dos ensaios SPT realizados no local, foram correlacionados os parâmetros do solo para a análise de estabilidade do talude. A interpretação dos boletins de sondagem revela a presença de solo predominantemente argiloso com  $N_{SPT}$  variando aproximadamente entre 5 e 15. Além disso, aponta o nível do lençol freático posicionado em torno da cota 98m, não tendo grande interferência nesse caso, uma vez que o estudo foi realizado até a escavação finalizada na cota 103,5m.

Por haver dificuldades executivas de acesso, os ensaios SPT foram realizados apenas na porção do terreno abaixo no nível do pé do talude original, como é mostrado na Figura 15 apresentada no capítulo 3. Por isso, foi adotado um talude com um único solo homogêneo neste estudo de caso, extrapolando os resultados obtidos nas sondagens. Seguindo a correlação proposta por Joppert Jr na Tabela 2, foram adotados os seguintes valores para os parâmetros do solo considerando-o como Argila Siltosa Pouco Arenosa:

Peso específico natural:  $\gamma_n = 19 \text{ kN/m}^3$

Ângulo de atrito efetivo:  $\phi' = 24^\circ$

Coesão efetiva:  $c' = 20 \text{ kPa}$

## 5.2 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O dimensionamento dos tubulões atirantados carregados horizontalmente foi realizado utilizando a Teoria de Rankine para cálculos dos empuxos de terra, o Método de Blum para o cálculo da ficha mínima e o software FTool para obter os diagramas de esforços internos da estrutura. Foi tomada como exemplo a Seção AA, composta por um tubulão com cota de assentamento 113,0, dois tirantes nas cotas 111,1 e 108,1 e solo grampeado com crista na cota 106,1, com seguinte a sequência executiva:

- Primeira escavação: até 0,5m abaixo da cota do primeiro tirante;
- Segunda escavação: até 0,5m abaixo da cota do segundo tirante;
- Terceira escavação: até a crista do solo grampeado.

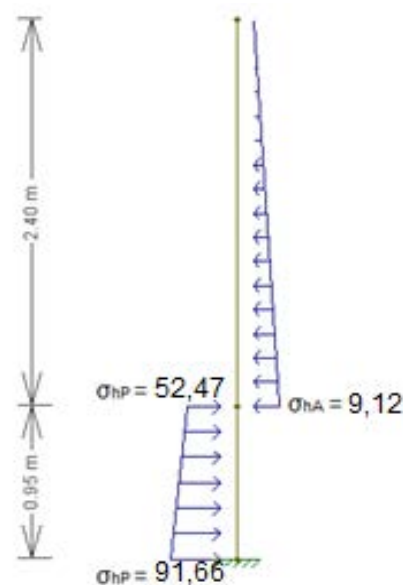
A seguir apresentam-se os resultados para cada fase de escavação, a fim de encontrar a dimensão final do tubulão e sua armadura.

### 5.2.1 Cortina em balanço

Na primeira escavação, determinou-se a ficha mínima ( $f$ ) de uma cortina em balanço para uma escavação de 2,40m de profundidade. A partir do fator de segurança contra o tombamento em relação à base do tubulão, chegou-se ao valor de  $f = 0,95\text{m}$  para  $FS = 1,5$ , por ser uma fase provisória. Por tratar-se de pequena escavação em solo coesivo, o empuxo ativo mostrou-se muito pequeno. Por esse motivo foi adotada a formulação do empuxo ativo mínimo nessa etapa de escavação.

A Figura 33 mostra o diagrama tensões horizontais encontrado para o cálculo do fator de segurança.

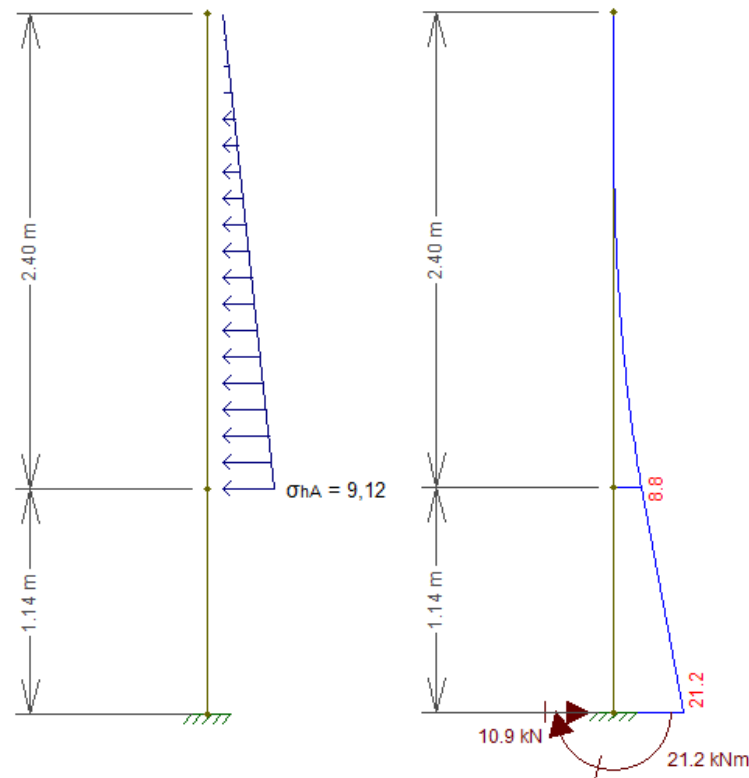
Figura 33 – Diagrama de tensões horizontais para a primeira escavação



Fonte: Autora (2018)

Após encontrar o ponto onde o fator de segurança contra o tombamento é garantido, acrescentou-se o valor de  $0,2f$  à ficha conforme manda a literatura para que o contra empuxo seja mobilizado obtendo, então, ficha total de 1,14m. Inserindo a estrutura no FTool, foi obtido momento máximo  $M = 21,2\text{kNm}$ . A Figura 34 apresenta o diagrama de momento fletor encontrado.

Figura 34 – Diagrama de momento fletor da primeira escavação



Fonte: Autora (2018)

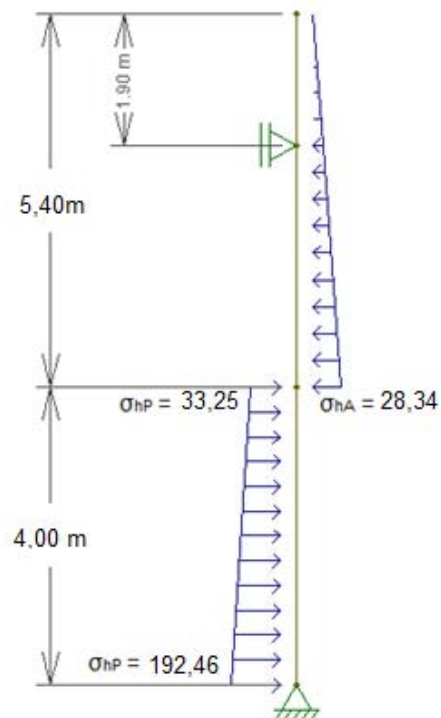
### 5.2.2 Cortina atirantada

As demais escavações foram calculadas como cortinas atirantadas de extremidade apoiada. Após a instalação do primeiro tirante, foi calculada a ficha mínima para a escavação de mais 3 metros, totalizando 5,40m de profundidade. Verificando o fator de segurança provisório quanto ao tombamento em relação à base do tubulão e quanto ao giro em torno do ponto de instalação do tirante, chegou-se a  $f = 4,00m$ . A Figura 35 ilustra o diagrama de tensões horizontais desse caso.

Para inserir a estrutura no software FTool, foi calculado o diagrama de empuxo ativo regularizado em relação ao ponto de aplicação do tirante, como mostra a Figura 36. O momento máximo calculado através do FTool foi  $M = 55,3kNm$  (Figura 37).

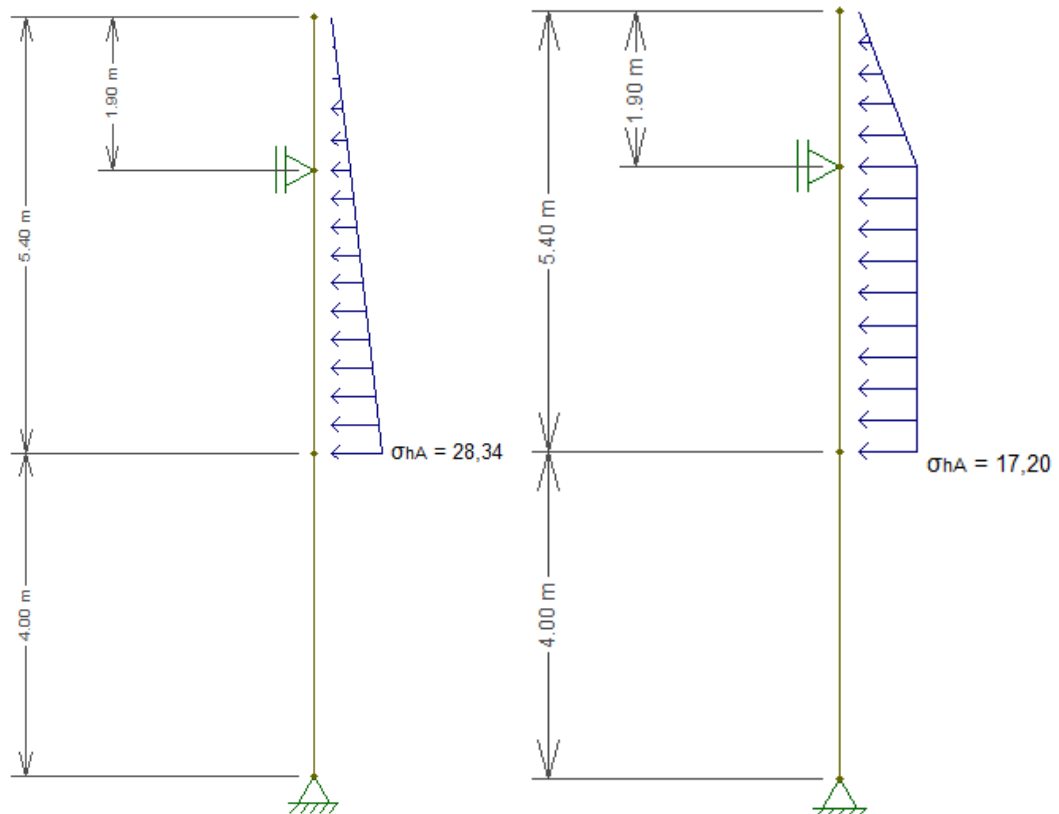
A etapa final é dada pela escavação até a crista do solo grampeado que será implantado posteriormente, em 6,90m de profundidade em relação ao topo do tubulão. Utilizando fator de segurança  $FS = 2,0$  quanto ao tombamento em relação à base do tubulão, chegou-se à ficha de 7,10m. A Figura 38 indica os diagramas de tensões utilizados no cálculo do fator de segurança.

Figura 35 – Diagrama de tensões horizontais para a segunda escavação



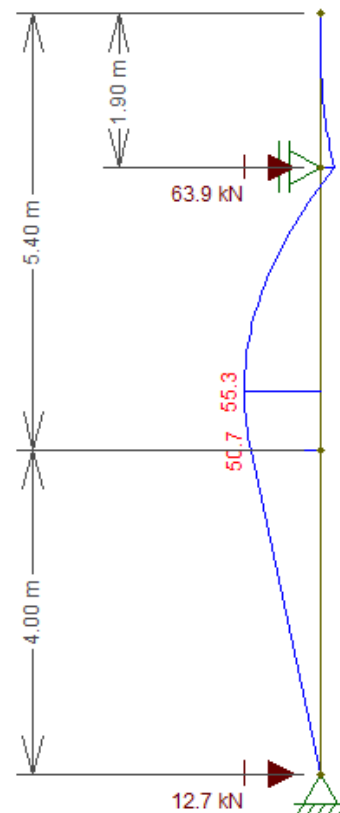
Fonte: Autora (2018)

Figura 36 – Diagrama de empuxo ativo regularizado da segunda escavação



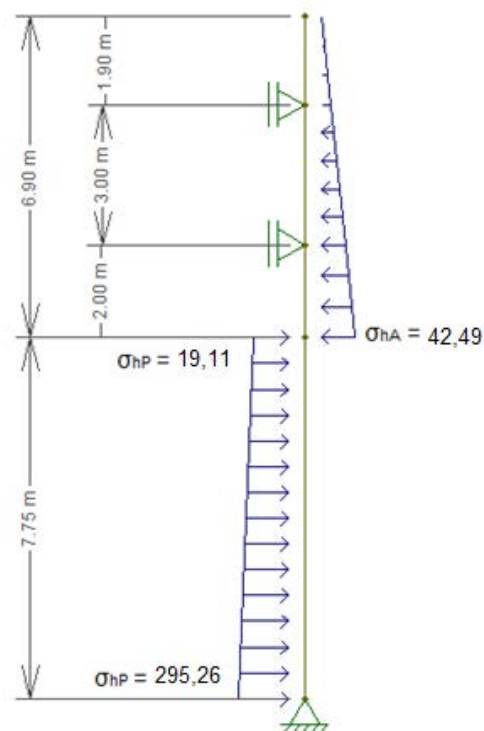
Fonte: Autora (2018)

Figura 37 – Diagrama de momento fletor da segunda escavação



Fonte: Autora (2018)

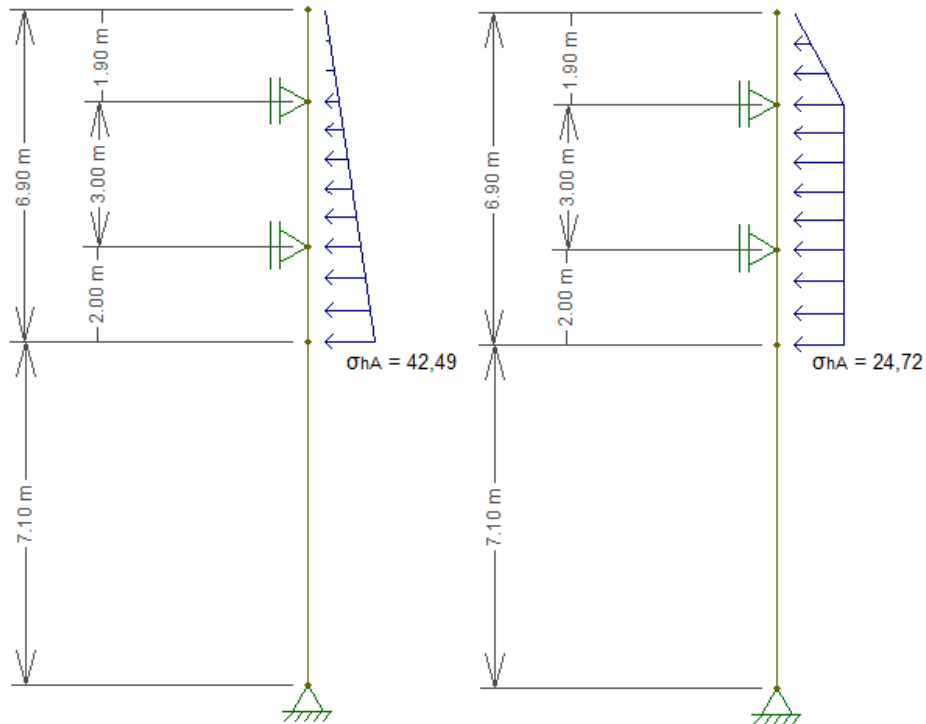
Figura 38 – Diagrama de tensões horizontais para a terceira escavação



Fonte: Autora (2018)

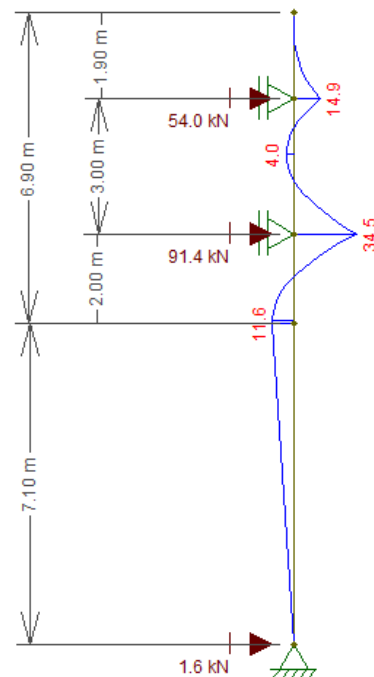
A Figura 39 mostra o diagrama de empuxo ativo regularizado utilizado para cálculo do máximo momento fletor na estrutura (Figura 40), que foi  $M = 34,5\text{kNm}$ .

Figura 39 – Diagrama de empuxo ativo regularizado da terceira escavação



Fonte: Autora (2018)

Figura 40 – Diagrama de momento fletor da terceira escavação



Fonte: Autora (2018)

Por fim, tem-se a dimensão total do tubulão, calculada como 14,00m, e o momento máximo entre as escavações  $M = 55,3kNm$ .

### 5.2.3 Taxa de armadura

Para o cálculo da armadura dos tubulões, foi adotado o ábaco de Walter Pfeil, apresentado no Anexo A. Os valores de entrada no ábaco,  $v$  e  $\mu$ , foram obtidos a partir dos esforços solicitantes na estrutura.

$$v = \frac{N_d}{A_c f_c}; \mu = \frac{M_d}{f_c d^3}; f_c = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Nesse caso,  $v$  é nulo, pois não há carregamento vertical nos tubulões e  $\mu$  foi calculado a partir do maior momento fletor obtido durante o dimensionamento da cortina nos itens anteriores,  $M = 58,4kNm$ .

Sabendo que:

$$M_d = M \gamma_f$$

$$d = 100cm$$

$$f_{ck} = 20MPa$$

$$f_{yk} = 500MPa$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$\gamma_c = 1,8$$

$$\gamma_f = 1,4$$

Tem-se:

$$\mu = 0,009$$

Encontrando o valor de  $\omega$  no ábaco apresentado no Anexo A:

$$\omega = 0,025$$

Tem-se, então a área de aço necessária para os tubulões:

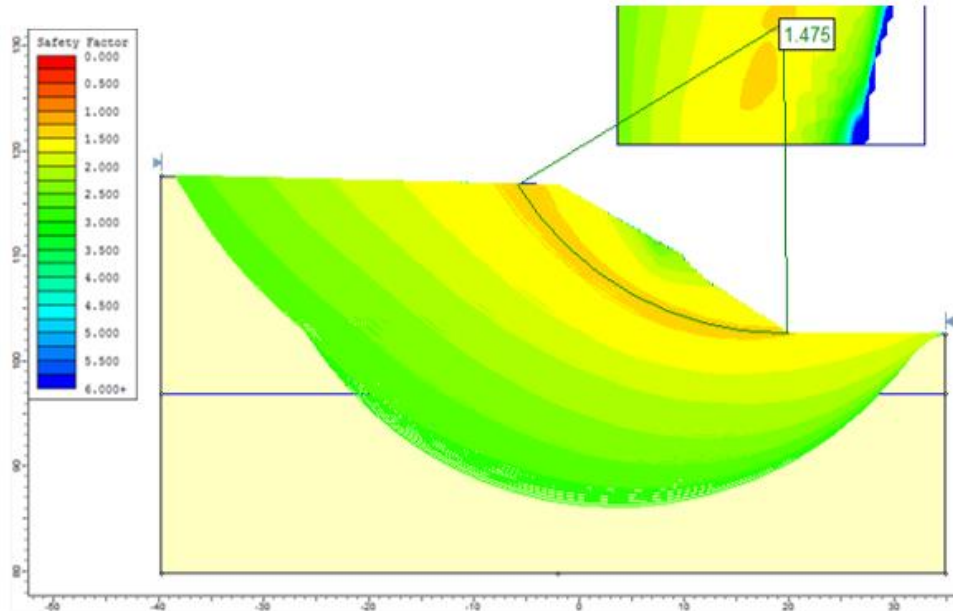
$$A_s = 426,51mm^2$$

Utilizando barras de bitola 20mm de aço CA 50 para compor a armadura, chega-se ao valor exato de 1,4, que seriam 2 barras. Avaliando a armadura mínima exigida pela norma, encontramos o valor de 12,5, ou seja, 13 barras. Este valor foi adotado por ser maior que aquele calculado anteriormente.



talude apresentava-se estável antes das escavações, ou seja, com fator de segurança maior que 1,0.

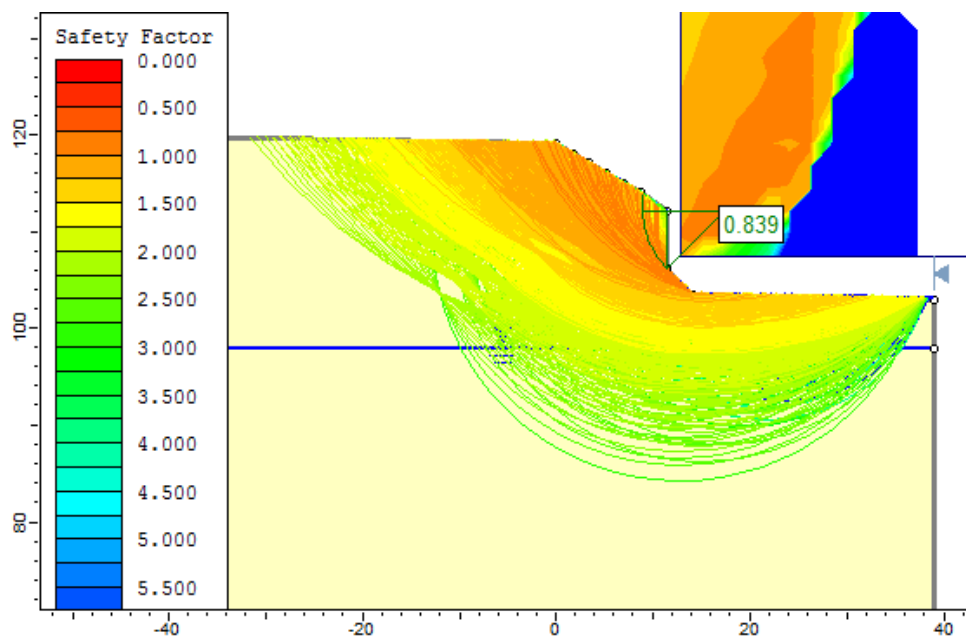
Figura 42 – Estabilidade global do talude original na seção AA



Fonte: Autora (2018)

Dado o corte necessário para a seção AA, foi novamente analisada a estabilidade do talude. O resultado, mostrado na Figura 43, revelou fator de segurança crítico igual a 0,839. Tal valor indica a necessidade de realizar a contenção do talude, visto que a ruptura aconteceria assim que o fator de segurança crítico chegasse a 1,0 durante a escavação sem contenção alguma.

Figura 43 – Estabilidade global do talude escavado na seção AA

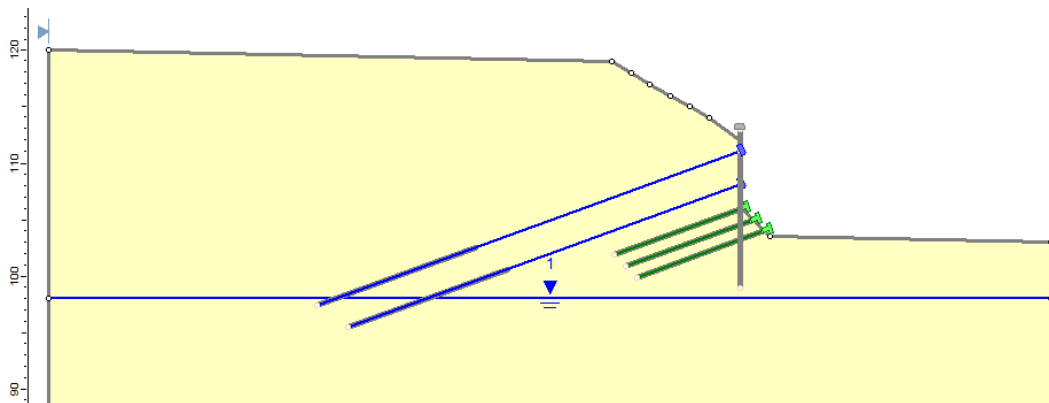


Fonte: Autora (2018)

O passo seguinte foi a análise da estabilidade da contenção do talude prevista em projeto, conforme a Figura 44. A seção AA conta os seguintes elementos:

- Tubulão a céu aberto como elemento de paramento, com cota de base 99,0 e cota de assentamento 113,0;
- Dois tirantes (T.Tub5A e T.Tub2B) nas cotas 111,1 e 108,1 com comprimento livre de 25 e 22m, respectivamente, ambos com carga 900kN, comprimento ancorado 15m e inclinados 20° em relação a horizontal;
- Três grampos de 12m de comprimento e inclinação de 20° posicionados a partir da cota 106,0, espaçados verticalmente de 1m.

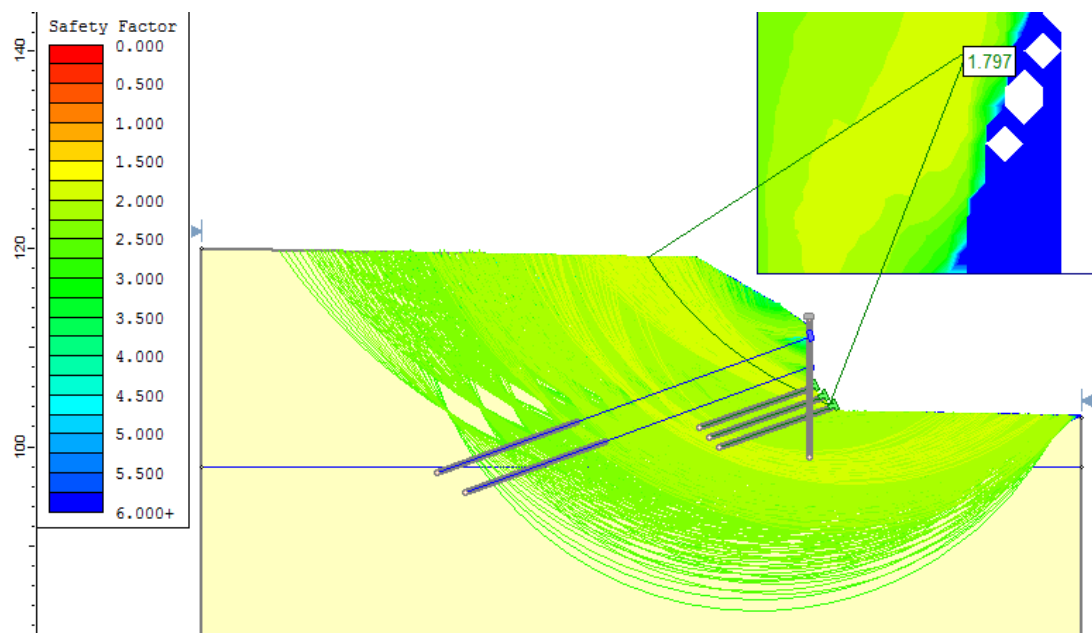
Figura 44 – Contenção do talude escavado na seção AA



Fonte: Autora (2018)

A estabilidade foi testada, retornando fator de segurança crítico de 1,797, comprovando a eficácia da estabilização final, como mostra a figura 45

Figura 45 – Estabilidade global da contenção do talude escavado na seção AA



Fonte: Autora (2018)

No entanto, o resultado encontrado para o talude escavado sem contenção mostra que deve-se realizar a escavação em etapas para evitar a ruptura do solo. Para isso, foi seguida a sequência executiva prevista em projeto, cujas etapas pertinentes a essa seção estão representadas na Tabela 6, com os resultados de análise de estabilidade global em cada uma.

Tabela 6 – Estabilidade global das etapas de escavação na seção AA

| <b>Etapas</b> | <b>Descrição</b>                                     | <b>Fator de segurança</b> |
|---------------|------------------------------------------------------|---------------------------|
| 3             | Escavação até a cota 110,6                           | 1,946                     |
| 4             | Execução da primeira linha de tirantes na cota 111,1 | 2,119                     |
| 5             | Escavação até cota 107,6                             | 1,852                     |
| 7             | Execução da segunda linha de tirantes na cota 108,1  | 2,042                     |
| 8             | Escavação até a cota 103,5                           | 1,537                     |
| 9             | Execução do solo grampeado até cota 103,5            | 1,797                     |

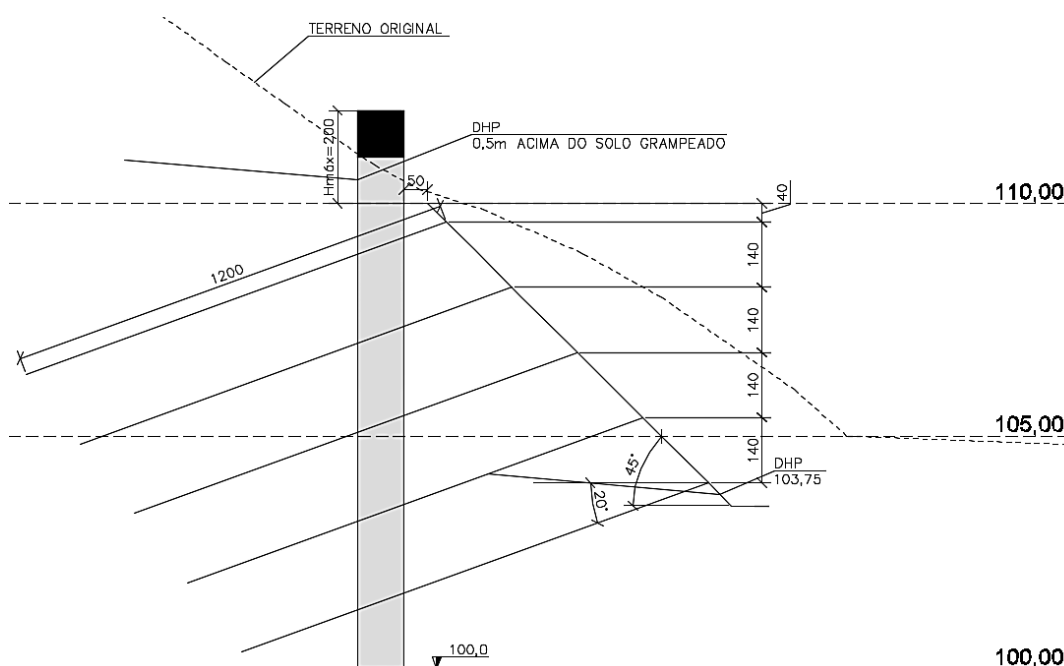
Fonte: Autora (2018)

Os resultados apresentados na Tabela 6 indicam fatores de segurança superiores a 1,0. Assim, garante-se a estabilidade do talude a cada etapa de escavação e execução dos tirantes e grampos na seção AA.

### 5.3.2 Seção BB

Para a segunda seção, foi adotado o corte BB (Figura 46) para análise.

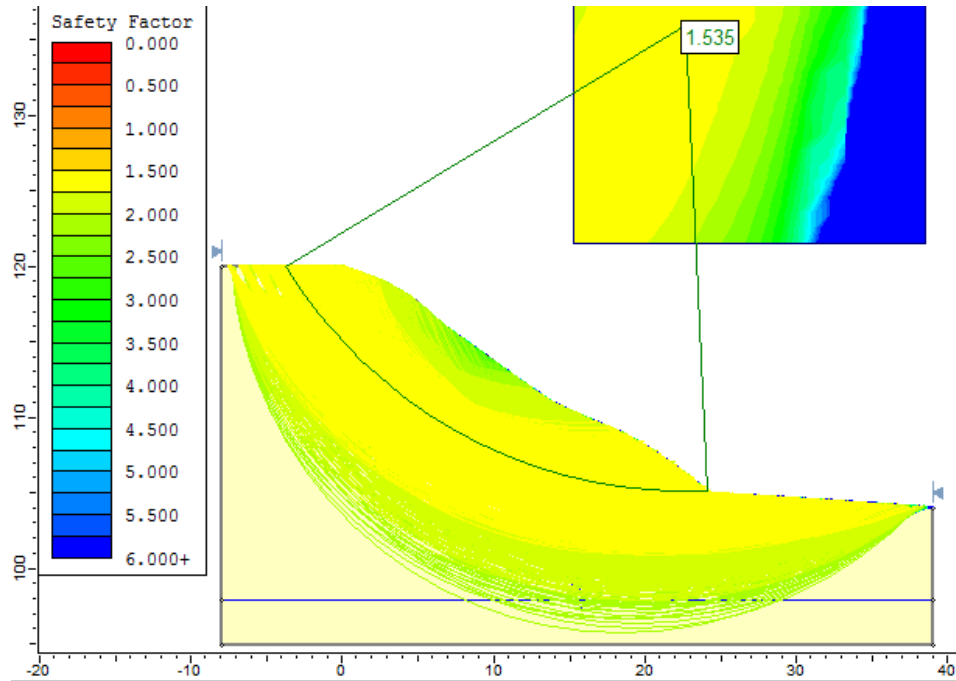
Figura 46 – Seção BB para análise de estabilidade global do talude



Fonte: ZF & Engenheiros Associados S/S (2015)

A análise do talude original (Figura 47), assim como na seção anterior, forneceu fator de segurança superior a 1,0, conforme esperado. O fator de segurança obtido foi de 1,535.

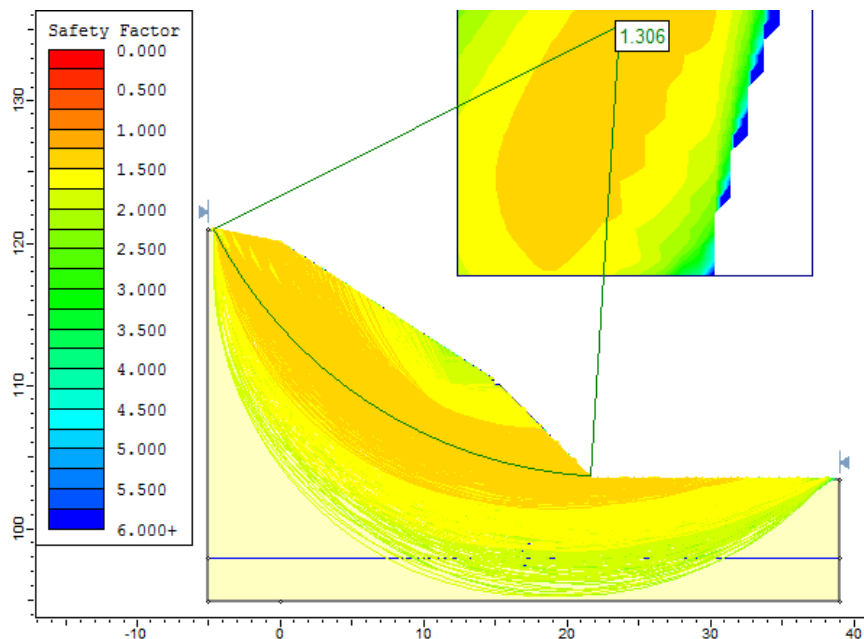
Figura 47 – Estabilidade global do talude original na seção BB



Fonte: Autora (2018)

A análise de estabilidade global do talude cortado (Figura 48), retornou fator de segurança crítico igual a 1,306. Apesar de ser superior a 1,0, não indicando necessariamente a ruptura do maciço de solo após a escavação, tal valor não alcança a segurança indicada pela NBR11682/1991, que exige fator de segurança mínimo de 1,50.

Figura 48 – Estabilidade global do talude escavado na seção BB

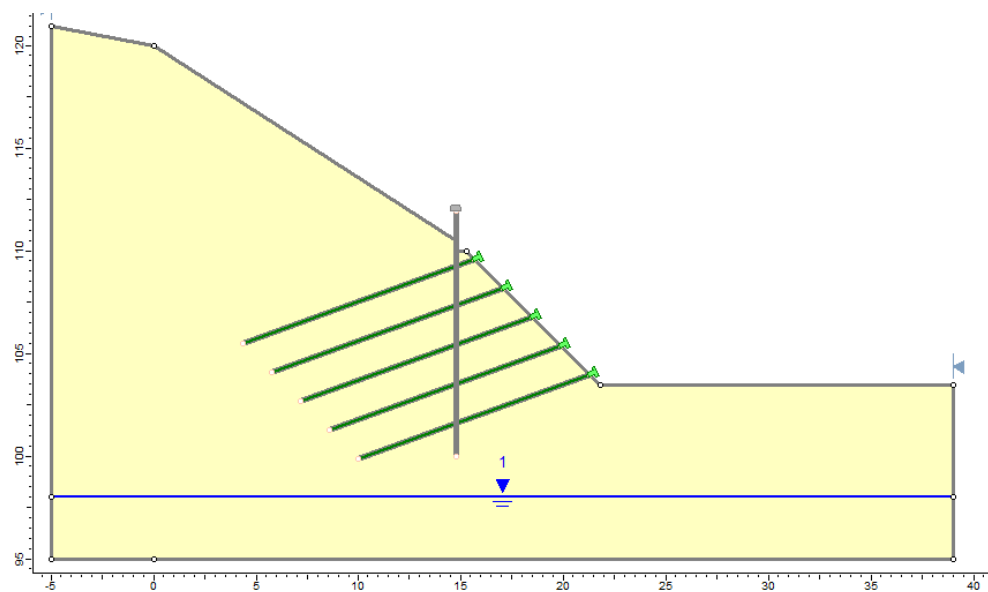


Fonte: Autora (2018)

Assim como na seção anterior, foi analisada a estabilidade global da contenção do talude prevista em projeto (Figura 49), com os seguintes elementos:

- Tubulão a céu aberto como elemento de paramento, com cota de base 100,0 e cota de assentamento 112,0;
- Cinco grampos de comprimento 12m e inclinação 20° a partir da cota 109,6, espaçados verticalmente de 1,4m.

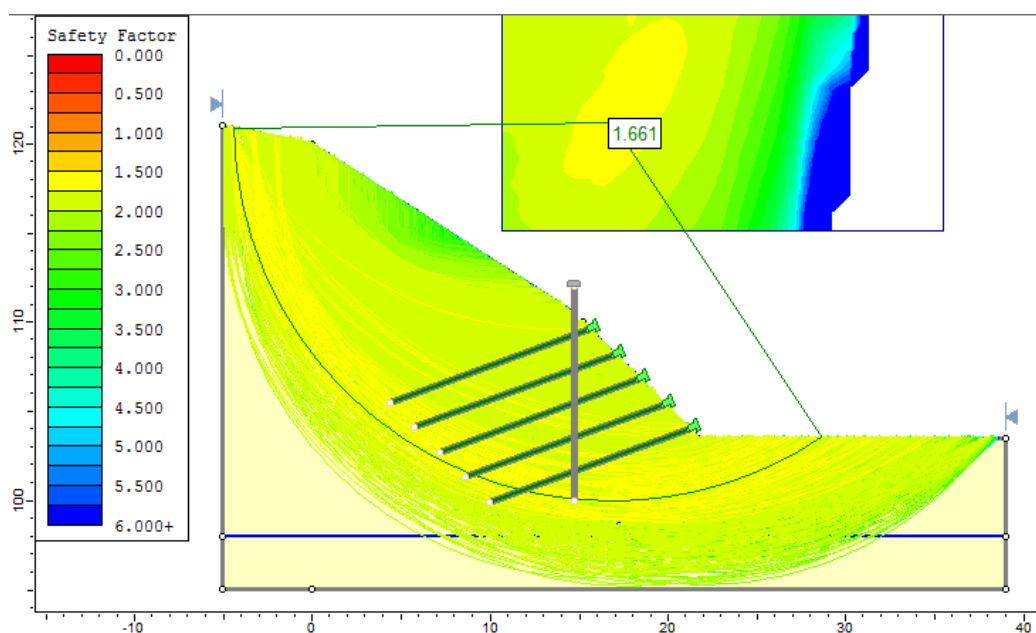
Figura 49 – Contenção do talude escavado na seção BB



Fonte: Autora (2018)

A análise de estabilidade do talude após a execução da contenção forneceu fator de segurança crítico de 1,661, conforme a figura 50.

Figura 50 – Estabilidade global da contenção do talude escavado na seção BB



Fonte: Autora (2018)

Para a seção BB também foi verificada a estabilidade global nas etapas de interesse da sequência executiva prevista em projeto. Os fatores de segurança encontrados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Estabilidade global das etapas de escavação na seção BB

| <b>Etapa</b> | <b>Descrição</b>                          | <b>Fator de segurança</b> |
|--------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| 5            | Escavação até cota 107,6                  | 1,580                     |
| 6            | Execução do solo grampeado até cota 107,6 | 1,744                     |
| 8            | Escavação até a cota 103,5                | 1,475                     |
| 9            | Execução do solo grampeado até cota 103,5 | 1,661                     |

Fonte: Autora (2018)

Os fatores de segurança obtidos nas etapas da sequência executiva para a seção BB foram superiores a 1,0, assegurando a estabilidade ao longo do processo.

## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho evidenciou a enorme importância da análise de estabilidade de taludes e do conhecimento a respeito de estruturas de contenção, principalmente com o crescimento de centros urbanos e consequente aumento da demanda de espaço útil disponível. No caso estudado, a escavação necessária para implantar o subsolo do edifício residencial Pateo Jacuy mostrou-se instável a partir da análise de estabilidade global pelo método de Bishop Simplificado utilizando o software Slide. Dessa forma, surgiu a necessidade de buscar alternativas para viabilizar o projeto.

Muitas são as possibilidades que poderiam ser aplicadas para estabilizar o maciço de solo, não havendo uma solução única e exata. Logo, é importante que a equipe responsável pelo projeto tenha experiência e conhecimento de diferentes tipos de estruturas para chegar a uma solução satisfatória para cada caso.

O edifício Pateo Jacuy contou com tubulões a céu aberto, tirantes e solo grampeado para a contenção do talude escavado. Uma vez que a escavação total sem contenção apresentou fator de segurança inferior a 1,0 na seção AA, o projeto foi desenvolvido seguindo etapas de escavação e execução das estruturas. A cada etapa foi verificado o fator de segurança contra a ruptura e todos foram superiores a 1,0, além da etapa final que apresentou fator de segurança maior que 1,5 nas duas seções estudadas, garantindo a estabilidade do talude segundo a NBR 11682/1991.

O projeto em questão foi desenvolvido para a escavação até o nível do segundo subsolo (cota 97,7) e este trabalho estudou apenas a escavação provisória prevista até o nível do pavimento térreo (cota 103,5) nas proximidades do talude e até a cota final pretendida no centro do terreno, ponto em que a obra foi executada até o momento. Contudo, visto a finalidade e o porte da obra, poder-se-ia considerar uma alteração em relação ao projeto inicial, reduzindo a quantidade de vagas no subsolo para evitar as próximas etapas de escavação do talude, já que a obra mostrou-se bastante onerosa e complicada até o momento. A revisão do projeto possibilitaria a retomada da obra que encontra-se parada há alguns meses, executando o subsolo em uma área menor que já encontra-se escavada.

Quanto ao dimensionamento estrutural dos tubulões, sua medida calculada foi de 14 metros, valor igual ao do tubulão executada. Em relação à armadura, o valor calculado para a armadura mínima conforme a NBR 6122/2010 foi de 13 barras de bitola 20mm, enquanto na realidade os tubulões foram executados com 16 barras. Essa pequena diferença provavelmente

deve-se a parâmetros e considerações de cálculo adotadas, além de que o estudo foi baseado em apenas um tubulão enquanto a contenção é composta por 38 tubulões ao longo do talude.

O objetivo do trabalho foi alcançado com a análise estrutural e geotécnica das estruturas, já que os resultados obtidos foram bem próximos do esperado para a realidade desse caso, ou seja, tubulão com 14 metros e talude com fator de segurança contra a ruptura maior que 1,50.

Para trabalhos futuros pode-se utilizar outras correlações dos resultados do ensaio SPT com os parâmetros do solo, e também outros métodos de análise de estabilidade global e comparar os resultados obtidos. Além disso, pode-se estudar outras seções da contenção ou, ainda, propor e analisar a eficiência de outras estruturas de contenção para esse talude, levando em conta a garantia de estabilidade, o método construtivo e o custo benefício.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMENTO, M.; KOSHIMA, A.; ZIRLIS, A. C. Reforço do terreno. In: \_\_\_\_\_. HACHICH, W. et al. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p.641-690.
- ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. 2. ed. São Paulo: Bluncher, 2010.
- ALONSO, U. R. **Previsão e controle das fundações**. São Paulo: Bluncher, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-11682**: estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991. 35p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5629**: execução de tirantes ancorados no terreno. Rio de Janeiro, 2006. 32p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010. 91p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8044**: projeto geotécnico. Rio de Janeiro, 1983. 58p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6484**: solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 17p.
- BARROS, P. L. A. **Estruturas de contenção**. 2015. Aula para a disciplina de Geotecnia II – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015. Disponível em: <[http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic523/solo\\_reforcado\\_cortinas.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic523/solo_reforcado_cortinas.pdf)>. Acesso em: 30 set. 2018.
- CAPUTO, A. N. et al.. Análise, projeto e execução de escavações e contenções. In: \_\_\_\_\_. HACHICH, W. et al. **Fundações: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 537-578.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. v.1.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Empuxos de terra e muros de gravidade**. Rio de Janeiro: Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações – UFRJ, 2010.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro: Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações – UFRJ, 2009
- GERSCOVICH, D. M. S. **Tensões em solos**. Rio de Janeiro: Faculdade de Engenharia, Departamento de Estruturas e Fundações – UFRJ, 2008
- GONDIM, A. **Dimensionamento geotécnico de solo grampeado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

GUIDICINI, G. NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1976. p. 116-138.

JOPPERT JÚNIOR, I. **Fundações e contenções de edifícios**. São Paulo: PINI, 2007.

MASSAD, F. **Obras de terra**: curso básico de Geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010. p. 63-82.

QUARESMA, A. R. et al. Investigações geotécnicas. In: \_\_\_. HACHICH, W. et al. **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 119-162.

RANZINI, S. M. T.; NEGRO JÚNIOR, A. Obras de contenção: tipos, métodos construtivos, dificuldades executivas. In: \_\_\_. HACHICH, W. et al. **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 497-515.

SAES, J. L.; STUCCHI, F. R.; MILITTISKY, J. Concepção de obras de contenção. In: \_\_\_. HACHICH, Waldemar et al. **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 517-536.

SCHÄFFER, A. **Concreto armado II**: flexão composta. Porto Alegre: Faculdade de Engenharia - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <[http://www.politecnica.pucrs.br/professores/almir/Estruturas\\_de\\_Concreto\\_Armado\\_II/Flexao\\_Composta.pdf](http://www.politecnica.pucrs.br/professores/almir/Estruturas_de_Concreto_Armado_II/Flexao_Composta.pdf)>. Acesso em: 30 set. 2018.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. p. 13 a 62

SOLOTRAT. **Manual de serviços geotécnicos solotrat**. 6. ed. 2018. Disponível em: <<http://www.solotrat.com.br/>>. Acesso em 23 ago. 2018.

SOUZA, A. J. A. **Previsão do comportamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando o software Ftool**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

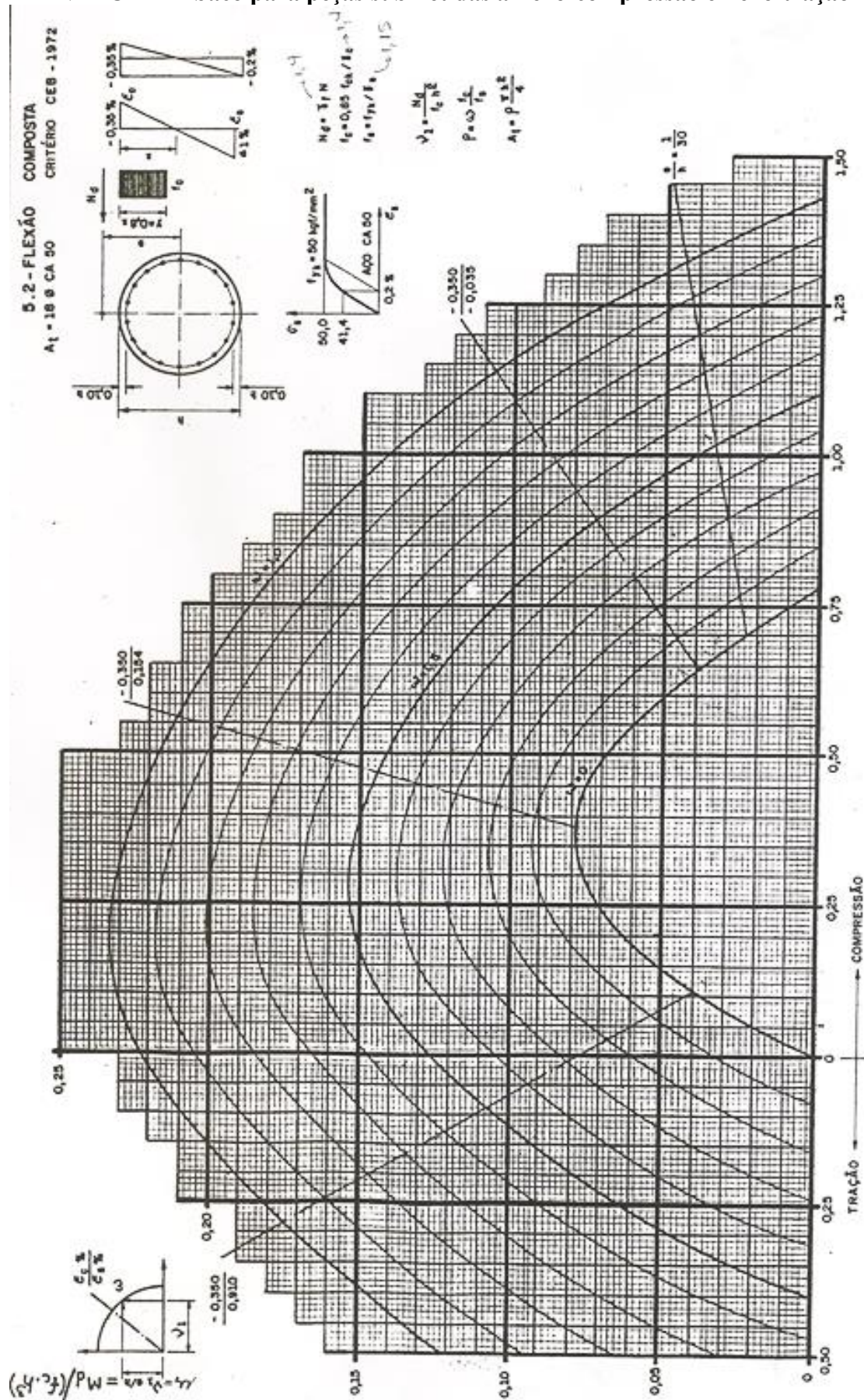
VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

YASSUDA, C. T.; DIAS, P. H. V. Tirantes. In: \_\_\_. HACHICH, W. et al. **Fundações**: teoria e prática. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 603-640.

ZIRLIS, A. C. et al. **Solo grampeado**: a arte de estabilizar, uma técnica moderna e eficaz. Solotrat, 2010. Disponível em: <<http://www.solotrat.com.br/assets/pdf/2010-solo-grampeado-a-arte-de-estabilizar-uma-tecnica-moderna-e-eficaz.pdf>>. Acesso em 18/set/2018.

ZIRLIS, A. C. **Solo grampeado**: execução. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1999. 20p.

# ANEXO A – Ábaco para peças submetidas à flexo-compressão e flexo-tração



## ANEXO B – Boletim de sondagem representativo

| PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAAGEM A PERCUSSÃO                    |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | SP - 04                     |                                                        |
|---------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| COTA E NÍVEL D'ÁGUA                                           | PROFUND. (m) | CONVENÇÃO GRÁFICA                                                                         | DESCRIÇÃO DO MATERIAL                                                                        | INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA        | AMOSTRADOR: TERZAGHI & PECK.<br>Ø ext. 2" QUEDA DE 75cm.<br>Ø int. 3/8" PESO DE 65 Kg.<br>Nº DE GOLPES - PENETRAÇÕES |                             | PENETRAÇÃO SPT/30cm.<br>INICIAIS _____<br>FINAIS _____ |
| N.a.<br>5,73<br>—                                             | 0,21         |                                                                                           | Argila arenosa, pouco siltosa, muito mole, cor vermelho escuro.                              | At                             |                                                                                                                      |                             |                                                        |
|                                                               | 1,48         |                                                                                           | Argila arenosa, pouco siltosa, mole,                                                         | Sd                             | 1                                                                                                                    | 1                           | 2                                                      |
|                                                               | 7,70         |                                                                                           | Argila siltosa, pouco arenosa, média a rija, cor variegada, vermelho, cinza claro e amarelo. | Sd                             | 3                                                                                                                    | 1                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 2                                                                                                                    | 3                           | 4                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 2                                                                                                                    | 4                           | 6                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 3                                                                                                                    | 4                           | 5                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 4                                                                                                                    | 5                           | 6                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 5                                                                                                                    | 6                           | 8                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 5                                                                                                                    | 7                           | 9                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 2                                                                                                                    | 3                           | 3                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 2                                                                                                                    | 2                           | 3                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 3                                                                                                                    | 3                           | 3                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 3                                                                                                                    | 3                           | 4                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 3                                                                                                                    | 5                           | 7                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 3                                                                                                                    | 5                           | 8                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 3                                                                                                                    | 7                           | 7                                                      |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                | 4                                                                                                                    | 5                           | 8                                                      |
| 4                                                             | 5            | 6                                                                                         |                                                                                              |                                |                                                                                                                      |                             |                                                        |
| 12,81                                                         |              | Argila arenosa, pouco siltosa, mole a rija, cor amarelo claro e cinza claro.              | Sd                                                                                           | 12                             | 12                                                                                                                   |                             |                                                        |
| 17,97                                                         |              | Argila arenosa, pouco siltosa, média a rija, cor variegada, vermelho, roxo e cinza claro. | Sd                                                                                           | 13                             | 13                                                                                                                   |                             |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              | 3                              | 7                                                                                                                    | 7                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              | 3                              | 4                                                                                                                    | 6                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              | 4                              | 5                                                                                                                    | 8                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              | 4                              | 5                                                                                                                    | 8                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              | 4                              | 5                                                                                                                    | 6                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              | 4                              | 5                                                                                                                    | 6                           |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      |                             |                                                        |
| OBS. : At. = Aterro<br>Sd. = Sedimento<br>SR. = Solo Residual |              |                                                                                           |                                                                                              | PROFUNDIDADE FINAL<br>Continua |                                                                                                                      | ENSAIO DE LAVAGEM POR TEMPO |                                                        |
| MÉTODOS DE PERFURAÇÃO                                         |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | COORDENADAS                 |                                                        |
| DATA                                                          | HORA         | N.A.                                                                                      | DATA                                                                                         | HORA                           | N.A.                                                                                                                 | AVANÇO A TRADO :            | 0,00 a 6,00 m                                          |
| 01/07/11                                                      |              | 6,08                                                                                      |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | AVANÇO POR LAVAGEM :        | 6,45 a 30,45 m                                         |
| 01/07/11                                                      |              | 5,87                                                                                      |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | REVESTIMENTO :              | 0,00 a 7,00 m                                          |
| 01/07/11                                                      |              | 5,73                                                                                      |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | INÍCIO :                    | 01/07/11                                               |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | TÉRMINO :                   | 01/07/11                                               |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | N=                          |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | E=                          |                                                        |
|                                                               |              |                                                                                           |                                                                                              |                                |                                                                                                                      | COTA=                       | +2,82                                                  |

## ANEXO B – Boletim de sondagem representativo (continuação)

| PERFIL INDIVIDUAL DE SONDAAGEM A PERCUSSÃO                                                                      |              |                   |                                                                                            |                         |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    | SP - 04                                                |                                     |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|--|
| COTA E NÍVEL D'ÁGUA                                                                                             | PROFUND. (m) | CONVENÇÃO GRÁFICA | DESCRIÇÃO DO MATERIAL                                                                      | INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA | AMOSTRADOR: TERZAGHI & PECK.<br>Ø ext. 2" QUEDA DE 75cm.<br>Ø int. 3/8" PESO DE 65 Kg.<br>Nº DE GOLPES - PENETRAÇÕES |                                                              |                             |         |    | PENETRAÇÃO SPT/30cm.<br>INICIAIS _____<br>FINAIS _____ |                                     |  |
| 18,4<br>6                                                                                                       | 21,7<br>4    | [Hatched Pattern] | Areia média, argilosa, medianamente compacta, cor variegada, cinza claro, vermelho e roxo. | Sd                      | 4                                                                                                                    | 6                                                            | 7                           | 13      | 18 | <b>GRÁFICO DE PENETRAÇÃO</b><br>                       |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 15                                                                                                                   | 15                                                           | 15                          | 10      | 19 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 3                                                                                                                    | 4                                                            | 6                           | 12      | 20 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 15                                                                                                                   | 15                                                           | 15                          | 10      | 21 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 3                                                                                                                    | 5                                                            | 7                           | 11      | 22 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 15                                                                                                                   | 15                                                           | 15                          | 9       | 23 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 3                                                                                                                    | 4                                                            | 5                           | 19      | 24 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 15                                                                                                                   | 15                                                           | 15                          | 14      | 25 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 4                                                                                                                    | 7                                                            | 12                          | 14      | 26 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 15                                                                                                                   | 15                                                           | 15                          | 12      | 27 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 3                                                                                                                    | 5                                                            | 9                           | 14      | 28 |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            |                         | 15                                                                                                                   | 15                                                           | 15                          | 17      | 29 |                                                        |                                     |  |
| 3                                                                                                               | 7            | 10                | 22                                                                                         | 30                      |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| 15                                                                                                              | 15           | 15                |                                                                                            | 31                      |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| 5                                                                                                               | 9            | 13                |                                                                                            | 32                      |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| 15                                                                                                              | 15           | 15                |                                                                                            | 33                      |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
|                                                                                                                 |              |                   |                                                                                            | 34                      |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| Fim da Sondagem = 30,45 m                                                                                       |              |                   |                                                                                            |                         |                                                                                                                      |                                                              |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| OBS. : At. = Aterro<br>Sd. = Sedimento<br>SR. = Solo Residual                                                   |              |                   |                                                                                            |                         | PROFUNDIDADE FINAL<br>30,45 m                                                                                        |                                                              | ENSAIO DE LAVAGEM POR TEMPO |         |    |                                                        |                                     |  |
| MEDIDAS DOS NÍVEIS D'ÁGUA                                                                                       |              |                   |                                                                                            |                         | MÉTODO DE PERFURAÇÃO                                                                                                 |                                                              |                             |         |    | COORDENADAS                                            |                                     |  |
| DATA                                                                                                            | HORA         | N.A.              | DATA                                                                                       | HORA                    | N.A.                                                                                                                 | AVANÇO A TRADO : 0,00 a 6,00 m                               |                             |         |    |                                                        | N= _____<br>E= _____<br>COTA= +2,82 |  |
| 01/07/11                                                                                                        |              | 6,08              |                                                                                            |                         |                                                                                                                      | AVANÇO POR LAVAGEM : 6,45 a 30,45 m                          |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| 01/07/11                                                                                                        |              | 5,87              |                                                                                            |                         |                                                                                                                      | REVESTIMENTO : 0,00 a 7,00 m                                 |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| 01/07/11                                                                                                        |              | 5,73              |                                                                                            |                         |                                                                                                                      | INÍCIO : 01/07/11<br>TÉRMINO : 01/07/11                      |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| CLIENTE : Nasei Abbas                                                                                           |              |                   |                                                                                            |                         |                                                                                                                      | OBRA : Reconhecimento Simples do Subsolo                     |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| R. CEL. MANUEL FELICIANO DE SOUZA, 47 - CEP. 08.060-060<br>FONE/FAX. (0XX)11 6297-3466 SÃO MIGUEL PAULISTA - SP |              |                   |                                                                                            |                         |                                                                                                                      | LOCAL : Av. Afonso de Baião, s/nº - São Miguel Paulista / SP |                             |         |    |                                                        |                                     |  |
| DESENHISTA                                                                                                      |              | ESCALA            |                                                                                            | DATA                    |                                                                                                                      | FOLHA Nº                                                     |                             | SITE Nº |    |                                                        |                                     |  |
| ENG. RESPONSÁVEL DOUGLAS GODOY GOMES-CREA. 937.342/D                                                            |              | Andressa          |                                                                                            | 1 : 100                 |                                                                                                                      | Junho / 2011                                                 |                             | 425     |    |                                                        |                                     |  |