

**Lidiani Cristina Pierri  
Rafael Pacheco dos Santos  
Marcos Aurélio Marques Noronha  
Jair José dos Passos Junior**



**Desenvolvimento Conceitual  
de uma Técnica para Escavação  
de Microtúneis em Solo**

Lidiani Cristina Pierri  
Rafael Pacheco dos Santos  
Marcos Aurélio Marques Noronha  
Jair José dos Passos Junior

# Desenvolvimento Conceitual de uma Técnica para Escavação de Microtúneis em Solo

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Natália Sandrini e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

D451 Desenvolvimento conceitual de uma técnica para escavação de microtúneis em solo [recurso eletrônico] / Lidiani Cristina Pierri... [et al.]. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-219-7

DOI 10.22533/at.ed.197192803

1. Engenharia civil (Geotécnica). I. Pierri, Lidiani Cristina.  
II. Santos, Rafael Pacheco dos. III. Noronha, Marcos Aurélio Marques.  
IV. Passos Junior, Jair José dos.

CDD 624

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, quero agradecer a Deus, por ter abençoado todos os dias da minha vida, por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais, Maria de Fátima da Silva Pierri e Edson Rogério Pierri, por serem modelos de coragem, pelo seu apoio incondicional, incentivo, amizade e paciência demonstrada e total ajuda na superação dos obstáculos que ao longo desta caminhada foram surgindo. A eles que dedico este trabalho.

Ao meu grande amigo Rafael Pacheco dos Santos, meu muito obrigada por todos os momentos que passamos juntos. Agradeço o privilégio de ser sua amiga. Agradeço também pela companhia diária, pelo ombro amigo e pela confiança. Sempre contei com seu apoio, incentivo e amizade.

Às minhas amigas, Livia Rodrigues Lothammer Venturini e Rosana Magali Vieira pelo carinho, atenção, força e companheirismo ao qual me acolheram durante essa caminhada. Vocês são exemplo de inteligência, simplicidade, bondade e caráter e que sempre procurarei tê-las próximas a mim.

Aos meus familiares (irmão, cunhada, sobrinhos, tios, tias, primos e primas), em especial, minha tia Denise Terezinha da Silva, minhas afilhadas Patricia da Silva Spinoza e Julia Pierri, meu carinho especial pelo apoio e pela compreensão do tempo de convívio muitas vezes sacrificado para realização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, Jair José dos Passos Junior e Anderson Moacir Pains, pela dedicação, colaboração, paciência, e apoio durante a realização desta tese.

Ao Professor Marcos Aurélio Marques Noronha, pela sua orientação, apoio, disponibilidade e colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho e por todas as palavras de incentivo.

Aos docentes, pela sua participação e colaboração, pois sem eles não seria possível a realização deste trabalho.

Aos demais amigos e amigas, que fizeram parte da minha vida, em especial, Luana Camerini, Tatiane Michele Popiolski e Luiz Antonio Schalata Pacheco, que me apoiaram durante momentos difíceis, quero contribuir com toda a minha gratidão.

Por fim, finalizo os agradecimentos lembrando que a realização desta tese não teria ocorrido sem o apoio e incentivo de todas essas pessoas mais que especiais que tenho em minha vida.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	1
INTRODUÇÃO .....	3
TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE MICROTÚNEIS .....	9
DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL.....	26
CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO .....	48
ESTUDO DE CASO .....	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	85
SOBRE OS AUTORES .....	89

**RESUMO:** Por centenas de milhares de anos a humanidade restringiu-se basicamente à ocupação bidimensional fazendo uso e explorando apenas a superfície. Entretanto, com o crescimento populacional, houve a necessidade de utilização da terceira dimensão tanto com a verticalização das edificações quanto com a exploração do espaço subterrâneo. Neste sentido a Engenharia de túneis oferece diferentes técnicas para escavações de microtúneis que atuam na execução de infraestruturas permitindo o desenvolvimento da sociedade moderna. Entretanto, em países em desenvolvimento, a infraestrutura é ainda relativamente precária. O método comumente usado para execução de microtúneis em solo e trechos curtos baseia-se em escavações manuais. No entanto, caso não seja executado adequadamente, essas obras podem apresentar problemas de grave seriedade podendo ocasionar colapsos durante sua execução. Portanto, por um lado têm-se os problemas em obras mal executadas por métodos manuais e de outro lado elevados custos de aquisição de equipamentos mecanizados. Este cenário apresentado gera um ambiente propício para inovação. Esta inovação pode ser dada através de um grau de mecanização da técnica de escavação manual no qual se deseja proporcionar segurança e redução no tempo de execução de uma forma simplificada sem gerar custos elevados com o intuito de apresentar à sociedade uma filosofia adequada à realidade do mercado nacional. Por meio de um método de desenvolvimento de produto chegou-se a uma nova técnica de escavação de microtúneis em solo. Esta se baseia no tracionamento de cabos para proporcionar o avanço de uma couraça metálica, eliminando a necessidade de um revestimento de alta robustez. Além disso, a técnica apresenta baixos níveis de recalque, custos e tempo de execução competitivos. Portanto, como resultado, obteve-se um grau de inovação no processo executivo de microtúneis através de um equipamento de escavação, com tecnologias simples e racionais no que diz respeito à forma, às forças de movimentação do sistema, à segurança e à qualidade global da obra.

**PALAVRAS CHAVES:** *Engenharia de Túneis, Infraestrutura Subterrânea, Escavação em solo, Métodos Não Destrutivos.*

**ABSTRACT:** For hundreds of thousands of years humanity was basically restricted to two-dimensional occupation making use of and exploiting only the surface. However, with the population growth, it was necessary to use the third dimension both with the verticalization of the buildings and with the exploration of the underground space. In this sense the Tunnel Engineering offers different techniques for excavations of microtunnelling that act in the execution of infrastructures allowing the development of modern society. However, in developing countries, infrastructure is still relatively precarious. The commonly used method for performing microtunnelling in soil and

short parts is based on manual excavations. However, if it is not executed properly, these works can present several problems being able to cause collapses during its execution. Therefore, on the one hand there are the problems in works poorly executed by manual methods and on the other hand high costs of acquisition of mechanized equipment. This scenario presents a favorable environment for innovation. This innovation can be given through a degree of mechanization of the technique of manual excavation in which it is desired to provide safety and reduction in execution time in a simplified way without generating high costs in order to present to society a philosophy appropriate to the reality of the market national. By means of a product development method, a new technique for microtunnelling in soil was achieved. This is based on traction cable to provide the advancement of a shield, eliminating the need for a high-strength lining. In addition, the technique presents low levels of settlements, costs and competitive execution time. Therefore, as a result, there is a degree of innovation in the microtunnel's executive process through excavation equipment, with simple and rational technologies with respect to the form, forces of movement of the system, safety and overall quality of the work.

**KEYWORDS:** Tunnel Engineering, Underground Infrastructure, Soil Excavation, Trenchless Methods.

## 1.1 Contextualização

Por centenas de milhares de anos a ocupação antrópica se restringiu basicamente ao espaço bidimensional da superfície terrestre. Porém, com o crescimento populacional houve a necessidade de exploração da terceira dimensão tanto para cima, com a verticalização das edificações, quanto para baixo, com uso de túneis para transporte e serviços utilitários. O uso do espaço subterrâneo tornou-se fundamental na execução de infraestruturas que permitem o desenvolvimento da sociedade moderna. Atualmente, uma grande variedade de estruturas subterrâneas é utilizada para melhorar a qualidade de vida das pessoas, tanto nas grandes cidades quanto fora delas. Independente da aplicação, a utilização do espaço subterrâneo geralmente tem o propósito de aliviar impactos negativos no ambiente sobre a superfície (STERLING, 2002; GODARD, 2002; TENDER, 2017).

Segundo Broere (2015), nos países em desenvolvimento, a infraestrutura é relativamente precária, enfrentando problemas como grandes congestionamentos de veículos, alto nível de ruído e poluição, inundações, atropelamentos, entre outros. O cenário tende a piorar devido ao crescimento da população urbana previsto para as próximas décadas. Isto acarretará em mudanças, forçando novas exigências sobre as funções que a cidade deverá fornecer para proporcionar a melhoria contínua no desenvolvimento urbano sustentável e eficiente (BROERE, 2015; ASOKA, 2013; STERLING, 2017).

Muitas são as aplicações do espaço subterrâneo: infraestruturas que são difíceis, impossíveis, ambientalmente indesejáveis ou menos rentáveis para serem instaladas na superfície; estacionamentos; passagem de pedestres, ciclistas, motocicletas, veículos, entre outros. Além disso, os túneis podem servir de abrigo contra condições nocivas ao ser humano, pois fornecem proteção mecânica, acústica e térmica (GODARD, 2002; BROERE, 2015).

Entretanto, os custos impõem uma barreira importante para o desenvolvimento do espaço subterrâneo urbano. Apesar de progressos importantes no conhecimento e nos métodos de construção, os custos de obras no subsolo ainda são considerados mais elevados em comparação com construções na superfície. Esta diferença fica ainda mais expressiva quando o método construtivo envolve equipamentos mecanizados, de alta tecnologia, que exigem profissionais altamente capacitados (GODARD, 2004).

A Engenharia de Túneis moderna dispõe de técnicas, equipamentos e recursos classificados como Métodos Não Destrutivos (MND) sem impactar negativamente a

superfície durante a construção (BROERE, 2015; LI et al., 2017). Em situações que a escavação não pode causar dano na superfície, seja por localizar-se em áreas de grande fluxo de uma cidade ou por não haver espaço suficiente na superfície, os MND apresentam-se como a única alternativa. Dentre tais métodos, os mais utilizados para construções de microtúneis em solo são a Escavação Horizontal Direcional (HDD - *Horizontal Directional Drilling*), a escavação mecanizada por *Pipe jacking* (PJ), e a escavação manual (EM). Enquanto que na escavação horizontal a obra pode ser iniciada diretamente da superfície sem necessidade de poço de ataque, o *pipe jacking* necessita de um poço de ataque inicial e final para entrada e saída do equipamento, e na escavação manual pode ou não haver tal estrutura.

Além do método construtivo, as técnicas supracitadas também diferenciam-se entre si pela utilização de seus revestimentos. Na técnica de PJ, o revestimento é empurrado enquanto que na HDD a tubulação é puxada. Ambas exigem altas resistências do material. Já na EM, o revestimento é composto por chapas metálicas montadas manualmente. Outra diferença é que tanto a escavação horizontal quanto a técnica de *pipe jacking* utilizam equipamentos especialmente projetados para as atividades de escavação, exigindo, dessa forma, um maior investimento financeiro e mão-de-obra especializada para a sua utilização.

Tal fato faz com que diversos empreendimentos de médio e pequeno porte em países em desenvolvimento optem pelo método de escavação manual. Como o método EM é fortemente dependente de conhecimentos empíricos e atividades de tratamento de solo para a garantia de segurança, diversos problemas de construção têm sido registrados em obras realizadas no país. Essa realidade tem ocorrido em algumas obras de microtúneis em Santa Catarina, onde se pode citar, por exemplo, colapsos durante a execução de obras nas cidades de Brusque, Itapema e Florianópolis, conforme mostra a Figura 1. Entretanto, tais obras, mesmo com valores na faixa de R\$ 1 a 3 milhões, com extensões menores que 100 m, têm recorrentemente apresentado sérios problemas de execução, colocando em risco vidas humanas, a infraestrutura existente e a própria situação das empresas executoras (NORONHA, 2012; NARESI, 2017).



Figura 1 – Problemas com escavação manual em Santa Catarina entre 2012 e 2014.

Fonte: Autora, 2015.

Com base na constatação das grandes demandas e dos problemas na utilização das técnicas atuais, observa-se que o desenvolvimento de uma solução de baixo custo que garanta o mínimo de segurança e introduza técnicas que incrementem a produtividade poderá impactar positivamente no dispêndio financeiro, na segurança e na qualidade técnica dessas obras.

Neste sentido, a presente tese apresenta o conceito de um equipamento para escavação de microtúneis especificamente voltada às obras de pequeno porte, visando atender a demanda do mercado nacional, promovendo uma tecnologia original, com alta segurança e custo competitivo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo da tese de doutorado é desenvolver um conceito de uma técnica de escavação de microtúneis que proporcione segurança e maior produtividade no processo de escavação, e baixo custo.

### 1.2.2 . Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para o desenvolvimento do projeto conceitual serão:

- Selecionar uma técnica para escavação de microtúneis em solo;
- Definir o ciclo operacional da técnica de escavação;

- Avaliar os níveis de recalques, custos e tempo de execução comparando a escavação manual e a semimecanizada.

### 1.3 Aspectos de inovação

Devido ao alto custo de aquisição dos equipamentos necessários para a execução das técnicas de *Pipe Jacking* (em torno de R\$ 2.200.000,00) e Escavação Horizontal Direcional (em torno de R\$ 800.000,00), principalmente para países em desenvolvimento, parte significativa dos empreendimentos de pequeno e médio porte ainda são executados por técnicas de escavação manual de maneira bastante rudimentar. Tal situação coloca em risco vidas humanas e estruturas vizinhas.

O desenvolvimento apresentado neste trabalho contrapõe-se diretamente às questões supracitadas. Como será exposto, procurou-se uma solução eficiente baseada em tecnologias simples, combinando conceitos existentes com o máximo teor de mecanização possível e inovações no sistema de avanço do novo equipamento. O equipamento resultante é especialmente vantajoso em condições de pequena cobertura, como em túneis escavados sob rodovias, proporcionando segurança, economia e qualidade técnica da obra.

O novo conceito introduz uma inovação na técnica de escavação manual, principalmente devido ao seu sistema de movimentação, baseado em tracionamento do escudo de escavação (couraça). Permite-se assim oferecer um salto tecnológico com uma alternativa promissora para o atual cenário que é reconhecidamente deficiente para atender as grandes demandas do país.

### 1.4 Metodologia do trabalho

A definição de uma metodologia de pesquisa que norteia a execução de uma pesquisa é de suma importância. Silva (2005) define a metodologia científica como o conjunto de ações propostas para encontrar a solução de um problema, que tem por base procedimentos racionais e sistemáticos. Para tanto, uma pesquisa deve ser classificada quanto a sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos.

Do ponto de vista da sua natureza, a pesquisa deve gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigida à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais.

Quanto à forma de abordagem, serão utilizados os dois métodos existentes para o desenvolvimento do estudo, no caso, o quantitativo e o qualitativo. No âmbito da pesquisa quantitativa, faz-se necessário manipular dados quantificáveis que servirão de análise para a avaliação dos custos e recalques entre a escavação manual e o equipamento proposto. Por outro lado, no âmbito da abordagem qualitativa, procurou-se atribuir a metodologia de desenvolvimento de produto, já bem definida e amplamente utilizada.

A metodologia utilizada na presente tese segue um fluxo de etapas em cronologia

sequencial, conforme a Figura 2 ilustra.

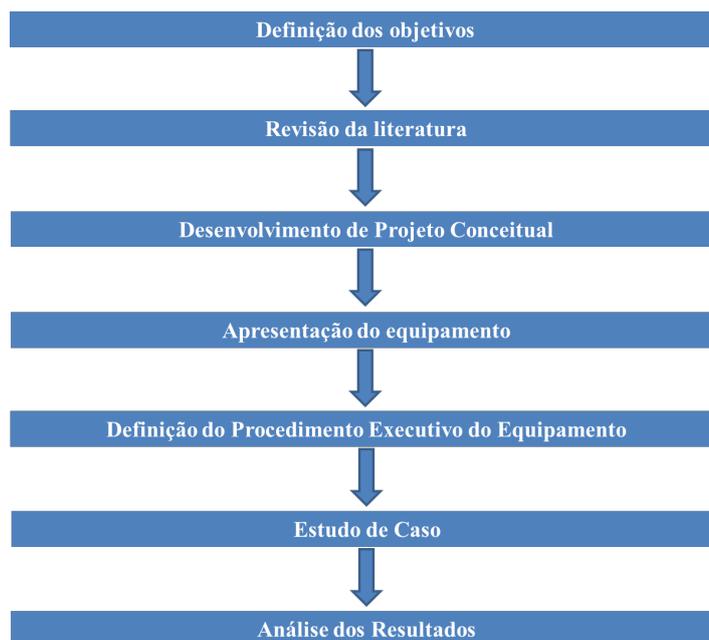


Figura 2 – Metodologia de pesquisa utilizada.

Fonte: Autora, 2015.

A definição dos objetivos tem como finalidade sintetizar o que se pretende alcançar com a pesquisa. A revisão da literatura refere-se à fundamentação teórica adotada para tratar o tema e o problema da pesquisa de forma tal que são levantados os trabalhos de pesquisa afins à tese nas principais fontes acadêmicas disponíveis (livros, artigos, teses e dissertações). O desenvolvimento do projeto conceitual seguirá a metodologia PRODIP até a fase conceitual (BACK et al, 2008). Por fim, por meio de um caso real de uma obra de macrodrenagem será comparado e avaliado os métodos de escavação manual e a semimecanizada.

### 1.5 Estrutura da tese

Este documento está dividido em seis capítulos, dentre os quais no capítulo 1 é apresentada a contextualização do problema proposto, assim como os objetivos que desejam ser alcançados.

No capítulo 2 estão resumidas algumas tecnologias atualmente utilizadas para a escavação de túneis como a perfuração horizontal direcional, *pipe jacking* e escavação manual. Ainda, no início do capítulo são apresentados alguns tratamentos, muitas vezes antecedendo às escavações com o intuito de reforçar o solo proporcionando maior segurança.

O capítulo 3 apresenta o método de desenvolvimento de projeto usado para idealizar o conceito do equipamento proposto e descreve todas as etapas de desenvolvimento do projeto informacional, definindo os usuários, e as suas necessidades e requisitos.

Após esta etapa é possível ponderar as variáveis envolvidas, definir os requisitos de projeto, suas especificações e a função global de projeto. A partir da função é possível subdividir em subfunções das quais são propostas algumas soluções chegando até a etapa final onde é selecionada a melhor concepção.

O capítulo 4 descreve uma visão detalhada do projeto conceitual do equipamento proposto, primeiramente ilustrando seus principais componentes e finalizando com a apresentação dos seus respectivos procedimentos executivos.

No capítulo 5, apresenta-se um estudo de caso de uma travessia subterrânea sob uma rovia, onde faz-se uma comparação entre a escavação manual e a escavação semimecanizada, verificando os níveis de requalque e tensões no revestimento. Além disso, faz-se também uma análise comparativa de custos e tempo de execução das duas metodologias construtivas consideradas.

Por fim, no capítulo 6, são feitas as considerações finais sobre a tese, apontando os resultados encontrados, efetuando uma análise crítica sobre os mesmos e elencando atividades futuras.

# TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE MICROTÚNEIS

O presente item apresenta as principais técnicas de escavação de microtúneis. Para fins de definição da nomenclatura do presente trabalho, consideram-se como microtúneis, os túneis cujo diâmetro ou dimensões características (altura /largura) são inferiores a 4,0 m (FARIA, 2013).

## 1.1 Introdução

Escavações subterrâneas podem ser consideradas como uma das atividades mais antigas exercidas pelo homem, como na construção de abrigos, passagens, jazigos, realizados desde 40.000 a.C. Contudo, um dos primeiros túneis propriamente ditos de que se tem registro remonta há cerca de 4.200 anos, com o túnel de ligação subterrânea entre o Palácio e o Templo de Belos, na Babilônia (STERLING, 2002). Durante o Império Romano, as atividades de construção de infraestrutura (estradas, aquedutos, pontes, túneis) tiveram grandes avanços, como a obra significativa do túnel para o emissário de Fucino, com 5,5 km de extensão (GOMES, 2017).

Com o advento da Revolução industrial, nos últimos dois séculos enormes avanços técnicos foram realizados com a introdução de explosivos, equipamentos motorizados e máquinas de perfuração com couraça metálica (*shield*). De fato, os túneis construídos atualmente contam com uma seleção de diferentes técnicas, sendo estas definidas pelas condições do maciço, pelo impacto que a técnica de escavação adotada exerce sobre o ambiente, além de questões econômicas e de segurança que precisam ser levadas em consideração (CHAPMAN, 2010).

Projetos de túneis e microtúneis vêm ganhando cada vez mais destaque devido ao espaço subterrâneo dos centros urbanos que atualmente encontra-se em um alto grau de saturação. Isto requer um maior número de instalações de utilitários e uma forma de solucionar este problema é com o uso do espaço subterrâneo (GOEL, 2012; LEGRAND, 2004).

Em geral, o processo de escavação é empregado por meio de ferramentas que tem por finalidade o desmonte do maciço facilitando a remoção do material. Em termos da interferência na superfície, este processo pode ser dividido em dois tipos: escavação por método destrutivo ou por método não destrutivo (CHENG, 2015).

Por um lado, o método destrutivo, ou escavação a céu aberto, implica na abertura desde a superfície do terreno, causando interrupção no trânsito de veículos e transtornos para trabalhadores e pedestres. Assim, esse método é recomendado apenas onde não há interferência com edificações na superfície, com o sistema viário, ou na possibilidade de desvio de tráfego sem causar grandes transtornos. Trata-se de

uma das técnicas mais antigas, remontando às obras realizadas na antiguidade (mais de 2.000 anos atrás). Pode ser considerada a economicamente mais viável, dependendo da localização da obra, embora atualmente seja cada vez mais desvantajosa devido aos custos indiretos com o impacto no fluxo de transporte da superfície (HUNT, 2014).

Por outro lado, o método não destrutivo (MND), apesar de ter um custo direto mais elevado em relação ao processo por vala aberta, possui vantagens com menores custos indiretos principalmente no que diz respeito à interrupção mínima da superfície, uma menor duração da obra, menor inconveniência para pessoas, residências e empresas ao redor da obra (ABDOLLAHIPOUR, 2012).

Em suma, o uso de métodos não destrutivos na implantação, manutenção ou expansão de obras subterrâneas tem o favorecimento do processo de construção devido à redução dos impactos ambientais, redução de custos indiretos, precisão na execução da obra, redução de tempo, a não interrupção do trânsito no local de trabalho, além da melhor qualidade do túnel, segurança e redução de danos ao ambiente (FARIA, 2008).

A presente tese apresenta algumas das principais técnicas de escavação de microtúneis utilizadas atualmente: a escavação manual, o *pipe jacking*, e a perfuração horizontal direcional das quais serão detalhadas nas seções posteriores.

## 1.2 Escavação manual

O método da escavação manual de microtúneis consiste da ação de mão-de-obra com utilização de ferramentas simples realizando avanços progressivos com montagem simultânea de um revestimento metálico constituído por anéis de chapas de aço corrugado. Esses anéis são formados por um conjunto de segmentos que são montados e fixados com parafusos e porcas. Além disso, existem orifícios ao longo das chapas que possibilitam a inclusão de uma calda de injeção a fim de preencher vazios existentes entre as chapas corrugadas e o maciço escavado (PAIVA, 2011).

Este método é utilizado para execução de microtúneis com dimensões características variando entre 1,20 m a 5,00 m, na forma circular, elíptica, lenticular e arco, podendo ser implantado na maioria dos tipos de solo (STACO, 2015).

Dentre as principais aplicações deste método, podem ser citadas as galerias de drenagem de águas pluviais, redes de esgoto, passa-fauna, passagem de pedestres e de veículos, passagem de cabos de telefonia e energia, e passagem de tubulações de água e esgoto.

As chapas de aço corrugado, conforme mostrado na Figura 3, são de fácil manuseio e devem ser montadas de acordo com o avanço da escavação. Este avanço geralmente é na ordem de 46 cm ou 50 cm, sendo estas dimensões equivalentes às larguras das chapas metálicas. Além disso, a frente da escavação deve ser protegida para reduzir o risco de desmoronamentos, oferecendo maior segurança ao operador e à região adjacente da obra (STACO, 2015).

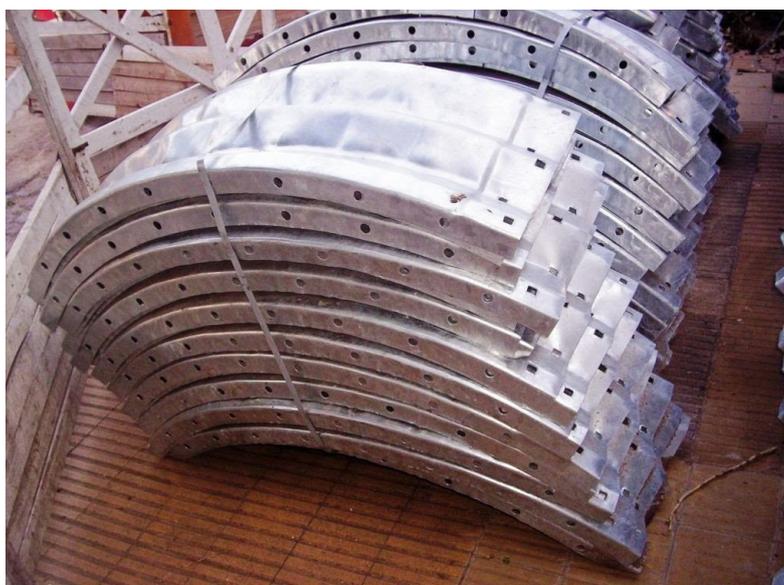


Figura 3: Chapas metálicas corrugadas

Fonte: Silveira, 2014.

Assim, como é usual em obras geotécnicas, antes do projeto e da execução a primeira etapa de trabalho consiste no levantamento e verificação das condições do solo e do nível do lençol freático através de sondagens em campo e ensaios em laboratório. Com base nestes dados, a etapa de projeto básico pode ser realizada, onde devem ser estabelecidas as características físicas do revestimento do microtúnel. No caso em questão, as espessuras das chapas são dimensionadas para resistir aos esforços causados pelas cargas do solo e externas. Este dimensionamento pode ser realizado tanto através de tabelas padronizadas fornecidas pelos fabricantes das chapas ou através de cálculos geotécnicos de solicitações devido ao empuxo do maciço com métodos analíticos ou numéricos. Por fim, a etapa do projeto executivo deve desenvolver todos os detalhes construtivos, com cronograma de execução, quantitativos e medidas de precaução (VIEIRA, 2003).

Com o conhecimento do solo a ser escavado e com o projeto executivo, pode-se iniciar a execução. Esta é dividida nas seguintes etapas: limpeza do canteiro de obra, abertura de poços de ataque, esgotamento dos poços, locação, escavação, remoção do material escavado, montagem das chapas, injeção de solo-cimento, acompanhamento topográfico, e controle de recalque (STACO, 2015).

O poço de ataque normalmente é revestido com chapas corrugadas formando um anel de pelo menos o dobro do diâmetro do microtúnel, conforme mostrado na Figura 4.



Figura 4 – Poço de ataque mostrando a relação do diâmetro do poço  $2f$  e do microtúnel que será escavado  $f$ .

Fonte: Silveira, 2014.

No fundo do poço, caso haja necessidade, deve-se escavar um reservatório onde ficará instalada uma bomba de sucção. Esse deve ficar em uma cota mais baixa que da geratriz inferior do túnel, facilitando a entrada da água infiltrada das paredes do poço no reservatório (STACO, 2015).

No que diz respeito à locação, o procedimento básico consiste da implantação de piquetes com o objetivo de alinhar o centro das chapas de fundo e do nivelamento das mesmas, respeitando a declividade e o traçado geométrico definido no projeto. A esconsidade, os comprimentos e as cotas poderão sofrer ajustes durante a execução enquanto que a declividade deverá ser contínua (SILVEIRA, 2014).

Já na etapa de implantação, que ocorre logo após a locação do eixo da obra, dá-se início a escavação da frente de ataque. Em túneis de diâmetro superior a 1,8 m, a escavação ocorre em duas etapas (calota-rebaixo), sendo escavada a parte superior em um primeiro estágio (calota), finalizando com a escavação do trecho inferior (rebaixo), conforme a Figura 5 ilustra. Esta escavação deve ser a mais justa possível à circunferência externa do revestimento e, ainda, o avanço deve ser ligeiramente maior que a espessura da chapa, geralmente de 46 cm (STACO, 2015).

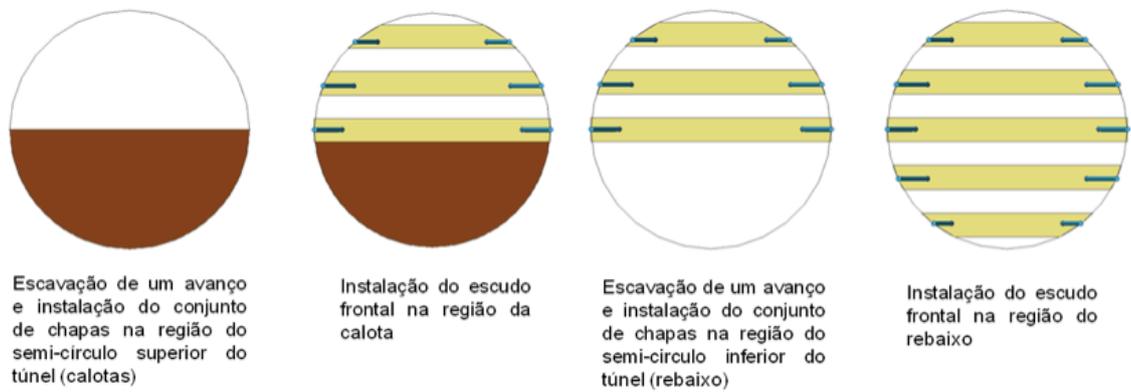


Figura 5 – Sequência de escavação “calota-rebaixo”.

Fonte: Autora, 2017.

Com o decorrer do avanço da escavação, executa-se a montagem das chapas da aba superior (Figura 6). As chapas ficam suportadas pelo uso de escoras inclinadas apoiadas no fundo do túnel. Após a montagem da parte superior, deve-se escorar a frente da escavação, geralmente usando pranchas de madeira, cobrindo 100% da superfície escavada, garantindo segurança aos operários. Dando prosseguimento, escava-se o rebaixo, correspondente ao semicírculo inferior. Para isso, as pranchas de madeira que constituem o escudo frontal são removidas uma de cada vez e um novo ciclo de operações permitirá a montagem dos anéis até que o túnel esteja finalizado (SILVEIRA, 2014).



Figura 6 – Montagem das chapas metálicas.

Fonte: Silveira, 2014.

As emendas das chapas corrugadas que formam o anel são fixadas por parafusos e porcas. Após a montagem de três anéis no sentido longitudinal, faz-se necessário o preenchimento nos espaços vazios que ficam entre o revestimento e o maciço

com material de boa resistência à compressão. Para tanto, uma calda de injeção é adicionada sob pressão controlada nos furos de abertura das chapas até certificar-se (procura de “som oco”) que não há mais vazios entre as mesmas e o maciço escavado. Este procedimento é de extrema importância para evitar possíveis recalques (ROCHA, 2014).

### 1.3 Pipe Jacking

O segundo método de escavação de microtúneis a ser discutido é o *Pipe jacking*, (tubulação empurrada) uma tecnologia de construção não destrutiva com o objetivo de instalar tubulações subterrâneas. Nos últimos anos, esta técnica tem se tornado cada vez mais popular, principalmente, no que diz respeito à instalação de infraestruturas municipais, como, redes de esgoto, drenagem, oleodutos e canalizações (CHENG, 2015).

Esta técnica proporciona a instalação de tubos através de um sistema hidráulico, de modo tal que formam uma linha contínua de tubos, além disso, possui como características: boa integridade do túnel, curto período de construção, baixo impacto ambiental e baixa manutenção (ZHEN, 2014).

A tubulação empurrada pode ser realizada tanto para instalação de pequenos diâmetros em trechos curtos e retos quanto para tubos de diâmetros maiores em trechos longos e com curvaturas (SHOU, 2010).

Além disso, esta técnica tem sido amplamente utilizada em diversas aplicações por várias décadas. Porém, observa-se que o uso do *pipe jacking* ainda envolve uma prática relativamente conservadora ou superdimensionada, principalmente devido ao comportamento mecânico da interação solo-tubulação apresentar um desafio aos projetistas. Estes costumam se preocupar mais com a força necessária dos cilindros hidráulicos, na flexão dos tubos e no impacto sobre seus arredores do que com o avanço da escavação (SUN, 2014).

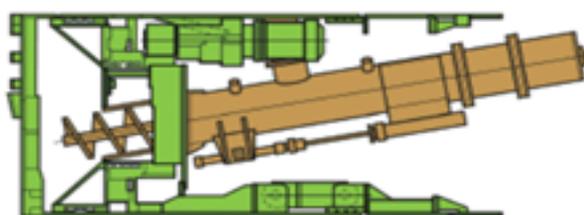
Um dos aspectos mais importantes na instalação de tubos usando a técnica de *pipe jacking*, é a força que os cilindros hidráulicos precisam exercer na tubulação. É importante dimensioná-la adequadamente evitando assim, que os tubos e as juntas sejam danificados, devido ao eventual grau elevado de concentração de tensões nestas regiões. O correto dimensionamento das forças dos cilindros também se faz necessário para permitir que o empreiteiro garanta que seu equipamento seja capaz de produzir e suportar o impulso necessário para completar a obra (YEN, 2015).

Os principais fatores que afetam a força nos cilindros são: a resistência na face da escavação; a quantidade de sobrecarga durante a escavação; a variação das condições do solo ao longo da escavação; desalinhamentos dos tubos; a rugosidade das superfícies dos tubos; a utilização de estações intermediárias de cilindros hidráulicos; as possíveis mudanças nas características do solo devido às cargas dinâmicas e vibrações causadas pelo próprio equipamento de escavação, como, por

exemplo, a densificação de solos arenosos (LI et al., 2017).

Durante o processo de *pipe jacking* deve haver controle da espessura da parede do tubo que será empurrado pelos cilindros, além da verificação de necessidade de estações intermediárias e lubrificação. O principal aspecto para o dimensionamento dos cilindros é quanto à resistência do solo. O método, *pipe jacking* é considerado complexo, pois a determinação precisa das forças envolvidas torna-se difícil devido aos diversos fatores envolvidos (BEAUCOUR, 2002).

No avanço da tubulação empurrada, a estabilização da frente da escavação e a remoção do material escavado pode se dar por equipamentos distintos, dentre eles os mais conhecidos são denominados por EPB (*Earth pressure balance* ou pressão de equilíbrio do solo) e pela SB (*slurry balance* ou equilíbrio da lama), ilustrados na Figura 7. Equipamentos onde o solo é transportado diretamente da frente de escavação, por meio de sistema de rosca sem fim instalado no *shield* são denominados EPB. Já o SB, o solo removido é misturado com o fluido que é bombeado para a cabeça de corte. A mistura torna-se uma pasta que é então transportada para a superfície. Este equipamento permite que os trabalhos sejam efetuados abaixo do nível d'água ou em terrenos colapsíveis, sem transtornos, custos adicionais e inconvenientes, como trincas em edificações circunvizinhas, prejuízos ao trânsito e à população, ou recalques (CHENG, 2015).



Equipamento - EPB



Equipamento - SB

Figura 7 – Diferenças entre EPB e SB.

Fonte: Terratec, 2017.

O processo de escavação com o método *pipe jacking* requer algumas etapas ilustradas na Figura 8: escavação de poços; colocação do equipamento no interior do poço; posicionamento da frente de corte; escavação e início do avanço dos cilindros; colocação dos tubos; instalação de estações intermediárias; retirada do equipamento no poço de saída, (CHENG, 2015).

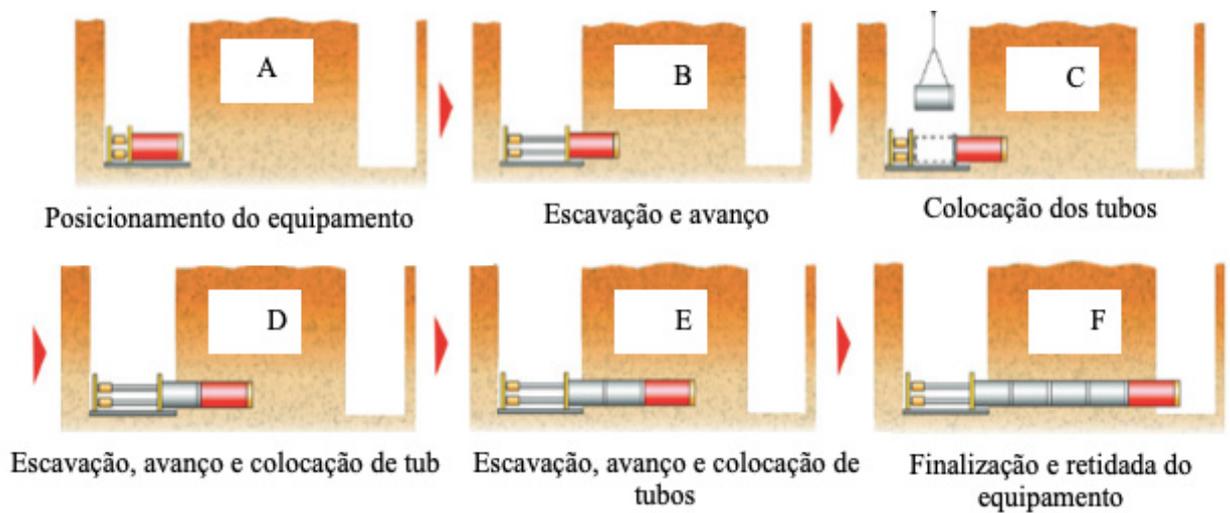


Figura 8 – Etapas de construção.

Fonte: Terratec, 2017.

Inicialmente devem-se preparar os poços de entrada e saída. Este é um passo importante para o sucesso da obra. Deve haver espaço suficiente para a instalação dos equipamentos envolvidos no poço de entrada. Além disso, a parede de reação do poço deve ser capaz de suportar o peso dos segmentos de tubulação. Após a preparação do poço, a colocação do equipamento no interior do mesmo pode ser realizada (Figura 8 A). Aqui é feita a preparação do sistema de propulsão, ou seja, dos cilindros que irão empurrar a máquina de escavação e o revestimento do microtúnel (CHENG, 2015).

Na etapa seguinte, o equipamento de escavação será posicionado no local especificado para o início da remoção do material e seu avanço (Figura 8 B). Já o terceiro passo inclui o avanço da frente de escavação e a instalação dos tubos (Figura 8 C) até a retirada do equipamento (Figura 8 F) quando o mesmo atingir o poço de saída (CHENG, 2015).

O comprimento máximo que a microtuneladora juntamente com os tubos poderá alcançar dependerá da capacidade da estação de propulsão, da resistência dos tubos e das características do solo. O esforço de propulsão é composto principalmente pela resistência gerada pelo atrito do maciço com a composição (tubo e tuneladora), e a resistência oferecida pela face da escavação. Esse fator é tão crucial que algumas vezes uma estação intermediária para impulsionar a tubulação faz-se necessária, conforme se observa na Figura 9 (SENDA, 2013).



Figura 9 - Estação intermediária de propulsão.

Fonte: Herrenknecht, 2015.

As estações intermediárias são usadas para aumentar o comprimento da escavação que é limitada pela capacidade de propulsão dos cilindros iniciais. Essas consistem em vários cilindros que são uniformemente distribuídos em torno de duas extremidades de tubos especiais que possuem um anel-guia de aço. Os cilindros auxiliares avançam fazendo uma força de reação contra a tubulação já montada. No final da obra, os cilindros e acessórios podem ser recuperados por um processo de desmontagem interna (BERGESON, 2014).

#### 1.4 Perfuração horizontal direcional - HDD

A perfuração horizontal direcional, tradução de “*horizontal directional drilling*” (HDD), é uma tecnologia de escavação subterrânea que permite instalações de dutos, com variabilidade tanto no diâmetro final, quanto na direção do caminho do furo que pode ser reto ou curvo (COWELL, 2003).

Devido à ampla flexibilidade e por ser um método não destrutivo, a técnica tornou-se uma das escolhas mais recomendadas para travessias na implantação de redes de água, esgoto, instalação de dutos para passagem de cabos de fibra ótica, entre outras aplicações (LAN, 2011). Porém, ressalta-se que a utilização da HDD ainda é baixa no Brasil, principalmente devido aos custos maiores que os da abertura de vala.

Na técnica HDD, a instalação dos dutos geralmente é executada em três fases distintas, sendo estas o furo piloto, o alargamento do furo e a instalação do tubo.

O furo piloto consiste na perfuração de um pequeno diâmetro que é iniciado na superfície com ângulo de entrada, geralmente de 8° a 20°, com a horizontal. O furo piloto prossegue inclinado até atingir a profundidade desejada onde, a partir de então, seguirá na posição horizontal. Depois de finalizada a trajetória horizontal, a perfuração segue inclinada até o local de saída pré-estabelecido, conforme pode ser visualizado na Figura 10 (COWELL, 2003).

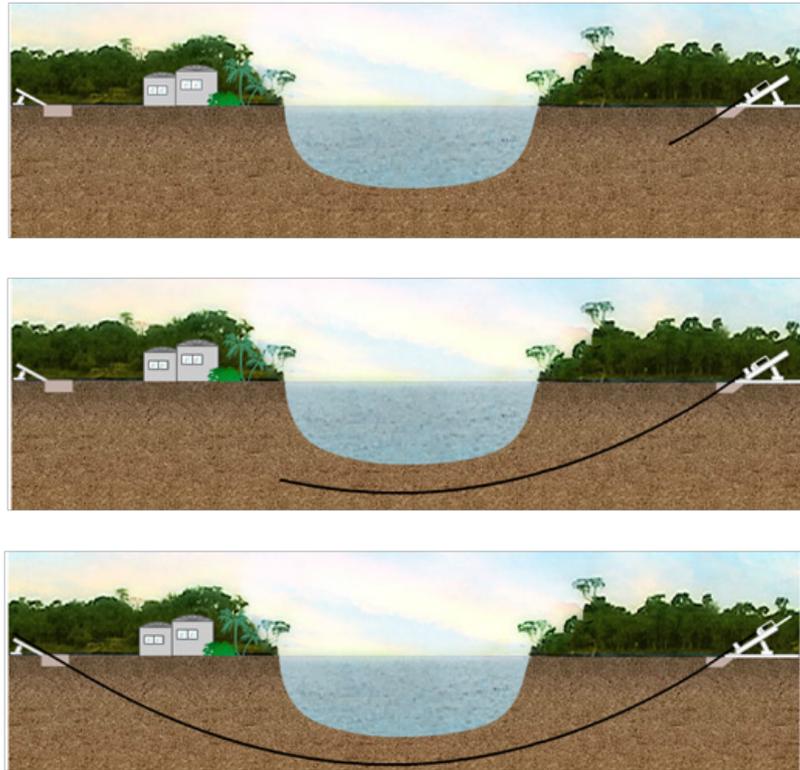


Figura 10 – Furo piloto.

Fonte: Brasfix, 2015.

O furo piloto é executado por meio de uma broca de perfuração, como se pode verificar na Figura 11. Esta broca possui um sistema com direcionamento monitorado por sensores eletromagnéticos. Os sinais destes sensores indicam a profundidade e a direção da broca permitindo assim, ao operador ajustar a direção do furo, obtendo o alinhamento necessário (ABDOLLAHIPOUR, 2012).



Figura 11 – Detalhe da broca de perfuração.

Fonte: Brasfix, 2015.

Após, completado o furo piloto, a broca de perfuração é removida e em seu lugar é instalado uma de maior diâmetro, conhecida como alargador, conforme visto um exemplo na Figura 12 (LAN, 2011).



Figura 12 – Exemplo de alargador.

Fonte: Almeida, 2012.

O diâmetro do alargador está relacionado com o diâmetro do tubo que será escolhido e está também relacionado com o tipo de equipamento de HDD, categorizado em três tipos - Mini-HDD, Médio-HDD e Maxi-HDD - de acordo com o diâmetro do tubo e a capacidade da máquina. As variações dos diâmetros de cada equipamento podem ser visualizadas na Tabela 1 (BAIK, 2003).

Característica	Unidade	Tipo		
		Maxi	Midi	Mini
Diâmetro	(mm)	600 a 1200	300 a 600	50 a 300
Profundidade	(m)	≤ 61	23	≤ 6
Extensão	(m)	≤ 1800	350	≤ 180
Torque	(kN.m)	< 110	1,5 a 9,5	< 1,5
Peso da máquina	(t)	30	18	≤ 9
Área em planta do equipamento	(m <sup>2</sup> )	> 2,50 x 13,70	2,20 x 6,10 a 2,50 x 13,70	1,00 x 3,00 a 2,20x 6,10
Área de trabalho recomendada	(m <sup>2</sup> )	45,70 x 76,20	30,50 x 45,70	6,10 x 18,30
Material do tubo		PEAD e aço	PEAD, aço e ferro dúctil	PEAD, aço e PVC fundido
Aplicações típicas		Passagens sob rios e autovias	Passagens sob rios e rodovias	Linhas de gás, cabos de energia e telecomunicações

Tabela 1 – Comparação das principais características de HDD.

Fonte: Dezotti, 2008.

A finalidade desta operação consiste em alargar o furo antes do processo de instalação do tubo (Figura 13). O diâmetro do furo é aumentado, tipicamente de 1,2 ou 1,5 vezes o diâmetro da tubulação que será instalada. Entretanto, este fator pode ser ajustado de acordo com as condições do solo e o comprimento total da execução (ROYAL, 2010).

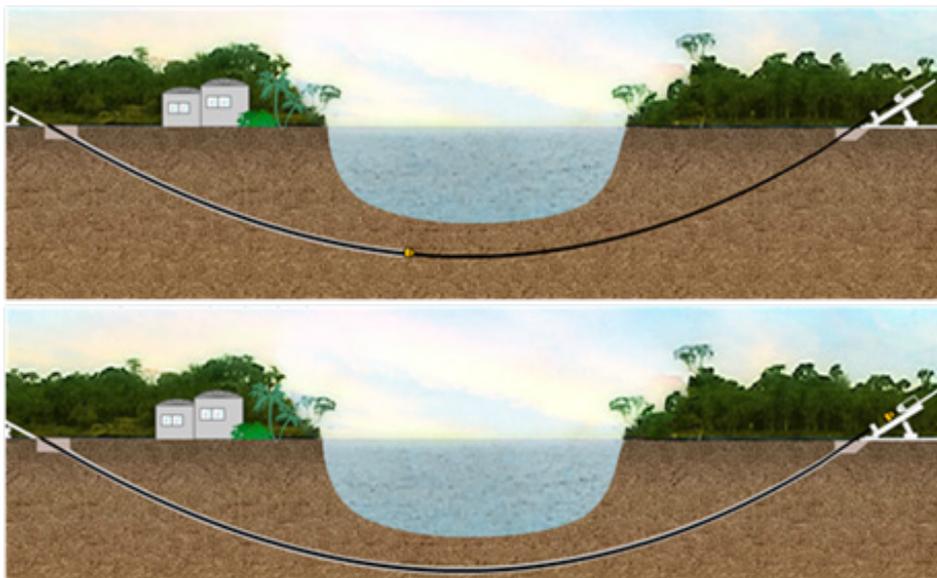


Figura 13 – Etapa de alargamento do furo.

Fonte: Brasfix, 2015.

O diâmetro aumentado proporciona uma redução dos atritos na fase seguinte, onde são puxados os tubos. Além disso, tem a finalidade de reduzir as tensões de flexão nas regiões de entrada e saída da tubulação. Podem acontecer vários passes de alargamento, à medida que o diâmetro da tubulação seja bem maior que o diâmetro inicial. Para tanto, ocorrem aumentos graduais das brocas de alargamento até que seja alcançado o diâmetro desejado. A última passagem de alargamento coincide com a instalação da tubulação, conforme mostrado na Figura 14 (ZAYED, 2013).

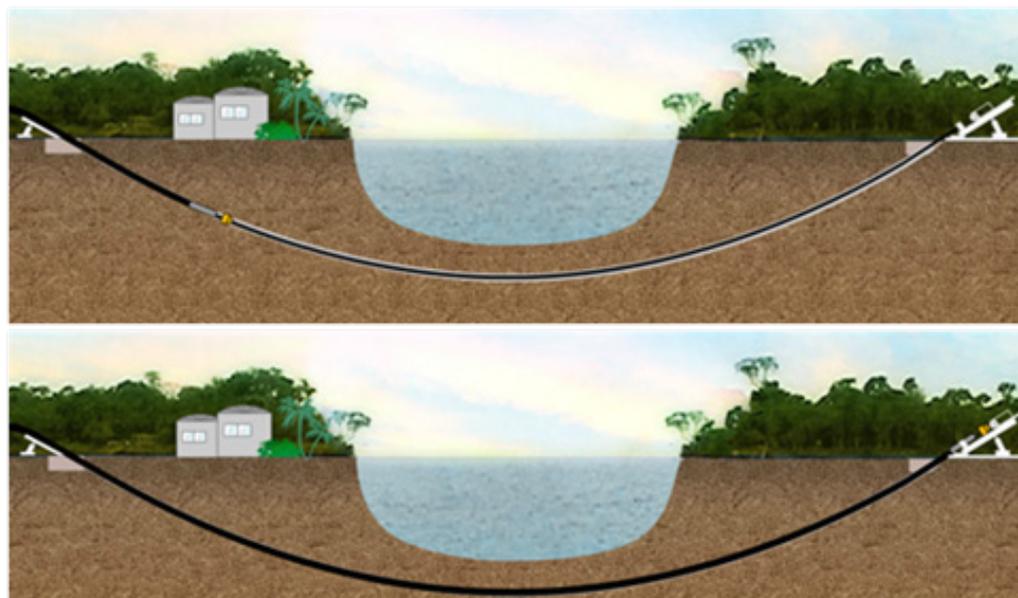


Figura 14 – Processo de instalação da tubulação.

Fonte: Brasfix, 2015.

Durante o processo de instalação da tubulação, a coluna a ser puxada é conectada à coluna de perfuração por meio de um dispositivo conhecido por “*swivel*” (articulação móvel), conforme pode ser visualizado na Figura 15. Esta peça é fixada entre a tubulação e o alargador com a finalidade de evitar a rotação da tubulação durante o processo de puxamento (ROYAL, 2010).

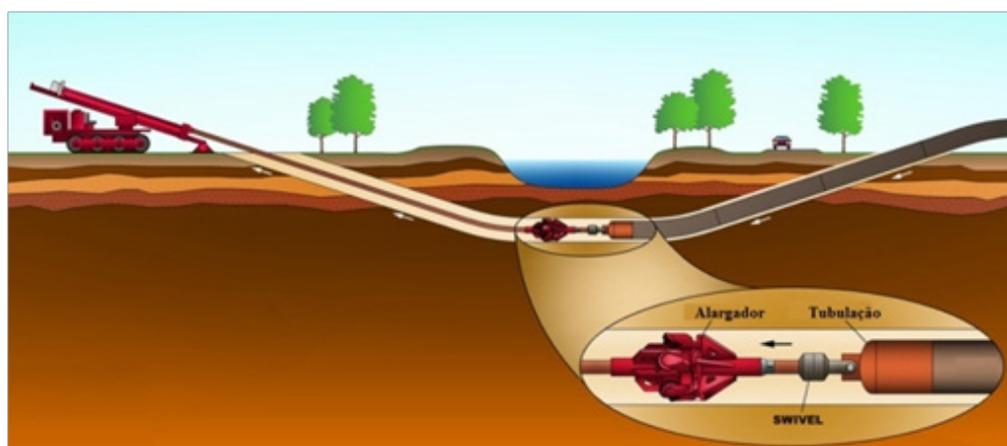


Figura 15 – Detalhe do dispositivo “swivel”.

Fonte: Mears, 2015.

Este dispositivo também serve para reduzir tensões de torção durante o processo de puxamento. Além disso, o “*swivel*” exerce outro papel importante de paralisar o puxamento caso o limite de força pré-calculado venha a ser ultrapassado.

Outro fator muito importante é que durante todos os processos deve ser utilizado um fluido de perfuração, sendo este uma composição de bentonita, misturada com água podendo ter aditivos poliméricos e outros agentes. O fluido de perfuração desempenha um papel fundamental, tendo como objetivo principal, manter o furo aberto, assim

como, estabilizá-lo evitando seu colapso. Além disso, o fluido serve para manter o material escavado em suspensão, o que reduz a força de atrito, e para lubrificar as hastes de perfuração como também a parede do furo, facilitando o deslocamento da coluna (COWELL, 2003).

A perfuração direcional horizontal é altamente recomendada para construções de novas redes de água, esgoto, efluentes industriais, gás, entre outros. Como o HDD é um método não destrutivo de construção, evitam-se os transtornos causados por interrupção de tráfegos pelas valas abertas (OLIVEIRA, 2011).

## 1.5 Resumo das tecnologias apresentadas

Esta seção teve por objetivo resumir os pontos principais das tecnologias não destrutivas descritas anteriormente. As características levadas em consideração foram: a variação da forma final do túnel, a cobertura mínima de escavação, o revestimento utilizado, o sistema de avanço e a montagem do revestimento. Todos os aspectos estão apresentados na Tabela 2.

	<b>Manual</b>	<b>Pipe Jacking</b>	<b>HDD</b>
<b>Seção transversal</b>	Circular Elíptico Lenticular Arco	Circular	Circular
<b>Dimensão</b>	De 1,2 até 5,0 metros	Até 3,0 metros	Até 1,2 metros
<b>Cobertura</b>	> 2 x □	> 4 m	< 6 m
<b>Avanço</b>	Manual	Mecanizado	Mecanizado
<b>Montagem do revestimento</b>	Manual	Compressão	Tração
<b>Revestimento</b>	Chapas de aço corrugada	Tubos de concreto pré-moldado	PEAD PVC AÇO

Tabela 2 – Resumo das tecnologias de escavação.

Fonte: Autora, 2017.

Quanto ao formato do túnel a seção transversal pode variar dependendo da aplicação final deste. O formato circular é usualmente o mais comum devido às tensões ao redor do túnel ser mais bem distribuídas. Entretanto, dependendo da aplicação, o formato final não circular é desejável podendo ser mais econômico tanto em tempo quanto em custo, quando se deseja uma superfície plana, como, por exemplo, uma travessia de pedestres, de ciclistas, passagens de veículos sob-rodovia, entre outros (SANTOS, 2017). As tecnologias, HDD e *Pipe Jacking*, produzem como resultado final apenas o formato circular devido ao processo construtivo. Já com a escavação manual é possível conseguir formatos diversos como, circular, retangular, elíptico, arco, lenticular ou outras formas. Portanto, ao se tratar de formato, a escavação manual tem vantagens dentre as demais dependendo do objetivo final da obra.

Em se tratando de cobertura, que é a profundidade no qual o microtúnel será

escavado, a tecnologia de HDD possibilita a execução em baixas profundidades quando comparado com as demais técnicas. Já a escavação manual possui uma gama variável de coberturas, segundo a Armco Staco (2015), apresentado na Tabela 3. Entretanto, usualmente adota-se pelo menos duas vezes o diâmetro do túnel.

Diâmetro (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	ALTURA DE ATERRO (m)											
			Mínima	Máxima										
				Rodovia						Ferrovia				
			Rodovia	Espessura (mm)					Espessura (mm)					
Ferrovia	2.2	2.7	3.4	3.9	4.7	6.5	2.7	3.4	3.9	4.7	6.5			
1.20	1.13	3.77	1.20	9.00	12.90	15.50	22.10	26.50	41.30	12.90	15.50	22.10	26.50	41.00
1.40	1.54	4.40	1.20	7.70	11.00	13.40	18.90	22.70	35.40	11.00	13.40	18.90	22.70	35.40
1.60	2.01	5.03	1.20	6.70	9.60	11.60	16.60	19.90	30.00	9.60	11.60	16.60	19.90	30.00
1.80	2.54	5.65	1.50	6.00	8.60	10.30	14.70	17.70	27.50	8.00	10.30	14.70	17.70	27.50
2.00	3.14	6.28	1.50	5.40	7.70	9.30	13.20	15.90	24.80	6.90	9.00	13.20	15.90	24.80
2.20	3.80	6.91	1.80	4.90	7.00	8.40	12.00	14.50	22.50		7.90	12.00	14.50	22.50
2.40	4.52	7.54	1.90	4.50	6.40	7.70	11.00	13.20	20.60		7.00	11.00	13.20	20.60
2.60	5.31	8.17	2.10	4.10	5.90	7.10	10.20	12.20	19.00		6.40	10.20	12.20	19.00
2.80	6.16	8.80	2.20	3.80	5.50	6.60	9.40	11.30	17.70		5.50	9.20	11.30	17.70
3.00	7.07	9.42	2.30	3.60	5.10	6.20	8.80	10.60	16.50		4.70	8.30	10.60	16.50
3.20	8.04	10.05	2.40		4.80	5.80	8.30	9.90	15.40		4.00	7.80	9.90	15.40
3.40	9.08	10.68	2.50		4.50	5.40	7.80	9.30	14.60			7.00	9.10	14.60
3.60	10.18	11.31	2.60		4.30	5.10	7.30	8.80	13.70			6.60	8.30	13.70
3.80	11.34	11.94	2.70		4.00	4.90	6.90	8.30	13.00			6.20	7.80	13.00
4.00	12.57	12.57	2.80		3.10	4.60	6.60	7.90	12.40			5.10	7.20	12.40
4.20	13.85	13.19	2.90			4.40	6.30	7.50	11.80			4.80	6.80	11.80
4.40	15.21	13.82	3.00			4.20	6.00	7.20	11.20			4.20	6.40	11.20
4.60	16.62	14.45	3.10			4.00	5.70	6.90	10.70			4.00	6.10	10.70
4.80	18.10	15.08	3.20				5.50	6.60	10.30				5.10	10.30
5.00	19.63	15.71	3.30				5.30	6.30	9.90				4.80	9.90

Tabela 3 – Relação de coberturas para revestimento circular de acordo com a espessura da chapa.

Fonte: Staco, 2015.

De acordo com informações vindas diretamente do fabricante de chapas de aço corrugadas, para que se possa utilizar um revestimento de diâmetro de 1,20 m tendo uma cobertura mínima também de 1,20 m o solo deve possuir condições ideais, ou seja, deve-se encontrar um só tipo de material na escavação, não conter nível de água ou fissuras com infiltração, e não sofrer alterações quando exposto ao ar.

Quanto ao sistema de avanço, as técnicas de HDD e *pipe jacking* ocorrem por força mecanizada enquanto que a escavação manual são usadas ferramentas manuais com pá e picareta, por exemplo. As duas primeiras são vantajosas quanto ao tempo e segurança, mas exigem revestimentos robustos. No HDD, o revestimento é composto por tubos de PEAD (polietileno de alta densidade), PVC (policloreto de vinila), ou aço. Já o *pipe jacking* utiliza tubos de concreto como revestimento e estes não empurrados

pelos cilindros hidráulicos após a abertura do túnel. Por fim, na escavação manual, o revestimento é composto por chapas de aço corrugadas, leve, de simples montagem.

Em suma, pode-se concluir que todas as técnicas discutidas apresentam vantagens complementares em relação às necessidades e características de uma determinada obra. Nenhuma das técnicas é dominante em todas as características de formato e cobertura mínima.

Por outro lado, destacam-se como aspectos críticos as forças elevadas nas técnicas mecanizadas (HDD e *Pipe Jacking*) e a baixa eficiência, qualidade e segurança na escavação manual. Na técnica HDD, o revestimento deve ser robusto para suportar altas cargas de tração, visto que, o sistema de montagem do revestimento requer puxar toda a tubulação após a etapa de perfuração. Da mesma forma, o *pipe jacking*, também requer um revestimento robusto, mas agora no sentido oposto, pois a montagem é feita empurrando os segmentos de tubos de concreto.

Já na escavação manual a montagem é simplificada pela união dos anéis segmentados das chapas de aço corrugadas, não havendo necessidade de o material ser robusto, pois o sistema de avanço não provoca esforço no revestimento.

Ainda sobre a técnica *Pipe Jacking*, um dos fatores críticos é a força para empurrar a tubulação. Neste caso, quanto maior a pressão na frente de escavação, maiores serão os esforços necessários para a propulsão dos tubos, devido ao atrito. Durante a operação, o esforço de propulsão deve superar a força de atrito do tubo com o solo somada à resistência de penetração da frente de escavação. Portanto, dependendo da extensão do túnel a ser executado, o atrito gerado pode chegar a valores que podem inviabilizar o processo, ou podem exigir estações intermediárias, o que irá onerar o custo final da obra.

Vale-se ressaltar que para contrapor os aspectos críticos discutidos neste capítulo, na presente tese foi desenvolvido um conceito de um equipamento com um princípio inovador de movimentação para a escavação em solo. O objetivo é o de melhorar o processo de escavação em trechos curtos, podendo ser usado em baixas coberturas e dispensando tratamentos de solo. As dimensões da seção transversal podem ser adaptadas para as necessidades da obra, assim como o formato do túnel (retangular, circular, entre outros). Outro objetivo importante é a mecanização do avanço de escavação que ocorrerá por tracionamento de cabos, ocasionando os esforços no equipamento e não no revestimento. Isto proporcionará a utilização de revestimentos mais leves, como as chapas de aço corrugadas.

No que diz respeito às forças de movimentação nas técnicas mecanizadas, observa-se a necessidade da aplicação de esforços elevados sobre o revestimento do túnel, já que o mesmo é introduzido (puxado ou empurrado) na abertura da escavação. Estes esforços são diretamente proporcionais à extensão do túnel, portanto crescentes durante a escavação. Além disto, faz-se necessária a construção de pontos de apoio externos, principalmente no caso do *pipe jacking*. A Figura 16 ilustra os esforços e apoios na escavação mecanizada.

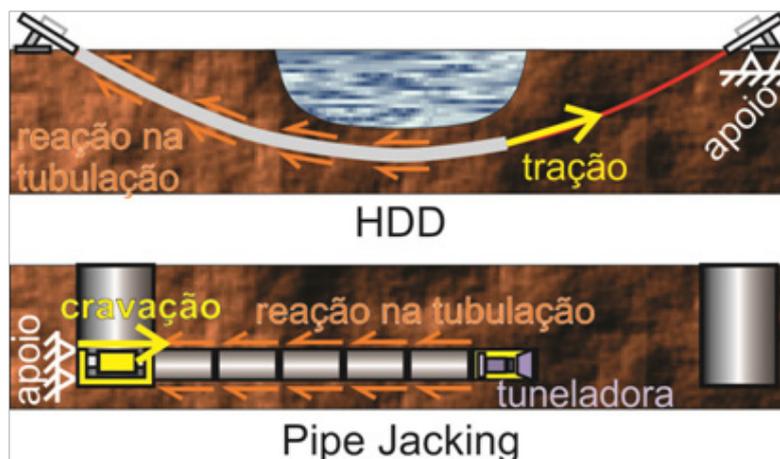


Figura 16 – Esforços e apoios na escavação mecanizada.

Fonte: Autora, 2016.

Tendo isso em vista, pretende-se aqui desenvolver uma tecnologia de escavação simples que não exija esforços no revestimento. Isto pode ser realizado atribuindo à escavação manual um sistema de movimentação simplificado que atue na segurança tanto da obra quanto dos envolvidos, reduza o tempo de execução e sem causar grandes alterações em custos.

Para isso utilizou-se de um método de desenvolvimento de projeto que proporcionou definir um conceito de um equipamento. Este detalhamento está apresentado no capítulo seguinte que trata de toda a evolução do desenvolvimento até a fase conceitual que culminou na concepção proposta.

# DESENVOLVIMENTO DO PROJETO CONCEITUAL

O desenvolvimento de um produto requer um conceito amplo no qual abrange todo o processo de transformação de informações necessárias para a identificação de uma demanda, a produção e o seu uso. Para isto, existem conjuntos de atividades nas quais objetiva-se chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, sendo para isto essencial conhecer as necessidades dos clientes.

A principal etapa no desenvolvimento de um projeto diz respeito às decisões tomadas no início do processo, principalmente no levantamento de informações onde são definidos os requisitos de usuários e suas necessidades.

Definições incorretas de requisitos e/ou determinações inadequadas de funções de projeto podem levar a erros graves tornando o desenvolvimento ineficiente. Logo, o processo de desenvolvimento deve minimizar decisões empíricas ou por tentativa e erro (BACK et al., 2008).

Existem diversos métodos propostos para atender diferentes setores industriais. O método que será utilizado na presente tese está baseado no chamado Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP). Este método foi desenvolvido pelo Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NEDIP), pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O modelo é dividido em nove etapas pertencentes a três macrofases: planejamento, projeção e implementação, conforme está apresentado na Figura 17.



Figura 17 – Etapas de desenvolvimento do projeto PRODIP.

Fonte: Adaptado de Back et al., (2008)

Segundo Back et al. (2008), a primeira etapa, de planejamento, considera as ações para a elaboração do plano de projeto, visando orientar o desenvolvimento do produto e suas demais fases. Já, na etapa de projeção tem-se todo o desenvolvimento propriamente dito para criar o produto, ou seja, a transformação das informações de necessidades em informações técnicas detalhadas da solução proposta. Esta macrofase é composta pelas etapas de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado (BACK et al., 2008).

O projeto informacional, destacado na Figura 18, é a fase da projeção onde são desenvolvidas as especificações de projeto definidas através dos requisitos de projeto, sendo este último originado do desdobramento dos requisitos e necessidades de usuários (FONSECA, 2000).

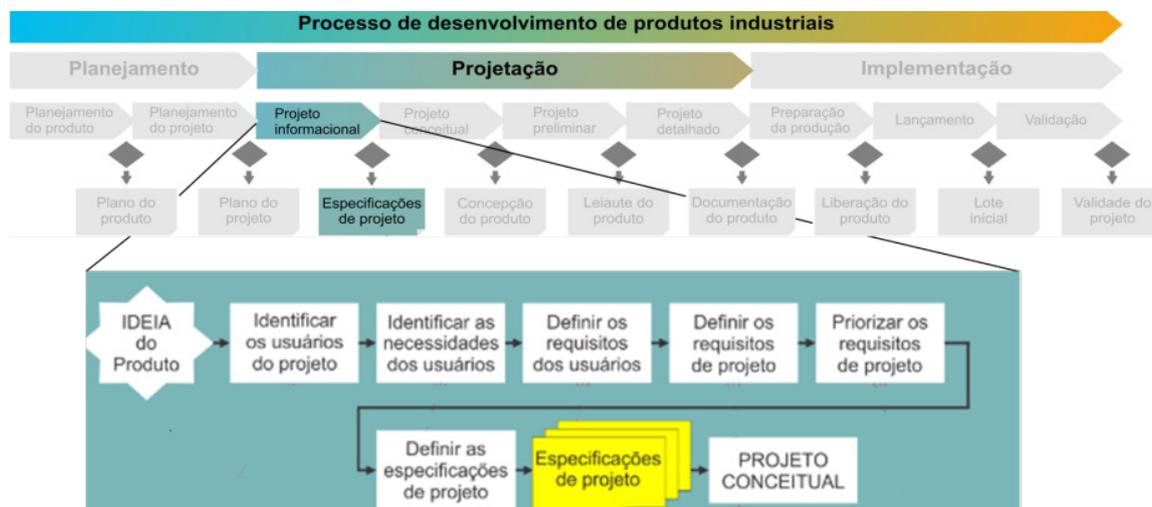


Figura 18 – Etapas do Projeto Informacional.

Fonte: Adaptado de Back et al., 2008

Já o projeto conceitual, conforme esquema apresentado na Figura 19, tem por objetivo desenvolver as concepções alternativas para a função de projeto. As concepções geradas são avaliadas com base em critérios técnicos e econômicos e a solução que foi devidamente selecionada seguirá para as etapas que compõem o projeto preliminar (FONSECA, 2000).

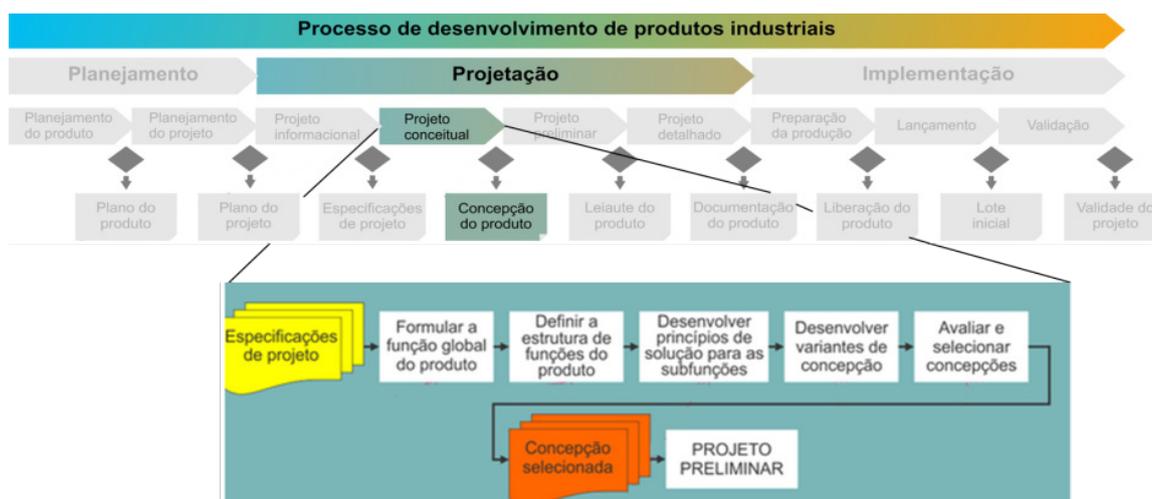


Figura 19 – Etapas do Projeto Conceitual.

Fonte: Adaptado de Back et al., 2008

A tese apresenta o desenvolvimento, dentro da macrofase projeção, das etapas de projeto informacional e conceitual e, portanto, as etapas de projeto preliminar e detalhado bem como a macrofase de implementação não farão parte do escopo. Além disso, a macrofase referente ao planejamento não será abordado, pois já havia, desde

o início, uma proposta bem definida.

O resultado final deverá apresentar um conceito de um equipamento de escavação em solo que atenda aos critérios de segurança, baixo custo, e baixo tempo de execução.

Para ilustrar melhor todas as atividades que foram executadas seguindo a método PRODIP, na Tabela 4 estão resumidos os objetivos de cada atividade, as ferramentas utilizadas tanto durante as etapas do projeto informacional quanto do conceitual, assim como, o resultado de cada uma delas.

O projeto informacional inicia-se com a definição do ciclo do produto. Apartir de então é possível definir os *stakeholders* envolvidos e com isso definir as necessidades de usuários. Estas etapas envolvem a atividade de *brainstorming*<sup>1</sup> e pesquisa em literatura técnica no qual a equipe foi composta por dois engenheiros mecânicos, dois engenheiros civil e um engenheiro de materiais.

Após definidas as necessidades de usuários estas são traduzidas em requisitos de usuários. Isto é realizado através da classificação apresentada por Fonseca (2000). Após isto, os requisitos de usuários serão então transformados em requisitos de projeto. Os requisitos de projeto serão avaliados e a partir de então são definidas as especificações de projeto.

---

1. É uma dinâmica de grupo usada como uma técnica para resolver problemas específicos, para desenvolver novas ideias ou projetos, para juntar informação e para estimular o pensamento criativo.

Macrofase	Objetivo	Método	Resultados
Projeto Informacional	Definir ciclo de vida do produto	Brainstorming Pesquisa em literatura técnica	Ciclo de vida
	Definir principais interessados	Brainstorming Pesquisa em literatura técnica	Definição dos stakeholders
	Definir Necessidade dos usuários	Brainstorming Pesquisa em literatura técnica	Necessidade de usuários
	Definir Requisitos de usuários	Classificação apresentada em (FONSECA, 2000)	Requisitos de usuários, Ponderação e Classificação
	Definir requisitos de projeto	Brainstorming Pesquisa em literatura técnica	Requisitos de projeto
	Avaliação dos requisitos de projeto	Casa da qualidade	Ponderação dos requisitos de projeto
	Definição das especificações de projeto	Reunião de projeto	Especificações de projeto
Projeto Conceitual	Definição da função global do produto	Reunião de projeto	Identificação da função global de projeto com suas entradas e saídas
	Definir a estrutura de subfunções do produto	Reunião de projeto	Estabelecimento das subfunções e suas correlações de entradas e saídas
	Gerar princípios de soluções do produto	Método de criatividade (brainstorming, pesquisa de patentes, etc...)	Soluções para todas as subfunções
	Gerar possíveis concepções do produto	Combinações das soluções através da matriz morfológica	Definição das possíveis soluções
	Selecionar concepções do produto	Exame "passa ou não passa" e função mérito	Classificação das concepções e definição da mais adequada

Tabela 4- Ferramentas utilizadas no desenvolvimento do projeto.

Fonte: Autora, 2018.

Com todas as etapas do projeto informacional concluídas a próxima fase diz respeito ao projeto conceitual que inicia com a definição da função global do produto e a partir dela é possível identificar funções de menor complexidade e com isso estabelecer a estrutura de subfunções.

Com a estrutura de subfunções definida inicia-se a geração de soluções para cada uma delas e combinamo-as entre si são geradas possíveis concepções e por fim, é selecionada a concepção mais adequada.

## 1.1 Etapas de desenvolvimento

### 1.1.1 Projeto informacional

O projeto informacional está composto pelas etapas de: ciclo de vida do produto; identificação das necessidades dos usuários; definição dos requisitos dos usuários;

avaliação dos requisitos; e definição das especificações do projeto. Durante o progresso de cada uma das etapas, foram realizadas pesquisas em literatura, *brainstorming*, e reuniões com especialistas na área, entre outros.

A equipe de projeto é composta por um Doutor em Engenharia Civil, um Engenheiro Civil, uma Engenheira de Materiais e um Engenheiro Mecânico. Todos os participantes possuem mais de três anos de experiência em pesquisa e acompanhamento de obras na área de túneis.

O primeiro passo foi a identificação do ciclo de vida do produto. Todo o processo inicia com a encomenda do equipamento e obtenções de informações sobre o serviço que será executado. Tendo isto em vista, inicia-se o projeto com posterior fabricação e teste. Durante o teste o produto é avaliado e caso não execute corretamente alguma das funções o projeto deverá ser revisado. Por outro lado, caso o equipamento esteja de acordo com as funções especificadas, o mesmo será desmontado e transportado até o local da obra. Agora com o produto alocado é realizado o teste operacional avaliando seu desempenho. Aqui novamente é feito o acompanhamento para analisar todo o processo e se houver alguma falha deve-se retornar à fase de projeto, caso contrário é finalizada a técnica operacional com seu descomissionamento e armazenamento.

É importante chamar a atenção de que na fase de projeto um plano de manutenção é criado para garantir a segurança de todo o processo proporcionando assistência se algo de errado vir a acontecer. Todo o ciclo está representado na Figura 20.

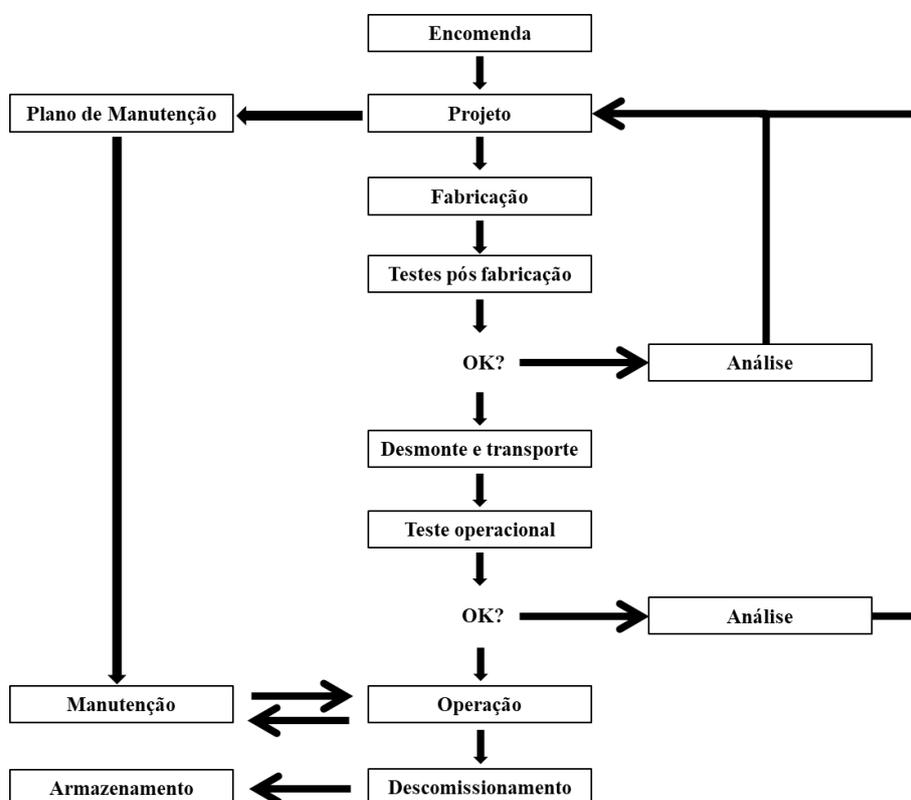


Figura 20 - Ciclo de vida do produto.

Fonte: Autora, 2018.

Após definido o ciclo de vida do produto, segundo Back et al. (2008), o passo seguinte é determinar as necessidades de usuário. Já, o termo usuário representa todas as pessoas e organizações que possuem interesse, direito de opinar, impor exigências ou expressar suas necessidades ao longo do ciclo de vida do produto. Dessa forma, para o caso em questão, os usuários identificados para o desenvolvimento do produto estão apresentados na Tabela 5.

#	Usuários
1	Contratante
2	Contratada
3	Sociedade
4	Fornecedores

Tabela 5 - Usuários.

Fonte: Autora, (2018).

A contratante refere-se ao conjunto de pessoas responsáveis pela contratação e pagamento da obra. Já a contratada envolve a quantidade de pessoas que farão parte da execução do serviço, ou seja, empresas e operadores. A sociedade engloba o grupo de pessoas que desfrutará direta ou indiretamente da obra quando finalizada. Por fim, os fornecedores são aqueles que disponibilizarão insumos durante toda a execução do túnel.

A etapa seguinte está relacionada com as necessidades dos usuários, que é considerado um passo crítico e principal, no qual a partir delas, o produto alcançará um grau adequado de qualidade e satisfação do cliente. Em geral, o que se espera é que o equipamento execute a obra de forma segura, com menor tempo e custo. Para o levantamento das necessidades dos usuários o método utilizado deu-se através de pesquisas em literaturas técnicas e sessões de *brainstorming*. Os resultados do presente levantamento estão apresentados na Tabela 6.

#	Necessidades de usuários
1	Baixo custo de aquisição
2	Baixo custo de operação
3	Baixo custo de manutenção
4	Segurança de operação
5	Segurança ambiental
6	Segurança para o usuário
7	Segurança no entorno da escavação
8	Menor tempo de execução
9	Reutilização de dispositivos
10	Dimensões e trajeto adequados com o projeto
11	Facil movimentação durante a escavação
12	Fácil transporte, montagem, operação e manutenção
13	Baixo consumo de insumos

Tabela 6- Necessidades de usuários.

Após definidas as necessidades, segundo Fonseca (2000), o passo seguinte diz respeito à transformação das necessidades em requisitos de usuário. Essa transformação nada mais é do que usar uma linguagem mais compacta e apropriada para que seja adequadamente interpretada pela equipe de desenvolvimento. Esta linguagem possibilita que cada atributo seja classificado entre obrigatório ou desejável, ou seja, deve estar contido no projeto, caso venha a ser classificado como obrigatório, ou desejável, neste caso, podendo ou não estar presente. A Tabela 7 apresenta os requisitos e sua classificação. A classificação foi definida por meio de uma ponderação dos requisitos do usuário, conforme apresentado na Tabela 8.

#	Requisitos dos usuários	Classificação	Peso
1	Segurança	Obrigatório	31
2	Desempenho	Obrigatório	28
3	Custo	Obrigatório	27
4	Funcionalidade	Obrigatório	26
5	Geometria	Obrigatório	24
6	Usabilidade	Obrigatório	24
7	Mantenabilidade	Obrigatório	23
8	Montabilidade	Obrigatório	18
9	Transportabilidade	Obrigatório	17
10	Robustez	Desejável	16
11	Reciclabilidade	Desejável	16
12	Ergonomicidade	Desejável	15

Tabela 7 - Requisitos de usuário e sua classificação.

Fonte: Autora, (2018).

O atributo segurança foi traduzido para englobar as necessidades de segurança ambiental, do operador, do usuário, do microtúnel e no entorno da escavação. Já o desempenho foi atribuído para significar um menor tempo de execução da obra. O custo refere-se aos gastos com aquisição, operação, manutenção e consumo de insumos. Para as necessidades de fácil operação e movimentação durante a escavação, o atributo que melhor traduz é o de funcionalidade. A geometria está relacionada com as dimensões e trajetos adequados com o projeto do túnel. Já a usabilidade tem sua tradução em tempo de utilização do equipamento. O atributo manutenibilidade diz respeito à manutenção fácil, segura e rápida e a montabilidade está relacionada à facilidade na montagem, desmontagem e operação. Para a robustez, que é traduzida pela sensibilidade aos fatores do meio ambiente, interpreta-se que o equipamento deve ter dimensões adequadas e fácil movimentação durante a escavação. Por fim, a reciclabilidade e a ergonomia traduzem as necessidades de reutilização de dispositivos e otimização das condições de trabalho humano, respectivamente.

Além da classificação em obrigatório e desejável deve-se realizar uma ponderação

de cada requisito. Para isto, dá-se uma nota entre 1 e 3 para cada requisito de usuário comparando-se entre si. A ponderação é de grande importância para a correta utilização do método da “casa da qualidade” e pode ser apresentado através do método de comparação “par-a-par”. Para esta ponderação, uma seção de *brainstorming* foi realizada com três especialistas na área onde cada uma das respostas e a média das respostas está apresentada na Tabela 8.

	Segurança	Ergonomia	Transportabilidade	Funcionalidade	Mantenabilidade	Montabilidade	Usabilidade	Reciclabilidade	Custo	Geometria	Robustez	Desempenho	Peso
Segurança	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	31
Ergonomia	1	3	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	15
Transportabilidade	1	2	3	1	1	2	1	2	2	2	2	1	17
Funcionalidade	2	3	3	3	3	2	2	1	2	3	2	2	26
Mantenabilidade	1	3	3	1	3	2	3	1	2	3	1	1	23
Montabilidade	1	2	2	1	1	2	2	1	2	3	1	1	18
Usabilidade	1	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	24
Reciclabilidade	1	2	2	2	1	2	1	3	1	1	2	1	16
Custo	1	3	2	3	3	3	2	3	3	2	3	2	27
Geometria	1	3	2	2	2	2	2	3	2	3	3	2	24
Robustez	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	3	1	16
Desempenho	2	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	3	28

Tabela 8 - Ponderação dos requisitos de usuário.

Fonte: Autora, 2018.

Para compor o indicador de relevância no método par-a-par, cada entrevistado é questionado sobre a importância entre cada um dos requisitos, comparando-se as linhas às colunas da Tabela 8. Se o requisito da linha for mais importante que o da coluna, o valor designado é +3, caso ambos possuam a mesma importância, o valor será +2 e, por fim, caso o requisito seja menos importante o valor é +1. O somatório dos valores de uma mesma linha representa o peso relativo dos requisitos.

Após a definição dos requisitos dos usuários e de sua valoração, a equipe de desenvolvimento pode iniciar a tarefa de caracterizar os requisitos transformando-os em características de engenharia nos quais os dados podem ser manipulados (BACK et al., 2008).

Ainda segundo Back et al. (2008), as características de engenharia ou requisitos de projeto dizem respeito aos parâmetros, grandezas físicas, funções e restrições do produto. São elas que orientam a equipe de projeto na busca de soluções alternativas. Cada requisito de projeto possui uma unidade de medição. Caso a unidade seja qualitativa, nenhuma ou uma unidade percentual deve ser considerada. (BACK et al.,

2008).

A tradução dos requisitos de usuários em requisitos de projeto é tratado por vários autores, entretanto, poucos são os métodos diretamente aplicáveis para este fim. De fato, encontra-se mais literatura sobre “o quê fazer” do que “como fazer”. Dessa forma optou-se por reuniões para a definição dos requisitos de projeto e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 9.

#	Requisitos de projeto	Unidade	Classificação
1	Norma de segurança e meio ambiente	-	Obrigatório
2	Taxa de avanço	m/dia trabalhado	Obrigatório
3	Custo de aquisição	R\$/m <sup>2</sup> seção	Obrigatório
4	Custo por metro executado	R\$/m executado	Obrigatório
5	Desvio da execução do perfil	cm	Obrigatório
6	Desvio da trajetória	cm	Obrigatório
7	Taxa de utilização do equipamento	%	Obrigatório
8	Dimensões dos componentes	cm	Obrigatório
9	Reciclagem	%	Desejável
10	Controle automático das principais funções	-	Desejável
11	Peso dos componentes	kg	Desejável

Tabela 9 - Requisitos de projeto e respectivas unidades.

Fonte: Autora, 2018.

A tradução não é feita uma a uma, pois um requisito de usuário pode ser interpretado por mais de um requisito de projeto e vice e versa. Por exemplo, o requisito de projeto denominado normas de segurança e meio ambiente engloba os requisitos de segurança e ergonomia. A unidade para esta característica seria qualitativa, através da verificação de normas. Já a taxa de avanço foi traduzida para indicar o desempenho e o controle automático das principais funções, cujas unidades são de metros por dia trabalhado e sem unidades, respectivamente. O custo de aquisição implica no valor do equipamento, que depende de suas dimensões, e seus componentes, além da transportabilidade, montabilidade e manutenibilidade.

O custo por metro executado refere-se ao valor da escavação por metro, já o desvio da execução do perfil, e o desvio da trajetória implicam na funcionalidade e robustez, assim como a taxa de utilização do equipamento foi traduzido do requisito usabilidade. As dimensões e pesos dos componentes implicam diretamente na geometria enquanto que a reciclagem está relacionada com a reciclabilidade.

Segundo Back et al. (2008), após a definição dos requisitos de projeto, a próxima atividade é a classificação dos mesmos, ou seja, procura-se priorizar os requisitos de forma que são confrontados os requisitos de usuário e de projeto quanto às suas importâncias. Essa tarefa pode ser realizada com o auxílio da “casa da qualidade” do método QFD (*Quality Function Deployment*). Inicialmente proposto por Akao (1990), o QFD é fundamentado na preocupação de que os produtos devem ser projetados

para satisfazer os desejos, os gostos e as expectativas dos usuários. Ele é composto pelo desdobramento de quatro matrizes, sendo a primeira conhecida como “casa da qualidade”. Esse método permite à equipe de projeto a documentação das necessidades e requisitos além do processamento sistemático das informações a fim de garantir a ponderação dos requisitos de projeto (Tabela 10).

		<p>Correlação forte = 9                  Correlação média = 3                  Correlação fraca = 1                  Sem correlação = 0</p>												
		<b>Requisitos de projeto</b>												
<b>Requisitos de usuário</b>	M	Segurança	9	3	3	1	0	0	1	3	1	3	3	3
	M	Desempenho	3	9	9	9	3	3	9	9	1	0	3	3
	M	Custo	9	9	9	9	9	9	9	9	3	3	9	3
	M	Funcionalidade	3	9	3	9	9	9	9	9	1	1	3	3
	M	Geometria	3	1	9	9	9	9	0	9	1	0	9	1
	M	Usabilidade	3	9	3	3	0	3	9	0	0	1	1	0
	M	Mantenabilidade	3	9	3	9	3	3	9	1	1	3	1	1
	M	Montabilidade	3	1	3	3	0	1	1	9	9	9	0	9
	D	Transportabilidade	3	0	3	0	0	0	0	9	9	0	0	9
	D	Robustez	9	3	9	3	0	0	9	1	0	1	1	16
	D	Reciclabilidade	9	0	3	3	0	0	0	0	0	9	0	16
	D	Ergonomia	9	1	3	1	0	0	0	9	9	1	9	15
	<b>Peso absoluto</b>			1425	1350	1365	1420	846	936	1345	741	813	792	741
<b>Peso relativo</b>			60%	57%	57%	60%	35%	39%	56%	31%	34%	33%	31%	
<b>Ordem de atuação</b>			1	4	3	2	7	6	5	10	8	9	11	
														<b>Peso relativo</b>
														31
														28
														27
														26
														24
														24
														23
														18
														17
														16
														16
														15

Tabela 10 - Casa da qualidade.

Fonte: Autora, 2018.

Os requisitos de usuário aparecem listados na coluna à esquerda enquanto que os requisitos de projeto na linha superior. Na parte central encontram-se os valores

que resultam da correlação entre os requisitos de projeto e de usuários. Para as correlações fortes atribui-se o valor +9, já para correlações médias adota-se o valor +3. Por fim, para correlações fracas o valor estipulado é +1 e, onde foi julgado não haver correlações o valor considerado é zero.

Para exemplificar, foi julgado o relacionamento entre o requisito de projeto “Normas de meio ambiente e segurança” e o requisito de usuário “segurança” no qual adotou-se o valor +9 devido seu alto grau de relacionamento. Já para o requisito de projeto “Taxa de avanço” e o requisito de usuário “Ergonomia” foram julgados ter correlação muito fraca, atribuindo-se o valor +1. Por outro lado, quando julgado o requisito de projeto “reciclagem” com o de usuário “geometria” verificou-se não haver correlação, e, portanto, o valor atribuído foi zero.

A atribuição de relacionamentos depende de um consenso dos integrantes da equipe de desenvolvimento realizado por meio de debates sobre cada uma das atribuições analisadas individualmente.

Outro ponto importante é quanto aos símbolos “x”, “seta para cima” e “seta para baixo” que indicam respectivamente que aquele requisito deve ser atendido, deve ser maximizado e deve ser minimizado, respectivamente.

Por fim, a classificação dos requisitos leva em consideração os pesos dos requisitos dos usuários e os valores de relacionamento ponderados, ou seja, o resultado final é o somatório do produto entre o peso absoluto relativo dos requisitos de usuário com o valor da correlação (+9, +3, +1 ou zero) entre os requisitos de usuário e de produto, chamado de peso absoluto. Este define a ordem de prioridade nas quais os requisitos de projeto deverão ser atendidos.

Após a ordenação dos requisitos de projeto, estes deverão ser descritos de forma mais detalhada para que sejam compreendidos pelos diferentes usuários. Esta é a chamada conversão entre os requisitos e as especificações de projeto. Para cada característica devem ser previstas grandezas mensuráveis e os meios de verificação. As especificações de projeto, apresentadas na Tabela 11, decorrem do processo de transformação dos requisitos de usuários e são consideradas como sendo o resultado mais importante do desenvolvimento do produto (BACK et al., 2008).

#	Descrição das especificações	Modo de verificação	Critério	Classificação (Peso)
1	Normas de segurança e meio ambiente	Averiguação	NR04, 05, 06, 09, 11, 12, 15, 16, 17, 22, 33	Obrigatório (1425)
2	Custo por metro executado	Análise de custo	Inferior a R\$ 17.000,00/m executado	Obrigatório (1420)
3	Custo de aquisição	Preço de aquisição	Inferior a R\$ 10.000,00/m <sup>2</sup> seção transversal	Obrigatório (1365)
4	Taxa de avanço	Registro de operação	Superior a 5 m executados/dia	Obrigatório (1350)

5	Taxa da utilização do equipamento	Registro de operação	Superior a 80%	Obrigatório (1345)
6	Desvio da trajetória	Topografia	Inferior a 0,5 % em relação ao comprimento do túnel	Obrigatório (936)
7	Desvio da execução do perfil	Topografia	Inferior a 5 cm	Obrigatório (846)
8	Reciclagem	Averiguação	Superior a 50%	Desejável (813)
9	Controle automático das principais funções	Manual de operação	Superior a 50%	Desejável (792)
10	Dimensões dos componentes	Medição direta	Inferior a 4 m	Obrigatório (741)
11	Peso dos componentes	Balança	Inferior a 2 toneladas	Desejável (741)

Tabela 11 - Especificações de projeto.

Fonte: Autora, 2018.

As normas regulamentadoras selecionadas para detalhar a especificação de segurança e meio ambiente foram as NR04 - Serviços especializados em engenharia de segurança e em medicina do trabalho, NR05 - Comissão interna de prevenção de acidentes, NR06 - Equipamento de proteção individual - EPI, NR09 - Programa de prevenção de riscos ambientais, NR11 - Transporte, movimentação, armazenagem e manuseio de materiais, NR12 - Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos, NR15 - Atividades e operações insalubres, NR16 - Atividades e operações perigosas, NR17 - Ergonomia, NR22 - Segurança e saúde ocupacional na mineração e NR23 - Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados. O meio de verificação será através de averiguação dos cumprimentos das normas citadas (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2018).

O custo por metro executado levou em consideração o valor de mão de obra, aluguel de equipamentos auxiliares para a escavação, materiais para revestimento do túnel e preenchimento dos espaços vazios. Já o custo de aquisição está diretamente relacionado aos valores de fabricação, montagem, transporte, do equipamento e seus dispositivos.

As taxas de avanço e de utilização do equipamento são verificadas através de registros de operação, ou seja, haverá um controle da quantidade de material removido da seção escavada e um registro de tempo que levou cada atividade.

Quanto aos desvios de trajetória e da execução do perfil o modo de verificação se dá através de topografia que identificará os devidos erros. Já a reciclagem leva em conta a quantidade de componentes que no final do procedimento serão avaliados e julgados se poderão ser ou não reaproveitados.

O controle automático das principais funções será verificado por meio de manuais de operação dos dispositivos. Por fim, as dimensões e os pesos dos componentes são verificados através de medição direta e balança, respectivamente. Importante salientar

de que como se trata de microtúnel o equipamento deve ter dimensões inferiores a 4m.

Após obter as especificações do projeto a etapa seguinte diz respeito à geração de soluções alternativas que atendam às características definidas. Com isso, pode-se comparar e combinar soluções a fim de que se obtenha a melhor e mais inovadora para o produto, tendo-se com isso o início da fase de projeto conceitual.

### 1.1.2 Projeto conceitual

O objetivo principal desta etapa é estabelecer a concepção final de um equipamento de escavação de microtúnel em solo. Para atingir o propósito são realizadas diversas atividades que buscam, primeiramente, definir a estrutura funcional do produto na qual envolve a determinação da função global (Figura 21) a ser executada, bem como suas subfunções. A atividade, portanto, define o ciclo operacional do equipamento delimitando os insumos e materiais necessários para o início do processo, permitindo expressar o relacionamento entre entradas e saídas de fluxo de energia, matéria e informações dos sistemas envolvidos (BACK et al, 2008).

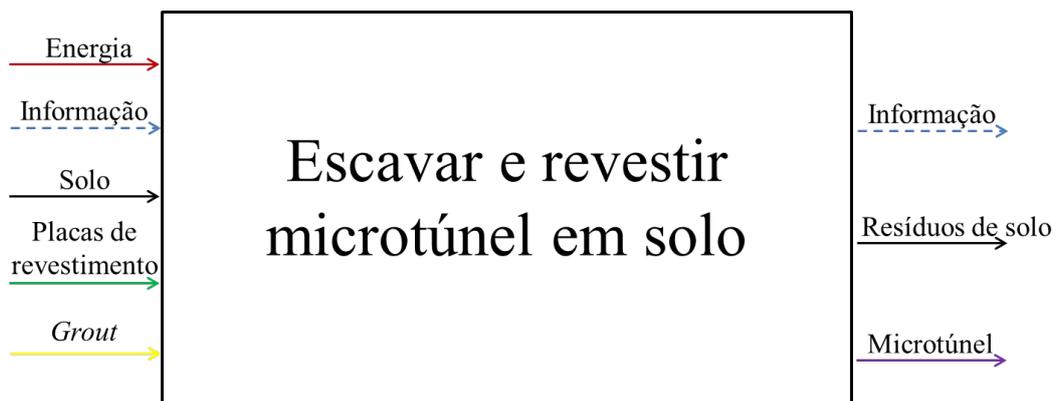


Figura 21 - Função global de projeto.

Fonte: Autora, 2018.

A função global foi definida como sendo “escavar e revestir microtúnel em solo”. Para isso é necessário o fornecimento de energia mecânica através de equipamentos, hidráulica para acionamento de cilindros, elétrica para prover todo o funcionamento do sistema, e informações que irão alimentar todas as etapas. Além disso, faz parte do processo o solo que será removido, as placas de revestimento que farão parte do suporte permanente do túnel e o *grout* (calda de injeção) cuja função é preencher os espaços vazios entre o solo escavado e as placas. Logo, ao finalizar todas as atividades o túnel estará completo.

Após o estabelecimento da função global esta poderá ser dividida em subfunções, conforme é apresentado na Figura 22. Esta estrutura tem por objetivo reduzir a complexidade do sistema e possibilitar a identificação de soluções mais adequadas para cada uma das funções.

A estrutura de funções desenvolvida engloba quatro etapas: a pré-operação,

operação, pós-operação e controle. Durante a pré-operação tem-se as atividades de mobilização composta pela implantação do canteiro e a sinalização, assim como a preparação no qual faz parte a adequação de emboques, e o poço de ataque (caso haja necessidade desses dois últimos), finalizando com o alinhamento do equipamento no terreno para que seja dado o início a etapa seguinte.

As funções de operação dizem respeito ao processo de escavação propriamente dito, ou seja, o equipamento deverá avançar, escavar, remover os resíduos e revestir o túnel. Este é um processo cíclico que ao final tem como resultado o microtúnel finalizado.

Por fim, tem-se a etapa de pós-operação no qual é realizado o descomissionamento do equipamento com sua desmontagem e reciclagem.

É importante lembrar que em todas as subfunções estabelecidas serão alimentadas por um sistema de controle que irá analisar todos os passos enviando informações para que o processo tenha ou não sua continuidade.

Finalizada a estrutura de subfunções pode-se buscar por soluções que sejam adequadas a cada uma delas.

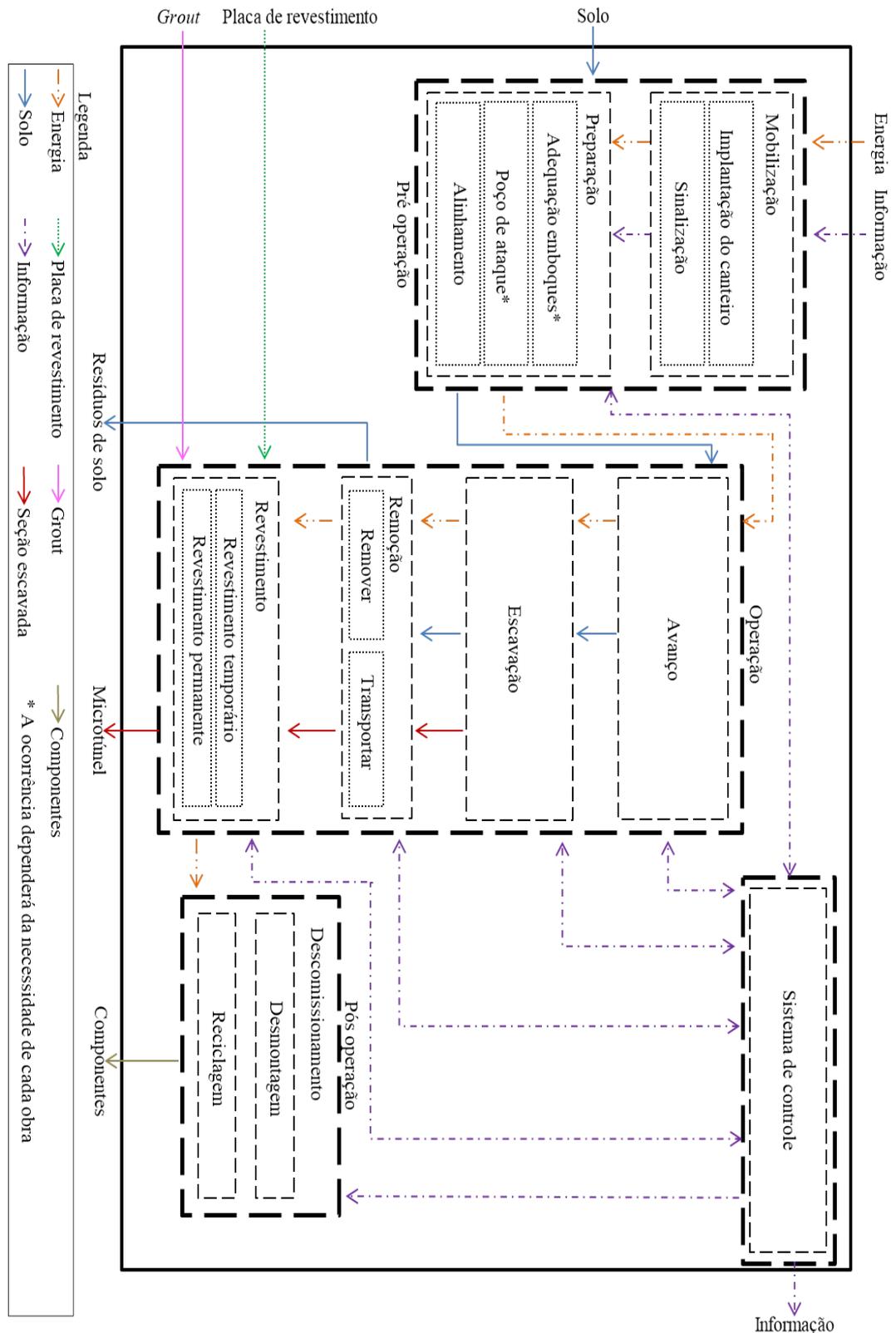


Figura 22- Estrutura de subfunções.

Fonte: Autora, 2018.

### 1.1.2.1 Geração de soluções para as subfunções

A etapa de geração de soluções tem por objetivo elencar alternativas adequadas que atendam cada subfunção. Métodos de criatividade, como brainstorming, benchmarking, pesquisas em material publicado, foram empregados para a obtenção dos conjuntos de soluções de forma rápida e com resultados inovadores. As soluções

para as subfunções referentes a fase de pré operação estão dispostas na Figura 23.

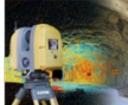
		Subfunção	Solução A	Solução B	Solução C	Solução D
Pré operação	Mobilização	Implantação do canteiro	Norma NR-18 			
		Sinalização	Norma NR-18 			
	Preparação	Adequação de emboque	Manual 	Manual Mecanizado 	Mecanizado 	
		Poço de ataque	Manual 	Manual Mecanizado 	Mecanizado 	
		Alinhamento	GPS 	Topografia 	Furos guia 	Topografia e furos guia 

Figura 23 – Alternativas para a fase de pré operação.

Fonte: Autora, 2018.

Quanto à mobilização, as subfunções, de implantação e de sinalização do canteiro de obras, devem respeitar a Norma Reguladora NR18, que trata das condições e meio ambiente de trabalho na indústria da construção. Já com relação à fase de preparação tem-se, para as subfunções de adequação do canteiro de obra, assim como de preparação do poço de ataque, caso haja necessidade, três soluções: escavação com ferramentas manuais, ou com ferramentas mecanizadas ou o misto de ferramentas manuais com mecanizadas. Já o alinhamento da couraça para o início da escavação pode ser executado com auxílio de GPS, topografia, furos guias ou um misto de furos guias com topografia.

Com relação à fase de operação propriamente dita o avanço poderá acontecer por meio de duas couraças sendo direcionada uma contra a outra ou, por meio de uma couraça e uma placa fixa na extremidade oposta ou ainda, por uma couraça e um bloco de reação.

As soluções para a subfunção de escavação levam em conta o uso de equipamentos mecânicos por meio de parafuso de Arquimedes, ou por pá escavadeira, ou ainda, por ferramentas manuais e, por fim, um misto entre escavação manual juntamente com pá escavadeira.

A remoção dos resíduos de solo poderá ser realizada por esteira ou por vagão e o transporte para o destino final do solo removido será por meio de caminhões basculante.

Em decorrência do avanço do equipamento juntamente com a remoção do solo

o espaço vazio deve ser revestido. A própria couraça servirá como um revestimento provisório durante a escavação e ainda no interior da mesma ocorrerá a montagem do revestimento permanente que dentre as alternativas elencadas tem-se a chapa de aço corrugado e o concreto pré-moldado. Todas as alternativas estão apresentadas na Figura 24.

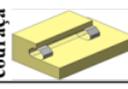
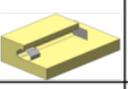
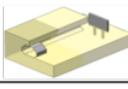
	<b>Subfunção</b>	<b>Solução A</b>	<b>Solução B</b>	<b>Solução C</b>	<b>Solução D</b>	
Operação	Avanço	Couraça e couraça 	Couraça e placa 	Couraça e bloco 		
	Escavação	Parafuso 	Manual 	Mecanizado 	Manual Mecanizado 	
	Remoção	Remover	Esteira 	Vagão 		
		Transportar	Caminhão basculante 			
	Revestimento	Revestimento provisório	Couraça metálica 			
		Revestimento permanente	Chapa de aço 	Concreto 		

Figura 24 – Alternativas para a fase de operação.

Fonte: Autora, 2018.

Para que haja a continuidade de todo o processo, as etapas devem ser alimentadas com informações ao longo do tempo e isto pode ser feito via GPS, topografia ou visualmente.

Por fim, o descomissionamento do equipamento ocorre com a desmontagem manual dos componentes e com a inspeção visual. É recomendado o descarte ou a reciclagem das peças. As alternativas para estas etapas podem ser visualizadas na Figura 25.

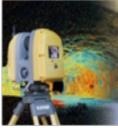
		<b>Subfunção</b>	<b>Solução A</b>	<b>Solução B</b>	<b>Solução C</b>
Pós operação	Descomissionamento	Sistema de controle	<b>Topografia</b> 	<b>GPS</b> 	<b>Visual</b> 
		Desmontagem	<b>Manual</b> 		
		Reciclagem	<b>Visual</b> 		

Figura 25 – Alternativas para a fase de pós operação.

Fonte: Autora, 2018.

### 1.1.2.2 Seleção da concepção

Segundo Back et al. (2008), a seleção de soluções ocorre durante todas as fases de desenvolvimento. Entretanto, é na fase final do projeto conceitual que essa atividade torna-se mais abrangente visando identificar a melhor concepção dentre as alternativas selecionadas (BACK et al., 2008).

A escolha da concepção final é um momento de tomada de decisão muito importante e é fundamental seguir uma metodologia de seleção para garantir que a melhor ou a mais adequada concepção seja adotada (BACK et al., 2008).

As soluções mapeadas foram organizadas em uma estrutura denominada matriz morfológica, mostrada na Tabela 12. Esta matriz consiste em um método sistemático que proporciona diferentes combinações com o objetivo de encontrar a solução para o problema (BACK et al., 2008).

Função	Subfunção	Solução A	Solução B	Solução C	Solução D
Mobilização	Implantação do canteiro	Normas (NR18)			
	Sinalização	Normas (NR18)			
Preparação	Adequação de emboques	Manual	Manual + mecanizado	Mecanizado	
	Poço de ataque*	Manual	Manual + mecanizado	Mecanizado	
	Alinhamento	GPS	Topografia	Furos guias	Furos guias + Topografia
Avanço		Cou-raça + cou-raça	Cou-raça + placa	Cou-raça + bloco de reação	
Escavação		Mecanizado com parafuso de Arquimedes	Manual	Mecanizado com Pá escavadeira	Manual + mecanizado com pá escavadeira
Remoção	Remover	Esteira	Vagão		
	Transportar	Caminhão basculante			
Revestimento	Revestimento temporário	Cou-raça com grade			
	Revestimento permanente	Placa corrugada	Concreto pré moldado		
Sistema de controle		Topografia	GPS	Visual	
Descomissionamento	Reciclagem	Inspeção visual			

Tabela 12 - Matriz morfológica.

Fonte: Autora, 2018.

O processo de seleção adotado é realizado em duas etapas: uma triagem qualitativa e uma quantitativa. Primeiramente as soluções passam por uma análise do tipo “passa” ou “não passa”, ou seja, é verificada se cada alternativa está de acordo com os requisitos de projeto considerados obrigatórios, conforme está apresentado na Tabela 13.

Soluções Especificações	Normas de segurança e meio ambiente	Custo por metro executado	Custo de aquisição	Taxa de avanço	Taxa de utilização do equipamento	Desvio da trajetória	Desvio da execução do perfil	Controle automático das principais funções	Dimensões dos componentes
Normas de implantação de canteiros de obra (NR18)	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Normas de sinalização de canteiros de obra (NR18)	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Adequação do emboque por escavação manual	P	P	P	NP	P	P	P	P	P
Adequação do emboque por escavação manual + mecanizada	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Adequação do emboque por escavação mecanizada	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Execução de poço de ataque por escavação manual	P	P	P	NP	P	P	P	P	P
Execução de poço de ataque por escavação manual + mecanizada	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Execução de poço de ataque por escavação mecanizada	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Alinhamento por GPS	P	P	NP	P	P	P	P	P	P
Alinhamento por topografia	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Alinhamento com auxílio de furos guia	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Alinhamento por topografia + furos guias	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Avanço com Couraça + couraça	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Avanço com couraça + placa	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Avanço com couraça + bloco de reação	P	P	NP	P	P	P	P	P	P
Escavação mecanizada com parafuso de Arquimedes	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Escavação manual da frente	P	P	P	NP	P	P	P	P	P
Escavação mecanizada com pá escavadeira	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Escavação manual + mecanizada com pá escavadeira	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Remoção por esteira	P	P	NP	P	P	P	P	P	P
Remoção por vagão	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Transporte por caminhão basculante	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Revestimento temporário por couraça com grade	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Revestimento permanente por placas corrugadas	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Revestimento permanente com concreto pré moldado	P	P	P	P	P	P	P	P	NP
Sistema de controle por topografia	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Sistema de controle por GPS	P	P	NP	P	P	P	P	P	P
Sistema de controle visual	P	P	P	P	P	NP	NP	P	P
Desmontagem manual	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Reciclagem através de inspeção visual	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Tabela 13 – Exame “passa” (P) ou “não passa” (NP).

Fonte: Autora, 2018.

O exame foi realizado pela equipe de projeto eliminando soluções, que apesar de serem viáveis isoladamente, quando analisadas em relação à aplicação aos demais sistemas não tiveram desempenho satisfatório.

Por exemplo, a adequação do emboque, a execução do poço de ataque e a escavação da frente realizada manualmente foram julgadas inadequadas com relação à taxa de avanço estimado. Adicionalmente, as soluções de alinhamento e controle por GPS, a construção de um bloco de reação e a remoção de resíduos por esteira foram avaliados impróprios com relação ao custo de aquisição. No caso do GPS trata-se de um caso localizado que pode ser barateado em futuro próximo e podendo ser considerado como solução se ocorrer nova análise. Já, o sistema de controle visual foi desclassificado por não se adequar aos requisitos de trajetória e da execução do perfil. Por fim, o revestimento permanente com concreto pré-moldado foi eliminado devido às

suas dimensões dificultando o processo de montagem no interior do túnel.

Na etapa seguinte, as soluções que passaram pelo primeiro processo de triagem serão combinadas e ordenadas quanto à sua adequabilidade tendo em vista os requisitos de projeto e seus pesos relativos. Para isso, a valoração é feita numericamente atribuindo notas de um a dez. Por fim, utiliza-se o coeficiente de ordenamento,  $I$ , que pode ser definido como o somatório do produto entre o peso relativo do requisito,  $P_i$  e o grau de satisfação da concepção,  $S_i$ , como mostra a Equação 1.

$$I = \sum_{i=1}^{i=10} (P_i \cdot S_i) \quad \text{Equação 1}$$

O número total de combinações geradas foram 72 que satisfazem a função de projeto. A Tabela 14 apresenta o valor “ $I$ ” calculado para todas as concepções.

#	I	#	I	#	I	#	I
C <sub>1</sub>	87.949	C <sub>19</sub>	89.374	C <sub>37</sub>	86.589	C <sub>55</sub>	88.014
C <sub>2</sub>	94.911	C <sub>20</sub>	96.336	C <sub>38</sub>	93.551	C <sub>56</sub>	94.976
C <sub>3</sub>	99.088	C <sub>21</sub>	100.513	C <sub>39</sub>	97.728	C <sub>57</sub>	99.153
C <sub>4</sub>	94.974	C <sub>22</sub>	95.034	C <sub>40</sub>	95.034	C <sub>58</sub>	95.039
C <sub>5</sub>	101.936	C <sub>23</sub>	101.996	C <sub>41</sub>	101.996	C <sub>59</sub>	102.001
C <sub>6</sub>	108.898	C <sub>24</sub>	107.538	C <sub>42</sub>	107.538	C <sub>60</sub>	107.543
C <sub>7</sub>	88.885	C <sub>25</sub>	90.310	C <sub>43</sub>	87.525	C <sub>61</sub>	88.950
C <sub>8</sub>	95.847	C <sub>26</sub>	97.272	C <sub>44</sub>	94.487	C <sub>62</sub>	95.912
C <sub>9</sub>	100.024	C <sub>27</sub>	101.449	C <sub>45</sub>	98.664	C <sub>63</sub>	100.089
C <sub>10</sub>	95.910	C <sub>28</sub>	95.970	C <sub>46</sub>	95.970	C <sub>64</sub>	95.975
C <sub>11</sub>	102.872	C <sub>29</sub>	102.932	C <sub>47</sub>	102.932	C <sub>65</sub>	102.937
C <sub>12</sub>	109.834	C <sub>30</sub>	108.474	C <sub>48</sub>	108.474	C <sub>66</sub>	108.479
C <sub>13</sub>	89.821	C <sub>31</sub>	91.246	C <sub>49</sub>	88.461	C <sub>67</sub>	89.886
C <sub>14</sub>	96.783	C <sub>32</sub>	98.208	C <sub>50</sub>	95.423	C <sub>68</sub>	96.848
C <sub>15</sub>	100.960	C <sub>33</sub>	102.385	C <sub>51</sub>	99.600	C <sub>69</sub>	101.025
C <sub>16</sub>	96.846	C <sub>34</sub>	96.906	C <sub>52</sub>	96.906	C <sub>70</sub>	96.911
C <sub>17</sub>	103.808	C <sub>35</sub>	103.868	C <sub>53</sub>	103.868	C <sub>71</sub>	103.873
C <sub>18</sub>	110.770	C <sub>36</sub>	109.410	C <sub>54</sub>	109.410	C <sub>72</sub>	109.415

Tabela 14 - Ordenamento das 72 soluções.

Fonte: Autora, 2018.

A concepção julgada mais adequada é a número dezoito (C<sub>18</sub>) que é composta pelas soluções de “norma NR18” para os subsistemas de implantação e sinalização de canteiro de obra, “manual+mecanizado” para a adequação e emboques e execução do poço de ataque, “furos guias+ topografia” para o alinhamento da couraça dando condições necessárias para o início da operação do equipamento.

Para o subsistema de avanço julgou-se mais adequada a “couraça + placa” mostrando um custo significativamente reduzido de aquisição em comparação com as

demais soluções. Já a escavação da frente será por meio de um misto entre “manual + mecanizado com pá escavadeira” e a remoção dos resíduos através de “vagão” e o transporte do solo será conduzido por um “caminhão basculante”.

O revestimento provisório que será adotado é composto por “couraça com grade” e o permanente por “placa corrugada”. Adicionalmente, o sistema de controle terá o auxílio de “topografia” e, por fim, o descomissionamento terá como soluções para a subfunção desmontagem a abordagem “manual” e para a reciclagem a técnica “visual”.

## 1.2 Resumo do desenvolvimento do projeto

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um conceito de equipamento de escavação de microtúneis em solo através do método PRODIP. Este método possui uma estrutura sistemática que leva a tomadas de decisões mais adequadas do início ao fim de todo o processo.

O método está dividido em etapas distribuídas por três macrofase, o planejamento que diz respeito à idealização do produto, a projeção que tem o foco no desenvolvimento de requisitos e conceitos, e, a implementação cujo objetivo principal é a preocupação na inserção do produto no mercado.

Para atender ao objetivo da tese buscaram-se focar dentro da macrofase projeção as etapas de projeto informacional e conceitual. Para cada uma delas procurou-se detalhar o máximo possível todas as atividades envolvidas.

No projeto informacional foi definido o ciclo de vida do produto, houve a identificação das necessidades dos usuários, assim como dos requisitos de usuários e de projeto, finalizando com as especificações de projeto.

Com isto, foi possível dar início ao projeto conceitual no qual foi determinada a função global do produto, possibilitando a criação da estrutura de subfunções. Para cada uma delas gerou-se soluções que levaram à idealização de possíveis concepções e à seleção da mais adequada para o objetivo da tese.

Visto isso, com a concepção selecionada o equipamento será descrito com maior detalhamento no capítulo seguinte, assim como seu procedimento executivo.

# CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO

O processo de desenvolvimento discutido no capítulo anterior levou à elaboração da concepção para o equipamento de escavação que satisfaz a função de projeto especificada. Conforme a fase de seleção realizada, a concepção mais adequada à função de projeto está composta por um conjunto de couraça e placa para o avanço, escavações manuais e mecanizadas para a escavação e remoção de resíduos através de vagão e transporte por caminhão basculante. As próximas seções descrevem os principais componentes do equipamento e o procedimento executivo que elucidará todas as etapas do início até a finalização do túnel.

## 1.1 Principais componentes

O equipamento resultante do processo de seleção é composto por uma couraça e uma placa metálica que estão ligadas através de cabos de aço conforme apresentado na Figura 26. O comprimento do cabo depende da extensão do microtúnel.

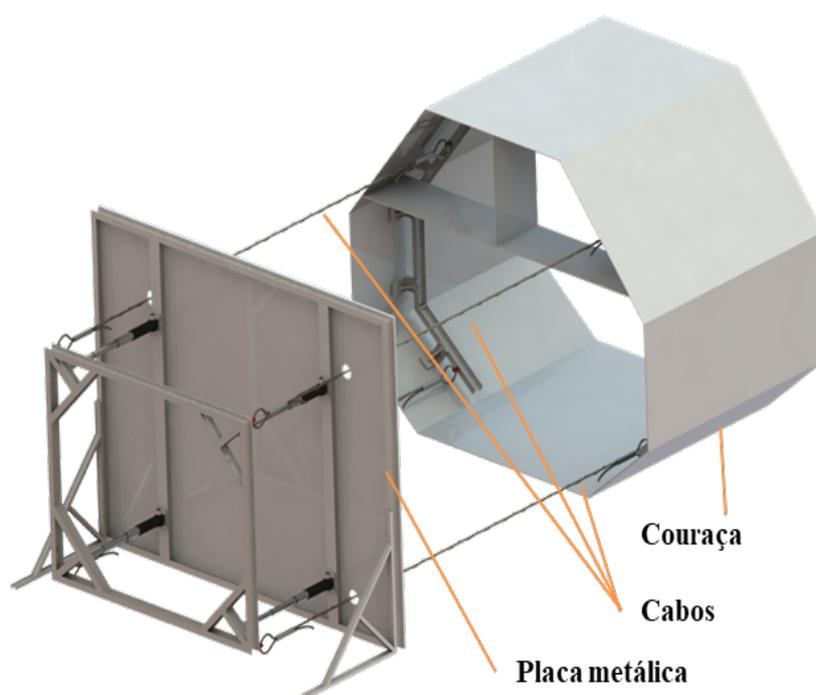


Figura 26 - Componentes do equipamento proposto.

Fonte: Autora, 2018.

A couraça metálica tem como função proporcionar o suporte durante o processo de cravação e desagregação do solo. Na configuração proposta, a couraça é formada por oito chapas retangulares de aço unidas com solda. Seu formato aproxima-se

ao contorno do revestimento lenticular e, desta forma, a quantidade de material de preenchimento será minimizada, como pode ser visualizado na Figura 27.

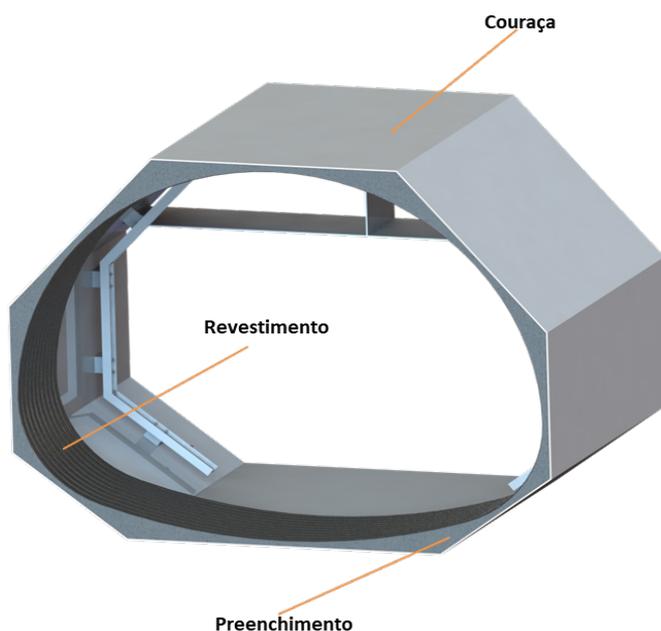


Figura 27 – Detalhe do formato da couraça e do revestimento.

Fonte: Autora, 2018.

A couraça possui chapas na região frontal que tem a função de proteger a frente de uma possível desestabilização do solo. Além disso, ela permite a seleção da área a ser escavada e, dessa maneira, a escavação poderá acontecer de forma parcializada. Outra função das chapas frontais é permitir o fechamento da frente de escavação caso o terreno venha a desmoronar, evitando que o solo invada o interior da couraça. O detalhe da parte frontal da couraça com a grade de proteção é mostrado na Figura 28.

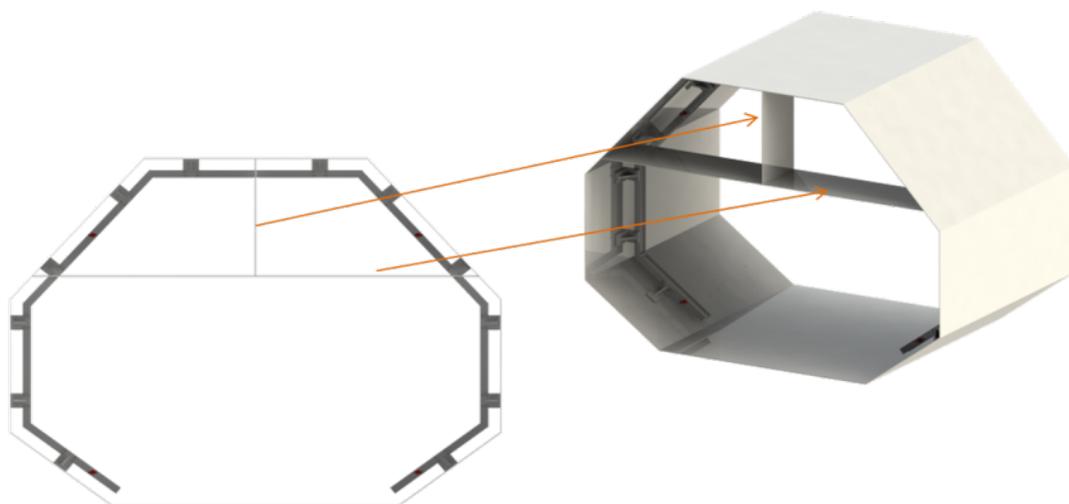


Figura 28 – Grade de proteção na parte frontal da couraça.

Fonte: Autora, 2018.

Ainda em se tratando da couraça poderá haver chanfros em todas as bordas das chapas na superfície frontal para facilitar o processo de cravação da couraça no solo durante sua movimentação e que será definido no projeto preliminar.

No interior da couraça existem as vigas em todo o contorno exceto na parte inferior para facilitar a movimentação de equipamentos mecanizados e pessoas. A função principal das vigas é de possibilitar o avanço além de fornecer maior resistência e rigidez à couraça. Nas vigas há a presença de olhais de sustentação por onde serão alocados os cabos de aço que farão a união entre a couraça e a placa metálica.

A placa metálica é, portanto, segundo elemento mais importante no equipamento que consiste de uma chapa de aço com uma armação móvel que é responsável pelo tracionamento do cabo de aço, resultando no avanço da couraça até seu encontro.

A placa é reforçada por vigas e uma armação retangular móvel formado por outras vigas, e dois suportes verticais para evitar o tombamento da placa, conforme apresentado na Figura 29.

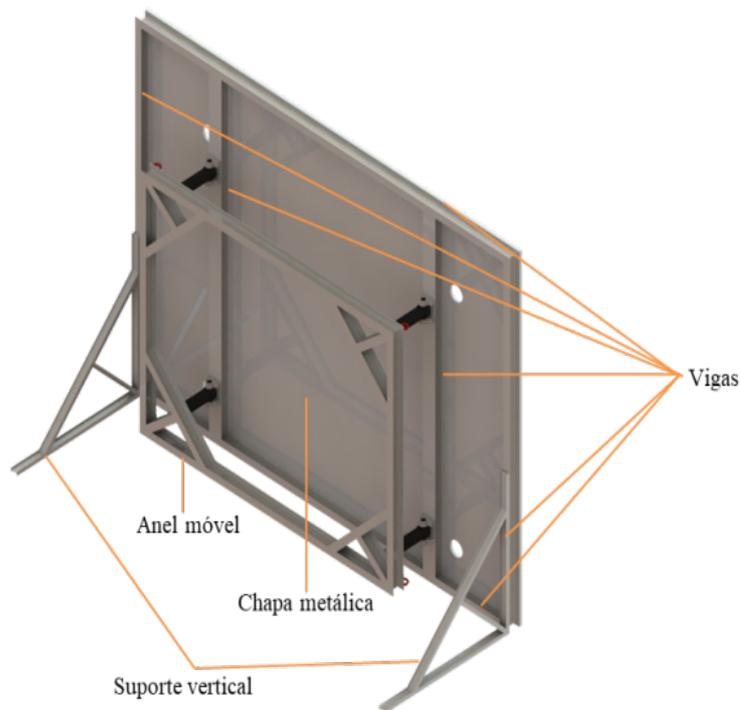


Figura 29 – Placa metálica e seus componentes.

Fonte: Autora, 2018.

A chapa metálica contém quatro furos para a passagem dos cabos de aço que serão alocados nos olhais de sustentação dispostos na armação móvel. Para fixar os cabos são usados cliques, conforme mostra a Figura 30.

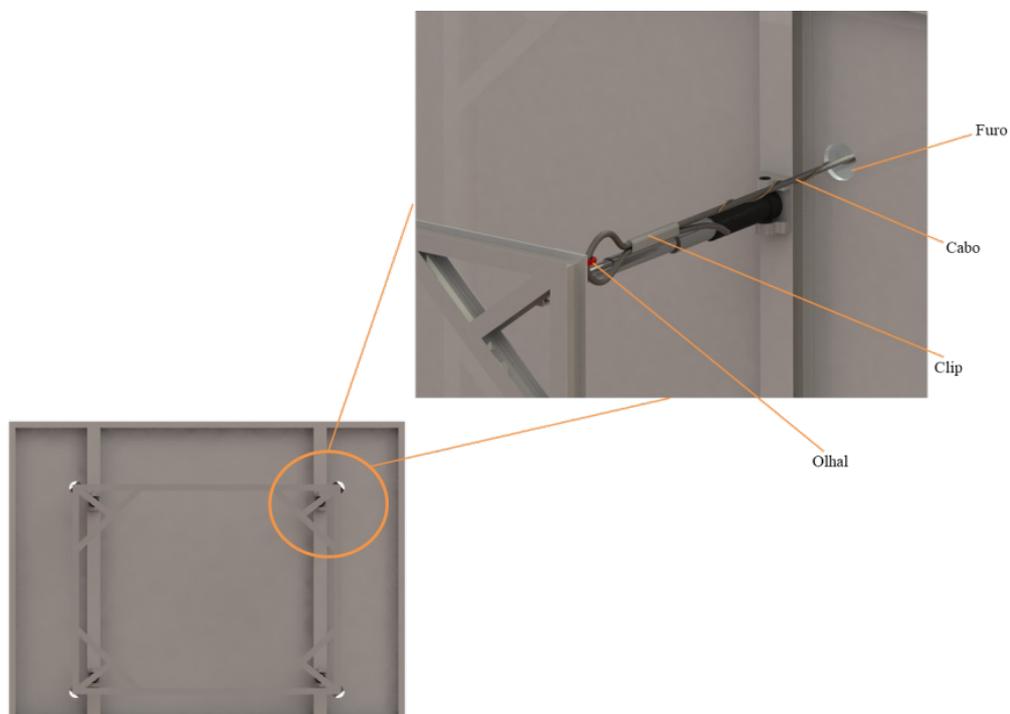


Figura 30 – Detalhes da placa e alocação do cabo de aço.

Fonte: Autora, 2018.

Por fim, têm-se os cilindros de expansão que serão responsáveis pelo deslocamento da armação móvel que consequentemente tracionará os cabos e fará com que a couraça inicie sua movimentação como indicado na Figura 31.

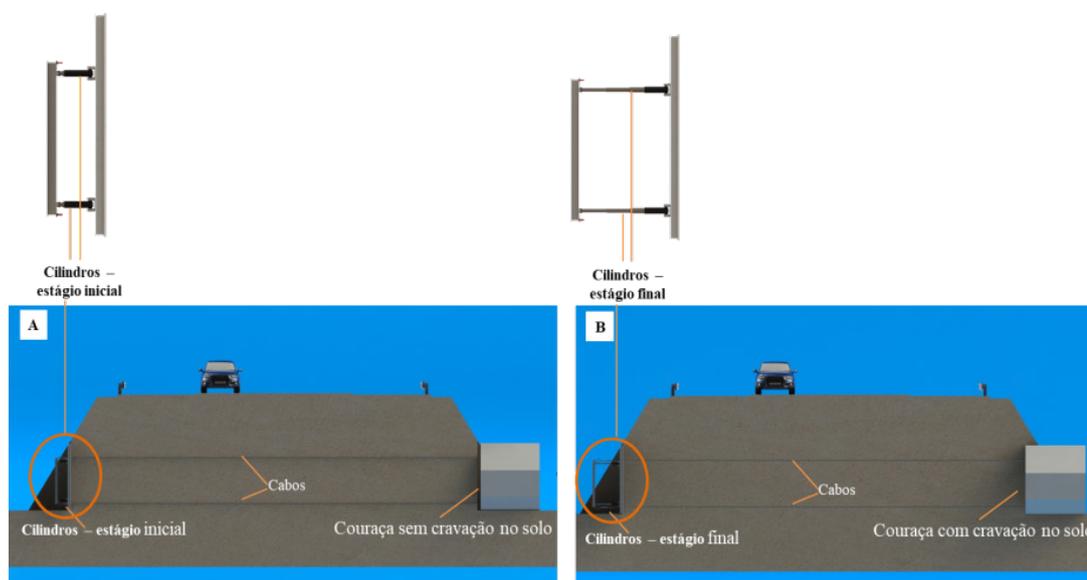


Figura 31 – Cilindros de expansão.

Fonte: Autora, 2018.

O desenvolvimento conceitual levou à concepção apresentada sempre buscando cumprir os requisitos discutidos anteriormente, ou seja, o equipamento desempenhará seu papel de forma segura, rápida e baixo custo. Para completar o conceito é importante também definir seu funcionamento e isto está exposto na seção seguinte.

## 1.2 Procedimento executivo

As etapas executivas para a construção de um microtúnel utilizando a concepção escolhida iniciam com a fase de pré-operação que contempla a implantação e sinalização do canteiro de obra. A Norma NR18 estabelece diretrizes de ordem administrativa, de planejamento e de organização, que objetivam a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos de segurança nos processos, nas condições e no meio ambiente de trabalho na Indústria da Construção (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2018).

Ainda segundo a norma NR18, a área de trabalho deve ser previamente limpa, devendo ser retirados ou escorados solidamente árvores, rochas, equipamentos, materiais e objetos de qualquer natureza, quando houver risco de comprometimento de sua estabilidade durante a execução de serviços. Os canteiros de obras devem ter sinalização de advertência, inclusive noturna, e barreira de isolamento em todo o seu perímetro.

Após cumprir a etapa de mobilização estabelecida por norma dá-se início às atividades de preparação com a adequação dos emboques, construção de poço de ataque caso seja necessário. Este cenário pode ser visualizado na Figura 32.

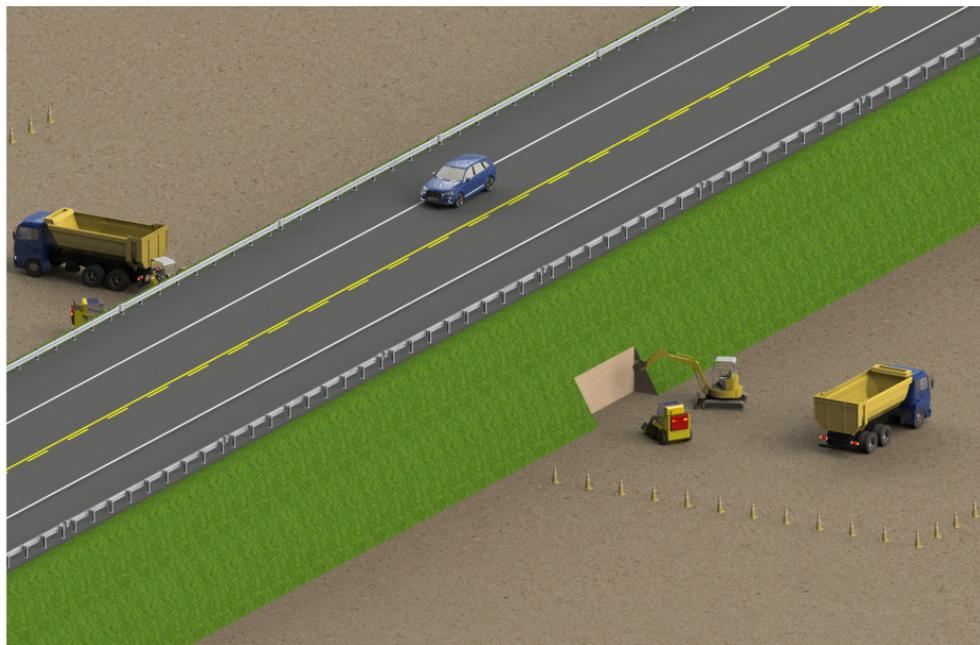


Figura 32 – Adequação dos emboques para preparação da área a ser escavada.

Fonte: Autora, 2018.

Para finalizar a etapa de preparação, uma atividade de extrema importância diz respeito ao alinhamento da couraça com a placa metálica. No caso de taludes rodoviários elevados, esses dois elementos são colocadas em lados opostos da área a ser escavada e a ligação é feita por cabos de aço. Para que isto ocorra executam-se quatro perfurações horizontais que atravessam o trajeto de um lado ao outro, conforme

ilustrado na Figura 33.

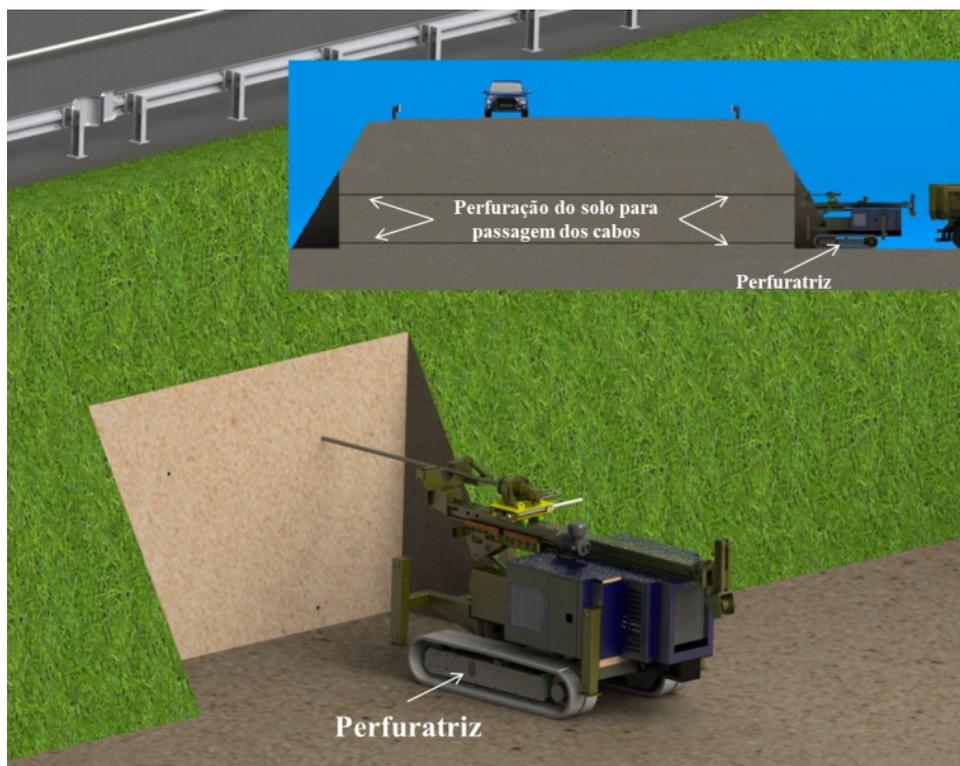


Figura 33 – Perfuração horizontal para a passagem dos cabos.

Fonte: Autora, 2018.

Durante a perfuração horizontal do terreno, o solo será investigado para identificação da existência de matacão ou outros contratemplos.

Caso não haja acesso aos emboques por estes estarem localizados abaixo do nível do terreno, faz-se necessário a abertura de poços de ataque antes da execução das perfurações e da instalação da couraça e da placa, conforme indicado na Figura 34.

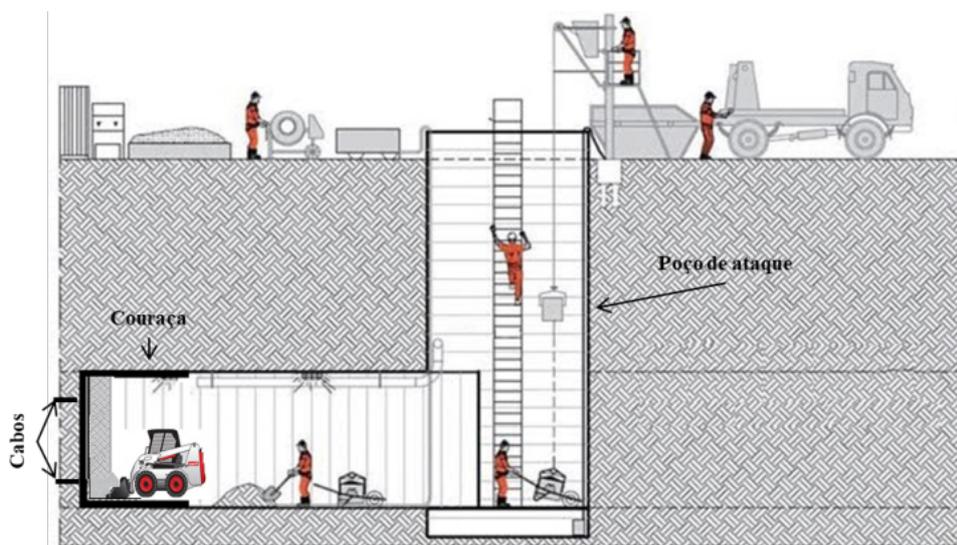


Figura 34 – Poço de ataque caso haja necessidade.

Fonte: Autora, 2018.

As perfurações permitirão a instalação de uma tubulação guia com a função de estabelecer a trajetória de escavação e isolar a interação entre o cabo e o maciço. No interior dos tubos têm-se a colocação dos cabos de aço e estes são envolvidos por corda ou por cabo de segurança com o intuito de minimizar acidentes caso algum deles venha a romper.

Com a amarração dos cabos nas extremidades, a couraça e a placa metálica são conectadas, conforme apresentado na Figura 35, e a operação de escavação pode ser iniciada.

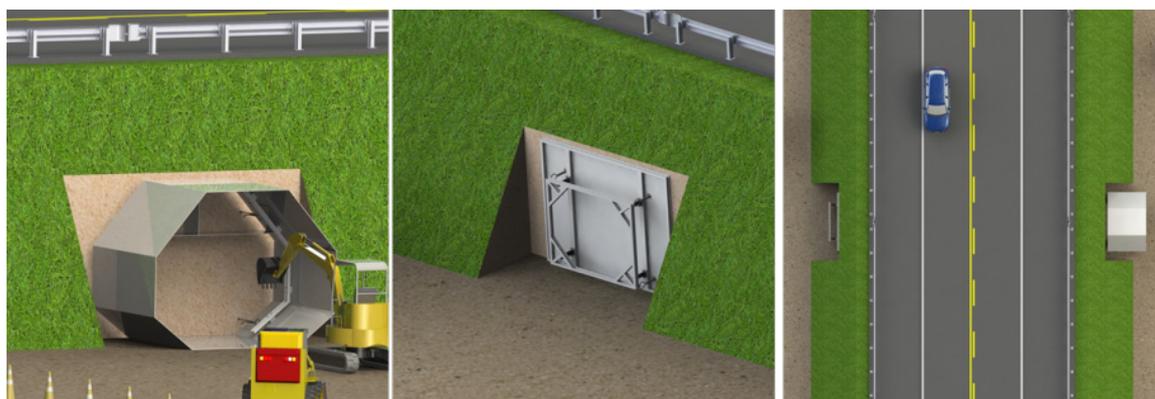


Figura 35 - Posicionamento da couraça e da placa para inicialização da obra.

Fonte: Autora, 2018.

Após todas as etapas da pré-operação finalizadas pode ser iniciada a fase de operação do equipamento com as expansões dos cilindros. Estes tracionam os cabos de aço fazendo com que a couraça se movimente em direção à placa metálica, segundo ilustra a Figura 36.

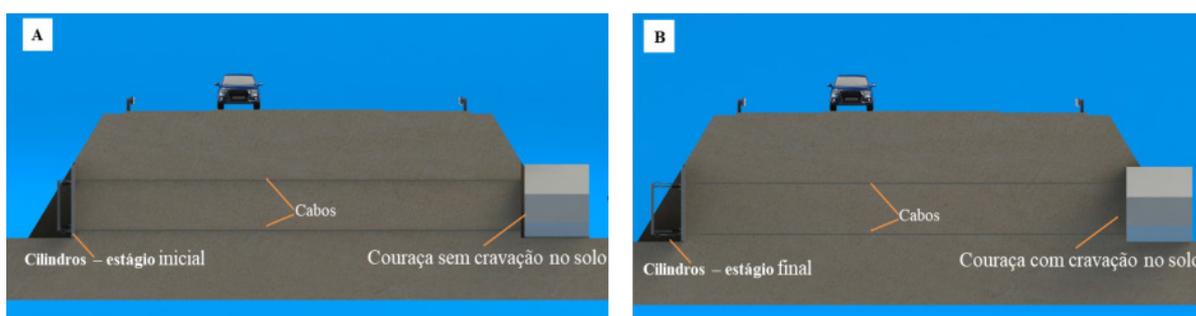


Figura 36 – A: cilindros na posição inicial – B: cilindros expandidos.

Fonte: Autora, 2018.

Estando a couraça cravada no solo a etapa de escavação ocorrerá de forma manual e mecanizada com o auxílio de uma mini-escavadeira, conforme se observa na Figura 37.

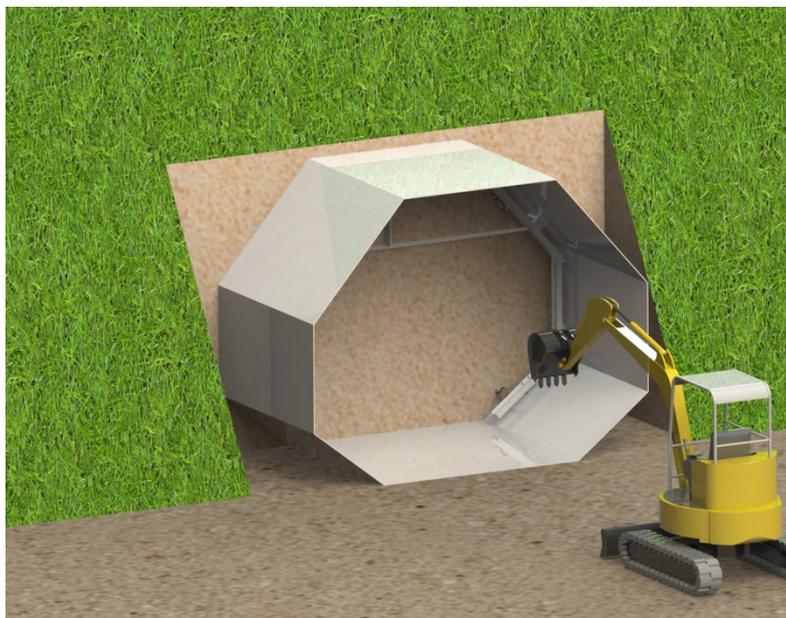


Figura 37 – Escavação do solo.

Fonte: Autora, 2018.

Um novo ciclo de expansão dos cilindros e avanço da couraça ocorre até que esta esteja com toda a sua extensão no maciço. A partir deste momento deve-se iniciar a instalação do suporte permanente, conforme é mostrado na Figura 38.

A montagem do revestimento é feita manualmente utilizando chapas metálicas corrugadas, como na técnica usual de escavação manual onde iniciou a escavação em direção à placa do outro lado do túnel. Cada novo anel é montado ainda dentro da couraça. À medida que a couraça avança, os anéis montados passarão a entrar em contato com o terreno escavado. Neste momento, os espaços vazios existentes entre o revestimento e o solo devem ser preenchidos com calda de injeção a fim de se evitar recalques posteriores. Este preenchimento deverá ser feito através de furos nas próprias chapas corrugadas, por meio de bicos de injeção.

Para evitar acomodações do terreno e consequentes recalques indesejáveis na superfície, as injeções deverão ser realizadas no último anel montado simultaneamente à movimentação da couraça. O material de preenchimento deverá ter as seguintes características: fluidez, ligeiramente expansível e de razoável resistência à compressão. Durante o preenchimento, deverão ser checados os anéis através de controle de volume e da procura de “som oco”, que evidencie a existência de vazios. Caso seja constatada a existência de vazios, deverá ser executada uma nova injeção neste local.

Havendo necessidade de se aumentar a estanqueidade do revestimento, para evitar a fuga de argamassa, pode-se introduzir nas emendas entre as chapas uma tira de feltro ou espuma. No ato da injeção, recomenda-se o uso de feltro ou espuma na borda livre do último segmento de anel montado, a fim de conferir uma vedação na frente de escavação.

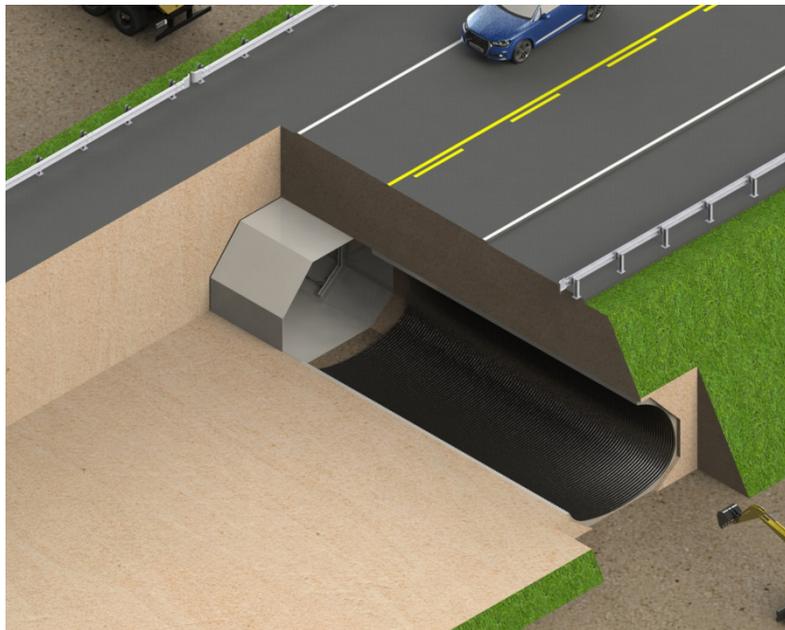


Figura 38 – Montagem do revestimento.

Fonte: Autora, 2018.

De forma simultânea à atividade de escavação do solo, há a necessidade da retirada dos resíduos, ilustrado na Figura 39. Isto acontece através de vagão transportador que desliza por trilhos montados para facilitar o deslocamento até o exterior do microtúnel onde faz o despejo no caminhão basculante. Este tem a função de levar o solo removido para o local de destino.

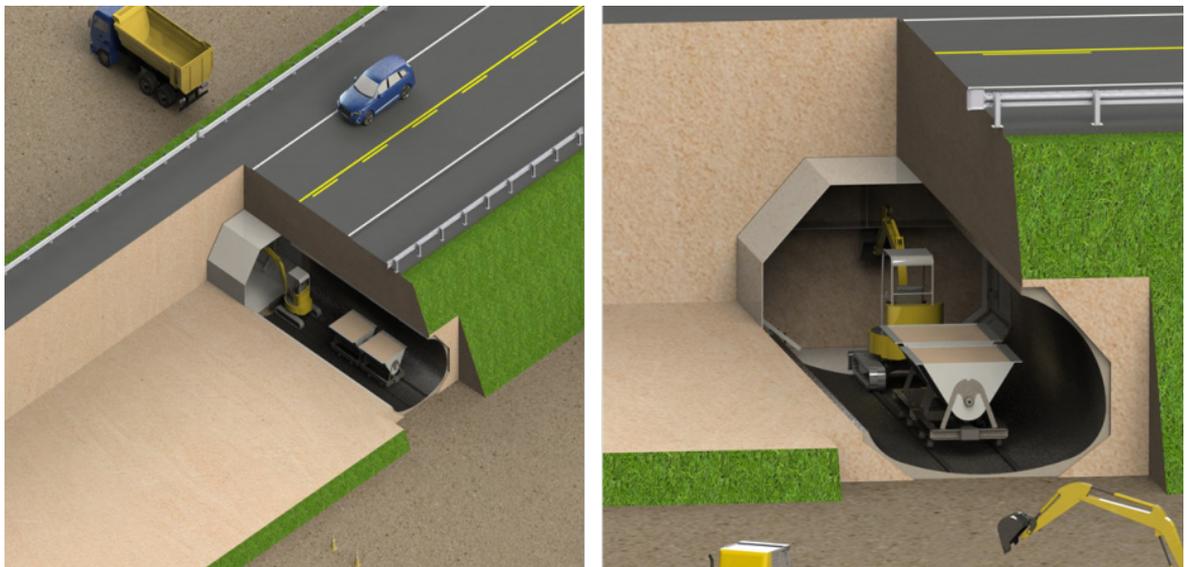


Figura 39 – Remoção de resíduos de solo.

Fonte: Autora, 2018.

Resumindo, o processo operacional do sistema proposto é cíclico iniciando com o avanço da couraça, seguida da escavação e da remoção do solo e finalizando com a montagem do revestimento. Estas atividades cessarão quando o microtúnel estiver

finalizado. Por fim, a placa é desmontada e a couraça puxada através de guinchos para a remoção total do maciço, conforme mostra a Figura 40.

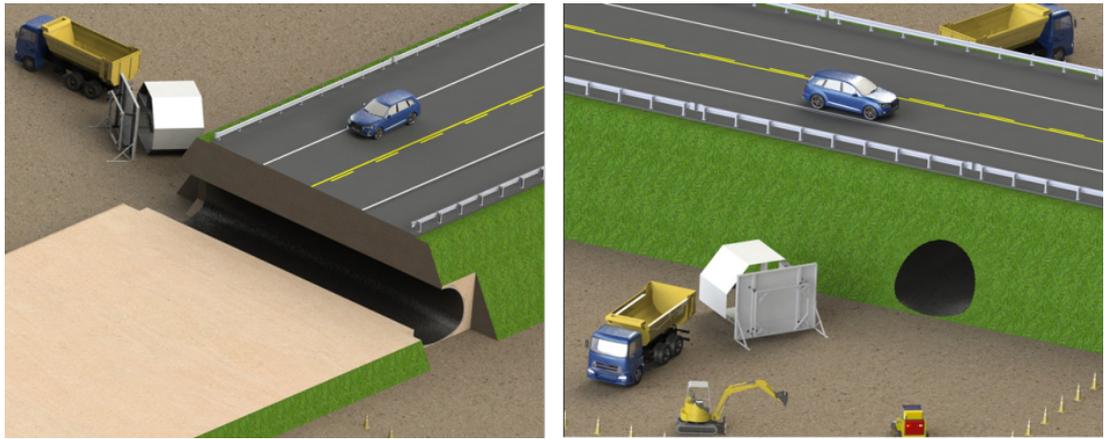


Figura 40 – Finalização das atividades operacionais.

Fonte: Autora, 2018.

Com a finalização da fase operacional dá-se início ao descomissionamento do equipamento com a desmontagem manual dos componentes.

Além disso, durante todas as etapas de pré-operação, operação e pós-operação, deverá haver trocas de informações realizadas através de um sistema de controle. Este será executado por topografia e irá acompanhar todo o andamento da obra. Caso haja divergências em quaisquer das atividades, medidas de correções devem ser tomadas.

Adicionalmente, a obra deverá contar com um plano permanente de monitoramento para o controle de recalques. As medições de deslocamento do solo deverão ocorrer em simultaneidade com a escavação (após a instalação completa de um anel do revestimento) por meio de levantamento topográfico adequado e registrada em planilhas específicas.

Caso sejam encontrados fragmentos de rochas a couraça não conseguirá avançar. Assim, deve-se usar alguma técnica bem estabelecida para realizar o desmonte, como marteletes hidráulicos, por exemplo. Outra alternativa que proporciona o desmonte de forma mais controlada e suave, consiste no uso de hidrodemolição da rocha com jato d'água de alta pressão.

Com todas as atividades executadas o microtúnel está pronto para ser liberado para uso de acordo com a finalidade para qual foi projetado, como mostra a Figura 41.



Figura 41 – Microtúnel pronto para ser utilizado.

Fonte: Autora, 2018.

### 1.3 Resumo da concepção do equipamento

O presente capítulo apresentou primeiramente a concepção selecionada do equipamento de escavação. Este é composto por uma couraça, uma placa metálica e componentes auxiliares de movimentação como cabos e cilindros, escavação, preenchimento de vazios e remoção do material escavado. Com o intuito de proporcionar uma visão geral do equipamento e da sua operação, a Figura 42 ilustra os passos que devem ser realizados do início até a finalização da obra.

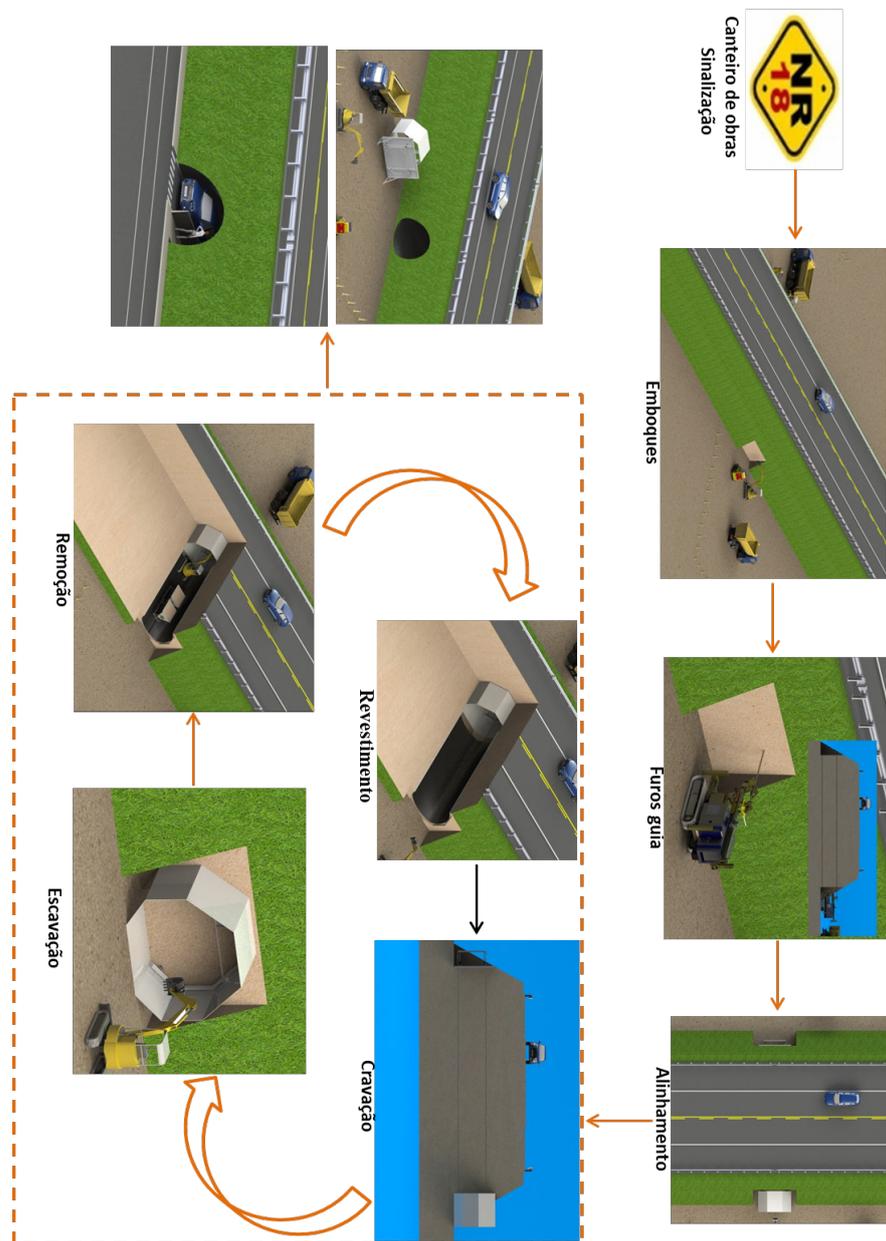


Figura 42 – Etapas do procedimento de construção do microtúnel.

Fonte: Autora, 2018.

A pré-operação engloba a implantação e sinalização do canteiro de obra seguindo a norma NR18, a adequação de emboques e poço de ataque (caso seja necessário) e, por fim, faz-se o alinhamento através de furos guias e o posicionamento do equipamento.

A fase operacional é cíclica e inicia com o avanço do equipamento, logo após, tem-se a escavação, remoção de material escavado, montagem do revestimento permanente e preenchimento de vazios. O processo é finalizado quando o microtúnel estiver completo.

Finaliza-se, portanto, com a remoção da couraça por meio de caminhão guincho e com o descomissionamento do equipamento separando as peças que serão reaproveitadas das que serão descartadas e recicladas.

Neste ponto considera-se que o desenvolvimento conceitual atingiu o objetivo de resultar em um equipamento funcional e eficiente. De fato, no capítulo 3, discutiu-se sobre o desenvolvimento conceitual do equipamento proposto com base na função de projeto e respectivas subfunções. Já no capítulo 4, apresentou-se o detalhamento dos componentes e do funcionamento do equipamento proposto.

Para fins de complementar, verificar e atestar a funcionalidade e eficiência do desenvolvimento realizado considera-se agora uma análise voltada para questões práticas e de viabilidade da aplicação em um projeto real. Para tanto, o presente capítulo descreve um estudo de caso que diz respeito a um projeto de microtúnel de macrodrenagem localizado em Biguaçu, no Estado de Santa Catarina. O objetivo é apresentar as especificações técnicas para o serviço de escavação na região de implantação do microtúnel comparando o método de escavação manual com a técnica semi-mecanizada aqui desenvolvida através de simulações geotécnicas por elementos finitos, apresentação de orçamentos de obra e de cronograma físico-financeiro.

No caso específico da análise geotécnica, o estudo tem por objetivo validar a técnica de escavação desenvolvida através de análises em elementos finitos da sequência de escavação, comparando os níveis de recalques apresentados tanto para a técnica manual quanto para o desenvolvimento proposto.

## 1.1 Contextualização do estudo de caso

A obra considerada no presente estudo faz parte do projeto da ampliação do sistema de macrodrenagem em Biguaçu/SC, consistindo na travessia do Rio Carolina por um microtúnel sob a BR-101, conforme apresentado na Figura 43.

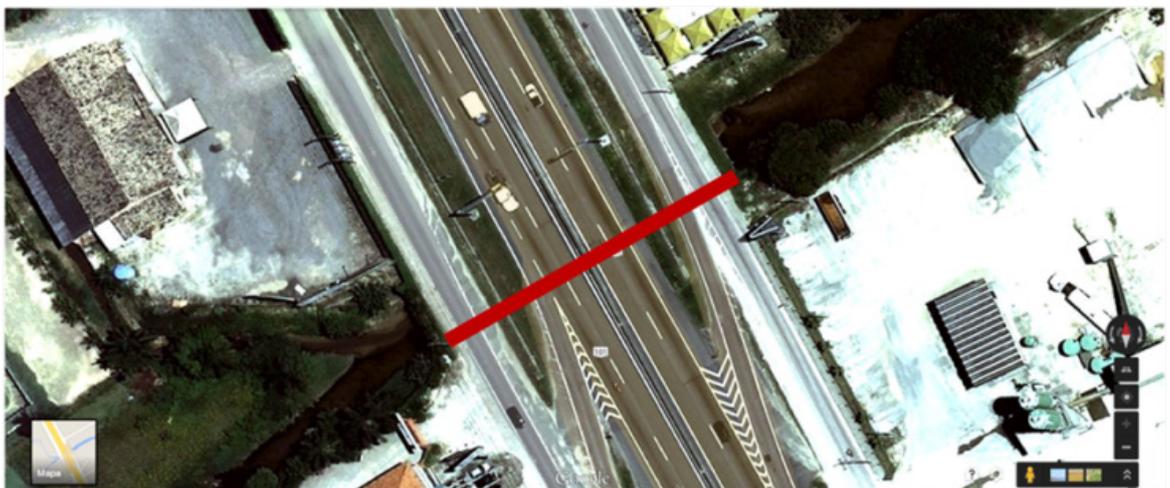


Figura 43 - Local do microtúnel.  
Fonte: Autora, 2017.

A principal motivação para a realização da obra deve-se ao fato de ocorrerem constantes alagamentos na região do Rio Carolina devido à insuficiente drenagem nas galerias existentes sob a rodovia BR 101.

A solução original previa a construção de dois novos microtúneis, com diâmetro de 2,20 m e extensão de 50 m paralelos às galerias existentes, conforme ilustrado na Figura 44. Como será exposto adiante, este projeto foi otimizado para um microtúnel apenas, com formato lenticular com 4,45 m de largura e 3,41 m de altura.



Figura 44 - Localização dos túneis conforme proposta inicial.

Fonte: Autora, 2017.

Analisando a região constatou-se uma cobertura muito baixa, em torno de 1,5 m nas marginais (Figura 45) enquanto que na rodovia principal a cobertura máxima é de 2,5 m que associada ao alto fluxo de veículos confere um elevado risco de colapso à rodovia BR 101.



Figura 45 - Baixa cobertura sob a marginal da BR-101.

Fonte: Autora, 2017.

Além disso, existe a passagem de tubulações de gás entre a rodoria e as galerias o que impossibilita possíveis tratamentos de solo para o tipo de escavação tradicional escolhida para a obra (escavação manual).

Com a baixa cobertura do solo recomenda-se seu tratamento com técnicas especiais de reforço, como a inclusão de enfilagens tubulares, que é um método de instalação de tubos metálicos e injeção de calda de cimento com a finalidade de aumentar a estabilidade do maciço.

Por outro lado, acredita-se que com a tecnologia desenvolvida a execução da obra ocorrerá de uma forma mais segura dispensando os tratamentos no solo, em especial as enfilagens. Outra vantagem é que ao invés de dois microtúneis o equipamento proposto pode ter suas dimensões adequadas para atender a demanda em apenas um microtúnel com dimensões aumentadas, respeitando a vazão de projeto.

## 1.2 Dados iniciais

O projeto original baseava-se em escavação manual, considerando a estabilização dos emboques com muro de gabião, o avanço cuidadoso da escavação do túnel durante todo o procedimento, e o monitoramento dos deslocamentos. Entretanto propõe-se a substituição da técnica manual pela semi-mecanizada aqui desenvolvida.

A escavação sequencial foi definida em avanços diários de 0,5 m a 1 m para um túnel com extensão de 50 m e de dimensões 4,45 m de largura e 3,41 m de altura e que ficará a uma distância de 2 m das galerias já existentes.

O monitoramento durante a execução deve ser realizado através da medição de deslocamentos, conforme praticado atualmente pela técnica manual. Para tanto, recomenda-se, dois sistemas de medição (um interno e outro externo), ambos baseados em levantamentos topográficos. Para o sistema interno de medição, recomenda-se o uso de três pinos fixados no topo e nas laterais do túnel (Figura 46). Com este sistema pretende-se controlar tanto os deslocamentos quanto a tendência de fechamento ou deformação excessiva dos anéis.

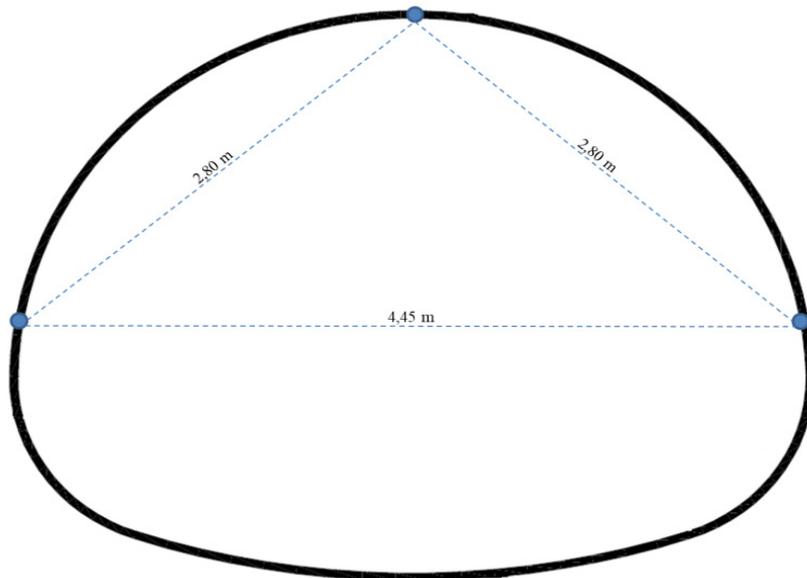


Figura 46 - Monitoramento interno de deslocamentos.

Fonte: Autora, 2017.

Por sua vez, o sistema externo de medição é composto por seis marcos topográficos de superfície (taxões e prismas refletivos) sendo dois posicionados a 3 m dos emboques, outros dois nos centros de cada marginal, e os dois restantes nos centros das pistas da BR 101, conforme esquematizado na Figura 47. Este sistema tem por finalidade verificar os recalques na superfície e tendências de movimentação.



Figura 47 - Sistema de monitoramento de deslocamentos na rodovia.

Fonte: Autora, 2016.

As medições de recalque do solo devem ocorrer diariamente em simultaneidade com a escavação (após a instalação completa de um anel do revestimento) por meio

de levantamento topográfico adequado e devidamente registradas em planilhas específicas.

Os valores de recalques e outras movimentações obtidas pelos estudos devem ser avaliados criteriosamente quanto à representatividade e validade numérica ou quantitativa.

Quando houver suspeitas de que possam ocorrer recalques prejudiciais ao túnel, ao maciço ou às estruturas existentes, devem ser tomadas providências para a minimização ou anulação dos seus efeitos, através de adaptações do método construtivo, execução de tratamentos do maciço entre outros.

Assim, os sistemas de monitoramento estabelecidos devem garantir condições satisfatórias para atribuir a segurança local (microtúnel) e global (BR 101 e entorno) da obra.

### **1.3 Análise de recalques**

A escavação de um túnel induz alterações do estado inicial de tensões no solo, levando a deformações e movimentações do maciço na região do entorno da escavação. Esta situação tem particular importância em zonas urbanas e em rodovias, em que os movimentos do solo devido à construção de túneis podem afetar as infraestruturas próximas do local de escavação. A estimativa destes movimentos necessita, em cada caso específico, de estudos que analisem a natureza do terreno, as suas propriedades, e o processo construtivo do túnel, podendo apresentar estimativas das respectivas deformações do maciço (POSSARI, 2016).

No presente estudo, considerou-se a análise de recalques tanto para o caso de escavação manual quanto para o caso com o equipamento proposto. Assim, foram realizadas simulações através do software MIDAS/GTS, que fornece resultados de alta precisão para a simulação da escavação sequencial de túneis, a fim de estimar os recalques na superfície e os deslocamentos no entorno da escavação tanto em operações manuais quanto do equipamento desenvolvido.

O modelo elaborado considerou uma representação similar da obra proposta para o microtúnel e de seu procedimento executivo, avaliando a escavação sequencial em ambos os casos (manual e equipamento proposto). Para tanto, foram utilizados elementos de casca a fim de representar o revestimento em ambos os casos. Adicionalmente, a couraça metálica usada na execução das escavações pelo equipamento desenvolvido também foi representada por elementos de casca.

#### **1.3.1 Modelo 3D das Escavações**

Para proporcionar a precisão adequada nos resultados, o modelo utilizou um total de 70.992 elementos no modelo da escavação manual e 71.080 elementos no modelo proposto com a couraça tracionada. A simulação ocorreu de forma sequencial com a remoção do material escavado e a aplicação do revestimento, aplicando passos

de escavação a cada 1 m. O efeito da não-linearidade dos materiais foi representado pelo modelo elasto-plástico com o critério de Mohr-Coulomb.

Adicionalmente, ambos modelos levaram em consideração diversas estruturas existentes para retratar ao máximo possível a realidade. Exemplo disso são as galerias anteriormente construídas, a rodovia, as marginais, as estruturas de divisão tipo “New-Jersey”, as gramas, entre outros, conforme observado na Figura 48.

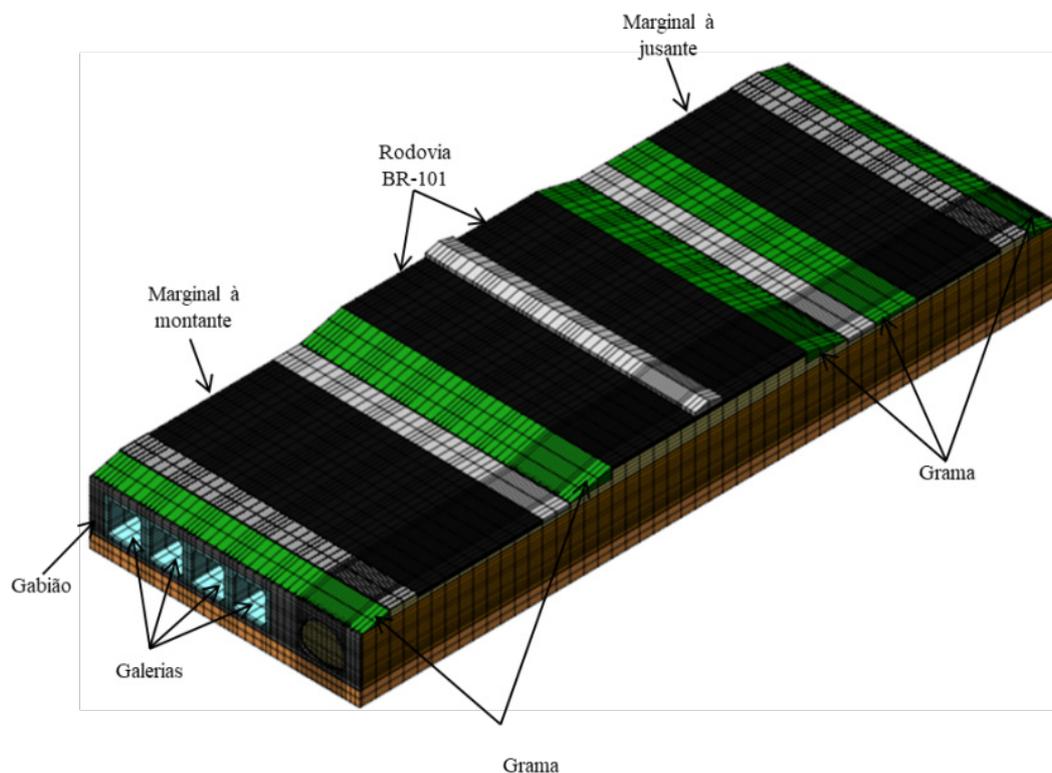


Figura 48 - Modelo 3D e suas estruturas.

Fonte: Autora, 2018.

As sondagens disponíveis para o projeto indicaram diferentes camadas de solo. Para a presente análise foram consideradas para o solo as propriedades elastoplásticas (critério de Mohr-Coulomb) descritas na Tabela 15 e visualizada na Figura 49.

Solo	Módulo de Elasticidade [kN/m <sup>2</sup> ]	Poisson	Peso Específico [kN/m <sup>3</sup> ]	Coesão [kN/m <sup>2</sup> ]	Ângulo de atrito [°]	Espessura [m]
Argila mole	3922	0,25	15	12	27	1,50
Argila média	8825	0,25	17	21	25	5,35
Solo compacto	19613	0,25	20	25	30	2,50

Tabela 15 – Propriedades do solo.

Fonte: Autora, 2018.

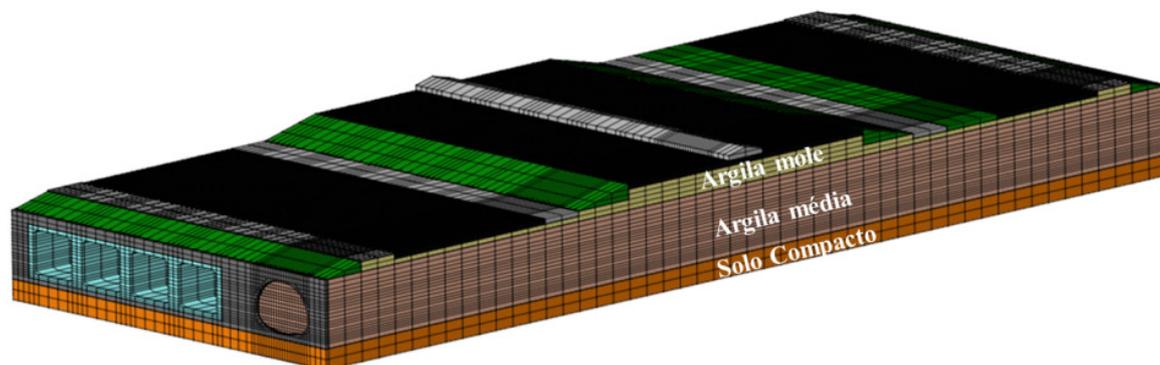


Figura 49 - Diferentes camadas de solo que foram modeladas.

Fonte: Autora, 2017.

Adicionalmente, as propriedades da couraça e da placa metálica estão elencadas na Tabela 16.

Descrição	Módulo de Elasticidade [kN/m <sup>2</sup> ]	Peso Específico [kN/m <sup>3</sup> ]	Espessura [m]
Couraça	210000	78	0,05
Placa	210000	78	0,05

Tabela 16 – Propriedades dos dispositivos.

Fonte: Autora, 2018.

A diferença entre os modelos está na geometria, no procedimento de escavação e na aplicação do revestimento. No que diz respeito à geometria, a diferença consiste na seção da escavação (Figura 50). Por um lado, na execução manual a área escavada refere-se apenas ao material no interior do revestimento, enquanto que na escavação com a couraça tracionada a análise considera o volume um pouco maior da escavação do solo no interior da couraça.

O revestimento considerado para ambos os modelos é o mesmo, consistindo de anel de chapa de aço corrugado com 0,5 m de largura. Entretanto, no modelo com o equipamento semimecanizado proposto, outros dois elementos surgem: a couraça móvel e o preenchimento adicional entre a couraça e o revestimento, conforme pode ser visualizado na Figura 51. Este preenchimento adicional ocorre devido ao formato da couraça que agora exige um volume de escavação ligeiramente maior quando comparado à escavação convencional, e, portanto, este fator deve ser levado em consideração.

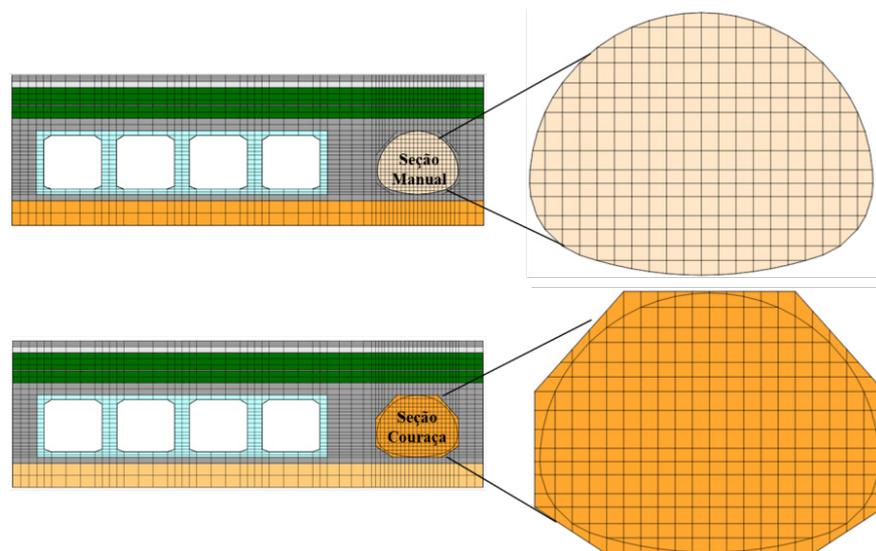


Figura 50 – Seção de escavação dos modelos.

Fonte: Autora, 2018.

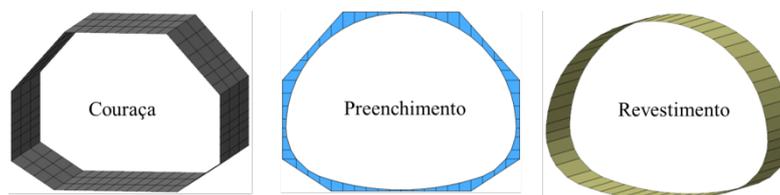


Figura 51 – Detalhe da couraça, preenchimento e revestimento.

Fonte: Autora, 2018.

A área da seção manual é de  $12,11 \text{ m}^2$  enquanto que a área da seção com couraça é de  $13,72 \text{ m}^2$ . Assim, o preenchimento do modelo escavado com o equipamento proposto ocupar uma área adicional de  $1,61 \text{ m}^2$  no plano da seção transversal do microtúnel.

Outro aspecto importante é quanto as cargas consideradas nas vias principais, tanto nas marginais quanto na rodovia BR101 de  $25 \text{ kN/m}^2$  para ambos os modelos, conforme mostra a Figura 52. Isto simula as condições reais de execução da obra.

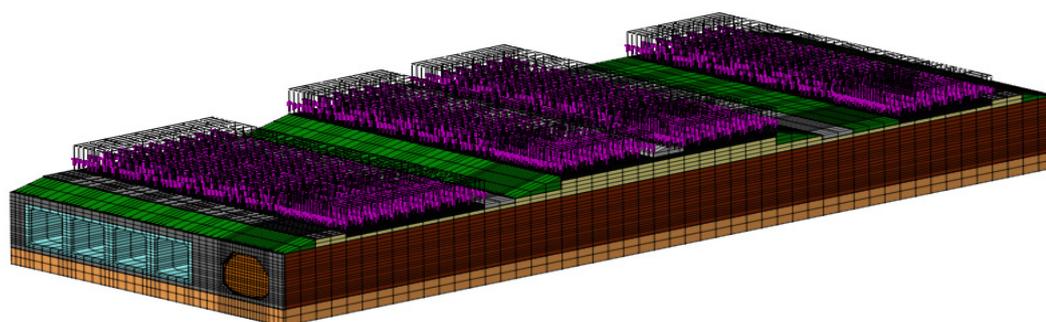
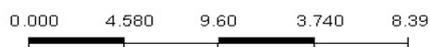


Figura 52 – Distribuição de cargas nos modelos.

Fonte: Autora, 2018.

### 1.3.2 Resultados das análises 3D

Os dois modelos 3D elaborados consideraram efeitos da não-linearidade do material, da escavação sequencial e da aplicação sucessiva dos elementos de suporte.

Um dos aspectos mais críticos considerados na análise refere-se aos recalques da rodovia pelo processo construtivo e pelo carregamento de 25 kN/m<sup>2</sup>.

#### 1.2.1.1 Recalques para o modelo da escavação manual

No modelo da escavação manual considerou-se que a aplicação do revestimento com a chapa corrugada era aplicado apenas após o avanço de 0,50 m da seção do túnel. Este procedimento foi adotado para simular as condições reais de execução com este método.

Assim, para a escavação manual do microtúnel o valor máximo de deslocamento vertical encontrado foi de aproximadamente 0,03 m, que pode ser visualizado na Figura 53.

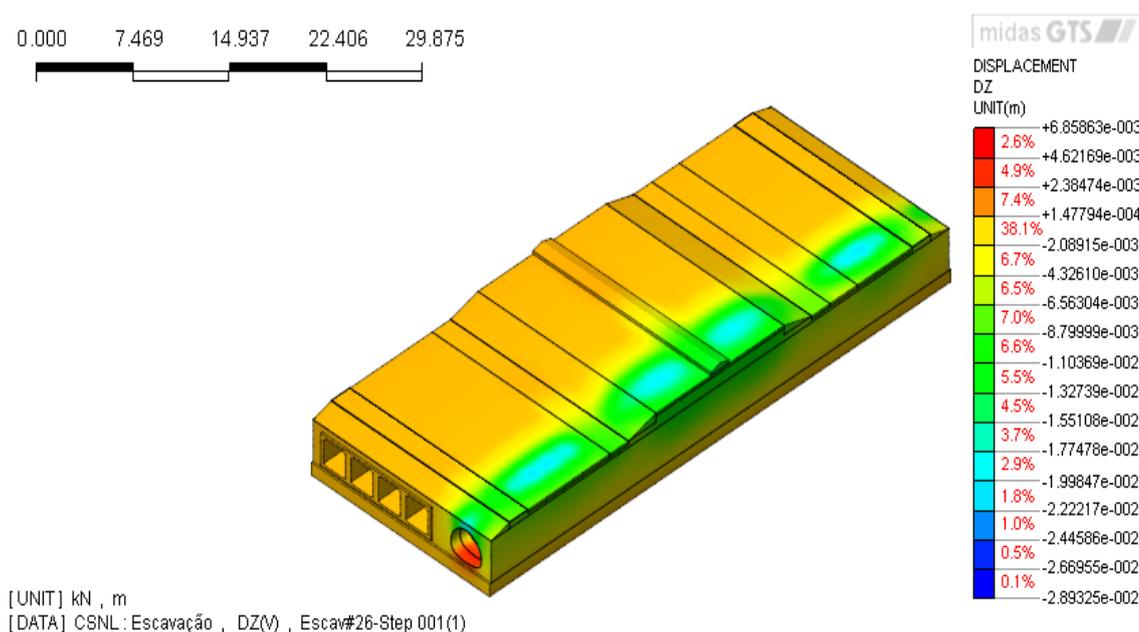


Figura 53 - Resultado dos deslocamentos verticais para a escavação manual.

Fonte: Autora, 2018.

Nota-se a existência de deslocamentos verticais positivos e negativos. Os deslocamentos positivos, ou seja, no sentido de baixo para cima ou do solo para a base do túnel pode ser interpretada devido à tendência de flutuação por haver uma baixa cobertura ou por questões de deformabilidade do solo que são causadas pela alta pressão do maciço que tende a empurrar a base do túnel para cima. Neste caso, o deslocamento máximo positivo é de aproximadamente 0,007 m.

Por outro lado, o deslocamento negativo representa o sentido de cima para baixo, ou seja, da rodovia para o topo do túnel e neste caso, o valor máximo encontrado foi de aproximadamente 0,030 m.

No sentido de melhor visualizar e identificar os locais de maior deslocamento positivo e negativo, um corte longitudinal no centro do microtúnel está apresentado na Figura 54.

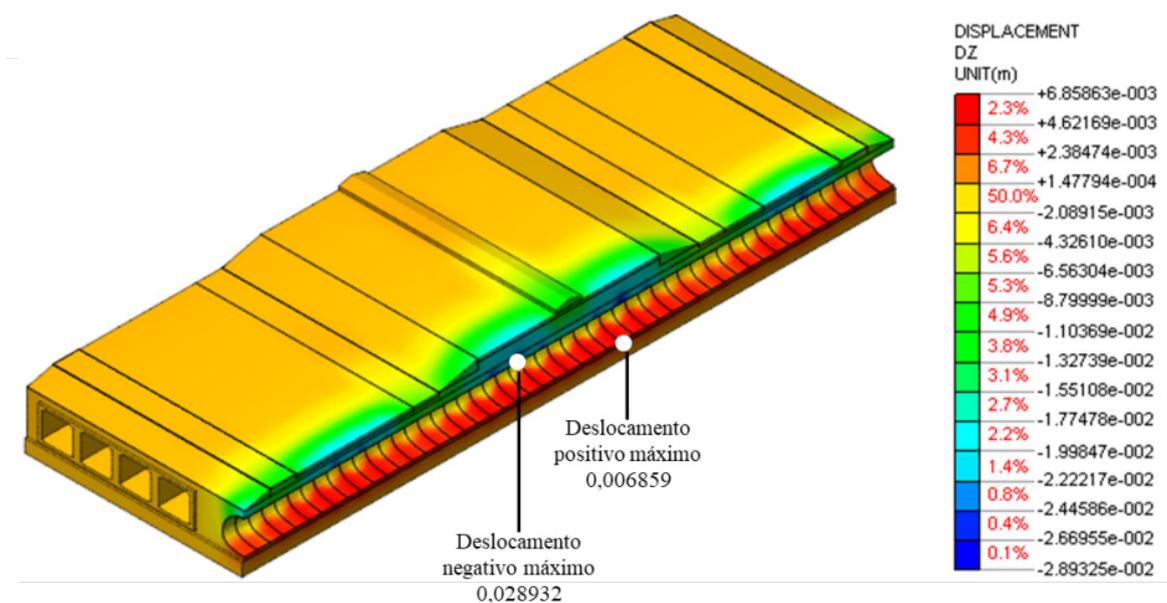


Figura 54 – Corte no modelo para apresentação dos deslocamentos verticais para a escavação manual.

Fonte: Autora, 2018.

O corte da Figura 54 mostra uma distribuição homogênea por toda a base do microtúnel com relação ao deslocamento positivo. Já os deslocamentos negativos ocorrem abaixo das rodovias, no topo do túnel, onde ocorre maior concentração de cargas devido ao fluxo de veículos.

### 1.3.2.2 Recalques para o modelo com o Equipamento Proposto

No caso específico da utilização do equipamento desenvolvido, a análise considerou a escavação no interior da couraça, a montagem do revestimento, e a cada passo de avanço o preenchimento era aplicado imediatamente. Assim, diferentemente da escavação manual, o solo escavado nunca fica exposto, pois sempre está em contato com a couraça ou com o preenchimento.

Desta forma o resultado da análise indicou níveis relativamente baixos de recalque após a escavação do microtúnel com a nova técnica. Na pior condição de carregamento, o máximo deslocamento vertical negativo observável foi de aproximadamente 0,0045 m no topo do túnel enquanto que o máximo deslocamento vertical positivo foi de aproximadamente 0,0040 m na base do túnel conforme ilustrado na Figura 55.

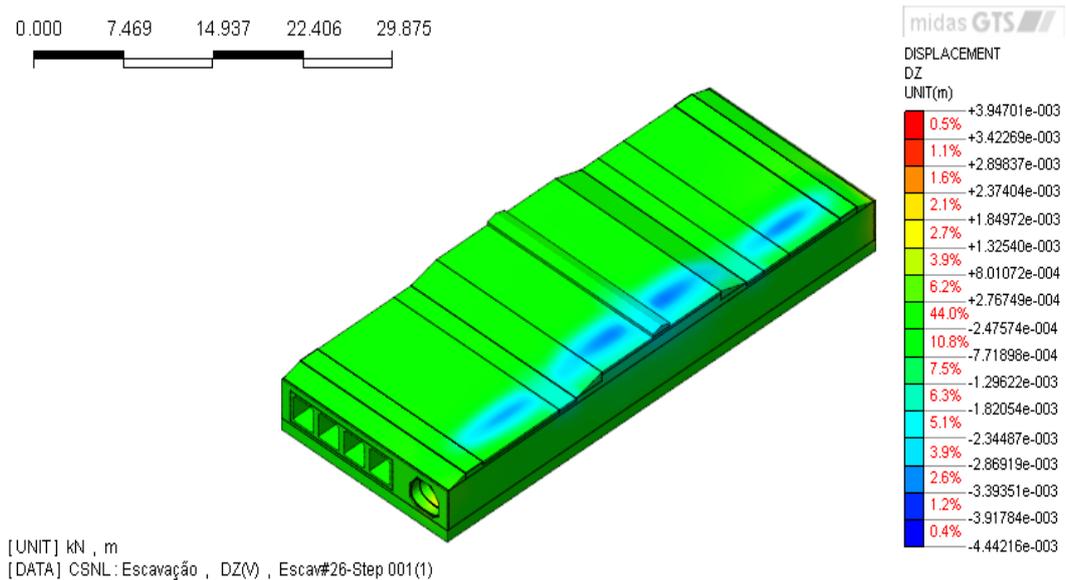


Figura 55 - Resultado dos deslocamentos verticais para escavação com couraça.

Fonte: Autora, 2018.

O gráfico da Figura 56 apresenta um corte onde é possível verificar os locais nos quais os deslocamentos verticais são máximos. Nota-se, portanto que o deslocamento vertical positivo máximo é de aproximadamente 0,0040 m enquanto que o deslocamento vertical negativo máximo é de 0,0045 m, conforme já mencionado.

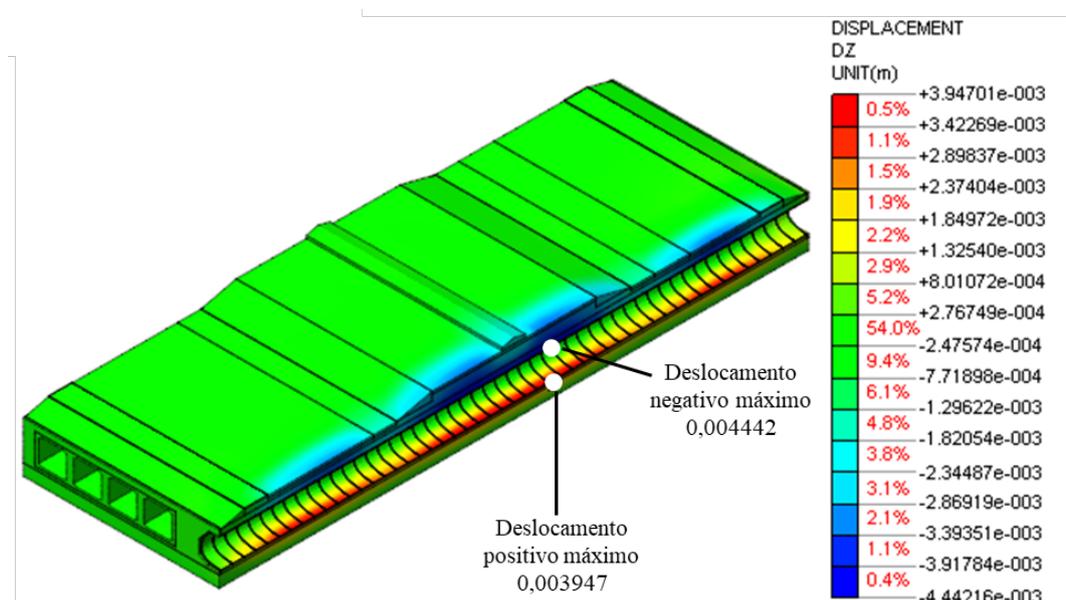


Figura 56 - Corte no modelo para apresentação dos deslocamentos verticais para a escavação semi mecanizada

Fonte: Autora, 2018.

Logo, ao analisar os deslocamentos verticais negativos nas duas situações, nota-se que houve uma redução de aproximadamente 85% comparando o uso da técnica semimecanizada desenvolvida com a execução convencional, reduzindo de 0,03 m na escavação manual para 0,0045 m na semimecanizada. Isto representa uma situação favorável no aspecto de segurança da construção da obra pois reduz o risco

de colapso do solo.

### *1.3.2.3 Influência do deslocamento da couraça no solo*

Nas análises subsequentes, considerou-se a aplicação de forças na couraça analisando o efeito do deslocamento da mesma no solo e verificando a influência gerada no maciço ao seu redor. O mesmo efeito foi estudado para a placa de apoio na extremidade oposta.

Esta análise é de extrema importância visto que a inovação proposta está diretamente ligada ao sistema de avanço por meio de tracionamento de cabos que fazem com que a couraça inicie o processo de cravação no solo e desta forma possibilitando todo o processo construtivo.

Os pontos de aplicação de força (Figura 57) representam os locais onde estarão instalados os cabos que irão tracionar a couraça no sentido do solo iniciando a atividade de cravação e movimentação da mesma.

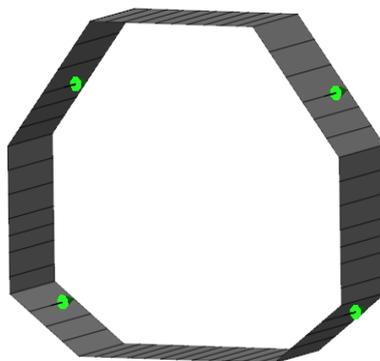


Figura 57 – Pontos de aplicação de força na couraça.

Fonte: Autora, 2018.

Os mesmos pontos de aplicação de força foram colocados na placa metálica (Figura 58), porém com sentido oposto para verificar a influência que a mesma irá exercer no solo.

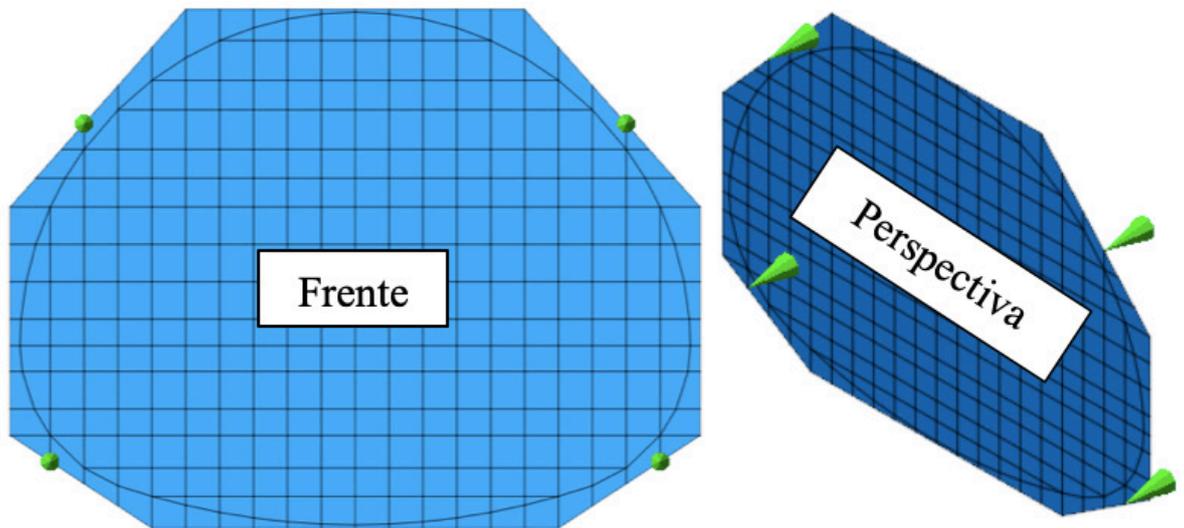


Figura 58 – Pontos de aplicação de força na placa metálica.

Fonte: Autora, 2018.

O modelo foi testado no qual forças foram aplicadas iniciando em 50 kN em cada ponto, ou seja, em cada cabo de aço e, com acréscimos de também 50 kN até determinar qual a intensidade onde não ocorreria a convergência dos resultados, ou seja, significa que houve um grande deslocamento da couraça no solo. Isto ocorreu com a força aplicada de 350 kN para cada ponto.

Como resultado é possível verificar os deslocamentos ao redor tanto da couraça quanto da placa metálica, conforme ilustrado na Figura 59 e Figura 60.

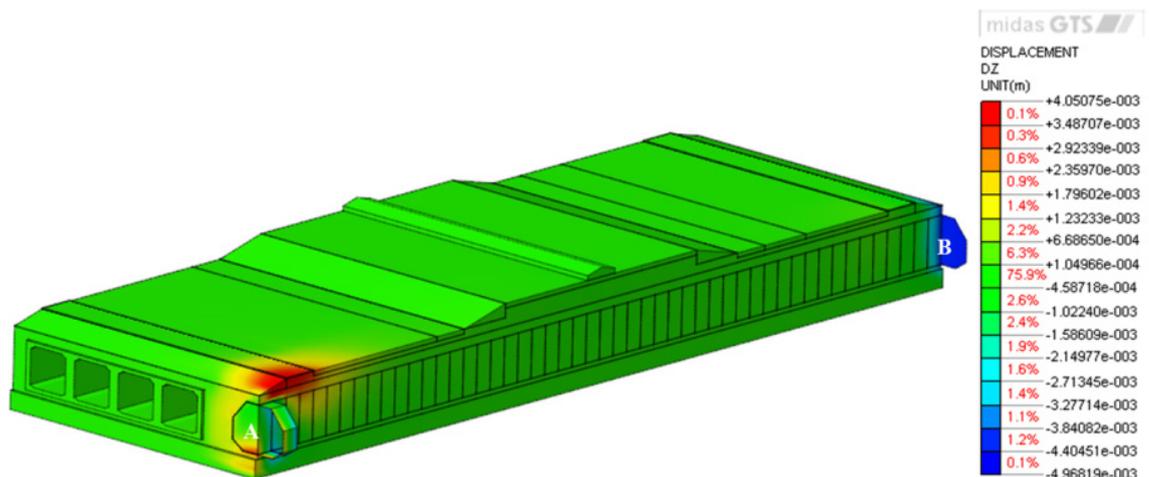


Figura 59 – Deslocamentos do solo pela influência da couraça.

Fonte: Autora, 2018

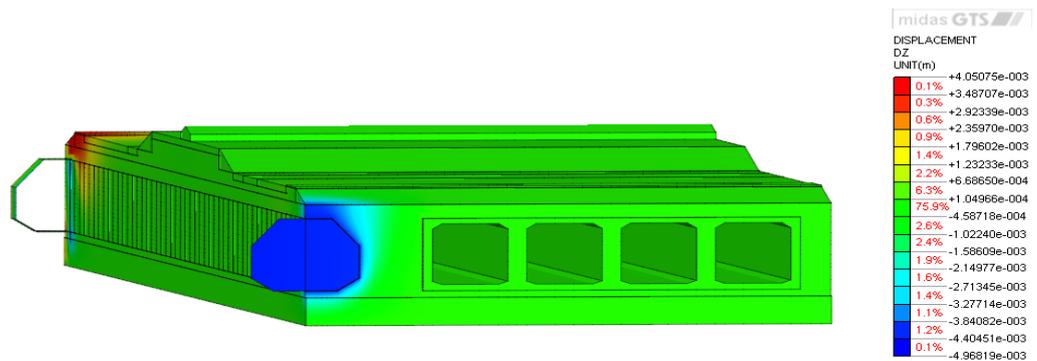


Figura 60 – Deslocamentos do solo pela influência da placa.

Fonte: Autora, 2018.

As análises verificaram a baixa influência no solo tanto com o deslocamento da couraça de um lado quanto do apoio da placa no maciço do outro lado. Os deslocamentos verticais máximos causado por esse efeito são de no máximo 0,005 m, sendo considerados desprezíveis.

#### 1.4 Análise de custo

O valor total de uma obra leva em consideração os custos diretos, indiretos, pré e pós construção, além dos custos sociais.

Os custos diretos dizem respeito à mão de obra, material, equipamentos e terceirizados do empreiteiro. Os custos indiretos estão relacionados com os custos do escritório central e de campo abrangendo a equipe de supervisão e dos materiais e equipamentos de apoio, ou seja, os custos que não estão ligados diretamente ou aplicados às operações de construção (NAJAFI, 2016).

Os custos de pré construção incluem o planejamento, a aquisição de terras, pesquisas geotécnicas, licenças e alvarás, consultorias, entre outros. Já os custos de pós construção envolvem operação e manutenção, gestão de ativos, reparos e renovação.

Por fim, os custos sociais estão relacionados aos impactos no público em geral, no meio ambiente e nas estruturas existentes como por exemplo: custos com interrupções do trânsito, danos em estradas e pavimentos, ruído, poeira e riscos de segurança, entre outros.

O custo total pode variar dependendo de diversos aspectos, como por exemplo, material do revestimento, comprimento e a profundidade. Adicionalmente, tem-se influências específicas do local da obra, como as condições do solo, nível de risco envolvido e condições meteorológicas (NAJAFI, 2016).

A análise de custo que será apresentada envolve apenas os custos diretos e indiretos baseado em tabelas SINAPI/SC (sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil – referência 02/2018) e SICRO/SC (sistema de custos referenciais de obras – referência 11/2017).

A comparação leva em consideração apenas a escavação manual e o método desenvolvido com a couraça tracionada, enquanto que as demais técnicas foram desconsideradas.

O levantamento dos custos abrange os serviços preliminares que englobam a instalação da obra, a mobilização do canteiro de obra e a desmobilização ao final da execução do túnel. Para a instalação da obra foram considerados os custos da limpeza do terreno e da locação da obra, estimando-se os mesmos sobre uma área de 260 m<sup>2</sup> envolvendo o espaço para canteiro de obra, entrada e saída de material, e a área a ser escavada.

Entretanto, para o estudo de caso descrito, a obra ocorrerá onde atualmente passa um curso d'água (Rio Carolina), e, por sua vez, a drenagem do espaço delimitado faz-se necessária. Assim, para compor o custo, foi considerada a construção de ensecadeiras para a contenção da água, que com o auxílio de uma bomba de sucção retira continuamente o excesso de água.

Com a conclusão de todas as etapas preliminares é possível iniciar a escavação propriamente dita. Para o caso da escavação manual, como se trata de uma cobertura extremamente baixa sob rodovia com alto fluxo de veículos, recomenda-se o tratamento do solo através de enfilagens tubulares. No entanto, por se tratar de um trabalho relativamente complexo, o presente estudo não considerou este tratamento em particular. Os custos com o revestimento do túnel foram obtidos por orçamento através da empresa Armco Staco, enquanto que os demais custos foram baseados nas tabelas SINAPI e SICRO.

Durante a execução, uma equipe administrativa fará o acompanhamento controlando a mão de obra, material de entrada e saída, segurança, entre outros. Por fim, ao finalizar as escavações restam a desmobilização do canteiro de obras e a limpeza final. Todas as etapas foram sintetizadas na Tabela 17 que apresenta os custos diretos envolvidos.

DESCRIÇÃO	SUBTOTAL (R\$)
SERVIÇOS PRELIMINARES	52.702,85
CONSTRUÇÃO DE ENSECADEIRAS	27.690,96
ESCAVAÇÃO E REVESTIMENTO DO TÚNEL	1.009.646,50
ADMINISTRAÇÃO DA OBRA	241.739,52
SERVIÇOS FINAIS E ENTREGA DA OBRA	1.200,00
<b>TOTAL</b>	<b>1.332.979,83</b>
<b>Comprimento Total da Construção (m):</b>	<b>50</b>
<b>Custo do m (R\$/m):</b>	<b>26.659,60</b>
<b>Custo do m<sup>3</sup> (R\$/m):</b>	<b>2.201,45</b>

Tabela 17 – Resumo geral do orçamento estimativo para escavação manual.

Fonte: Autora (baseado em orçamentos e tabela SICRO e SINAPI), 2018.

O valor final da obra com escavação manual, sem levar em consideração os custos sociais e de pré e pós-construção, é de aproximadamente R\$ 1,3 milhões.

Nota-se que o maior custo da obra está associado com a operação de escavação em conjunto com o revestimento englobando um total de 76% do valor total. Outros gastos expressivos referem-se a administração da obra com um total de 18% enquanto que os demais serviços totalizam 6% dos custos da obra. Um resumo da distribuição dos custos para a escavação manual é apresentado na Figura 61.

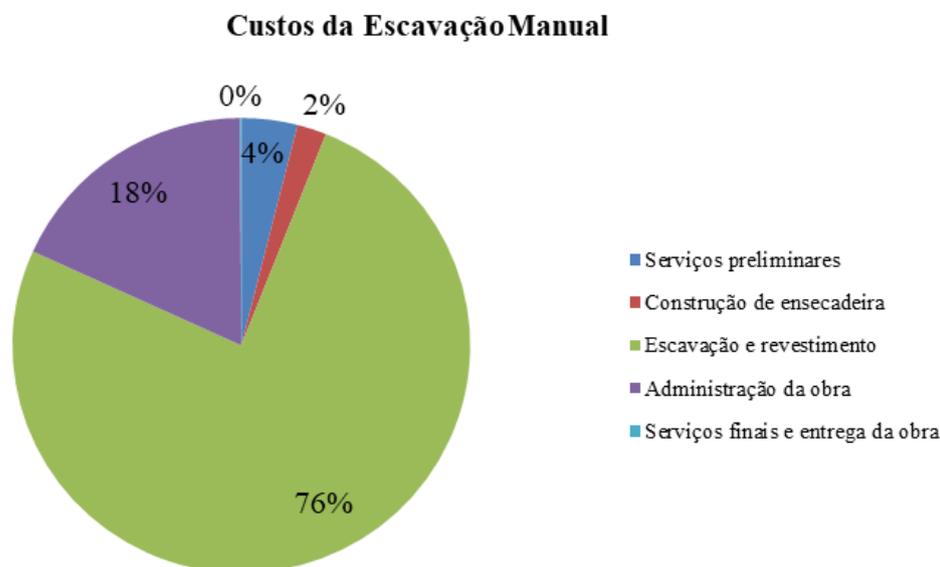


Figura 61 – Distribuição de custos para a escavação manual.

Fonte: Autora, 2018.

Posteriormente, será apresentado o levantamento de custos para a escavação com o equipamento desenvolvido. Esta análise é realizada de forma semelhante à do caso anterior, e o resumo com os valores da escavação com couraça pode ser visualizado na Tabela 18.

DESCRIÇÃO	SUBTOTAL (R\$)
SERVIÇOS PRELIMINARES	52.702,85
CONSTRUÇÃO DE ENSECADEIRA	27.690,96
AQUISIÇÃO DO EQUIPAMENTO	88.718,80
ESCAVAÇÃO E REVESTIMENTO DO TÚNEL	1.366.911,00
ADMINISTRAÇÃO DA OBRA	182.678,16
SERVIÇOS FINAIS E ENTREGA DA OBRA	7.825,00
<b>TOTAL</b>	<b>1.726.526,77</b>
<b>Comprimento Total da Construção (m):</b>	<b>50</b>
<b>Custo do m (R\$/m):</b>	<b>34.530,54</b>
<b>Custo do m<sup>3</sup> (R\$/m):</b>	<b>2.851,41</b>

Tabela 18 – Resumo geral do orçamento estimativo para escavação com couraça.

Fonte: Autora (baseado em orçamentos e tabela SICRO e SINAPI), 2018.

O valor final da mesma obra executada pelo método desenvolvido custará aproximadamente R\$ 1,7 milhões.

Igualmente, para a execução da obra com a couraça tracionada, o custo mais expressivo está relacionado à escavação e o revestimento com 79% do total, seguido pelos custos com a administração da obra (11%), aquisição do equipamento (5%), e outros gastos que totalizam 5%, conforme pode ser analisado na Figura 62.

### Custos da Escavação Semimecanizada

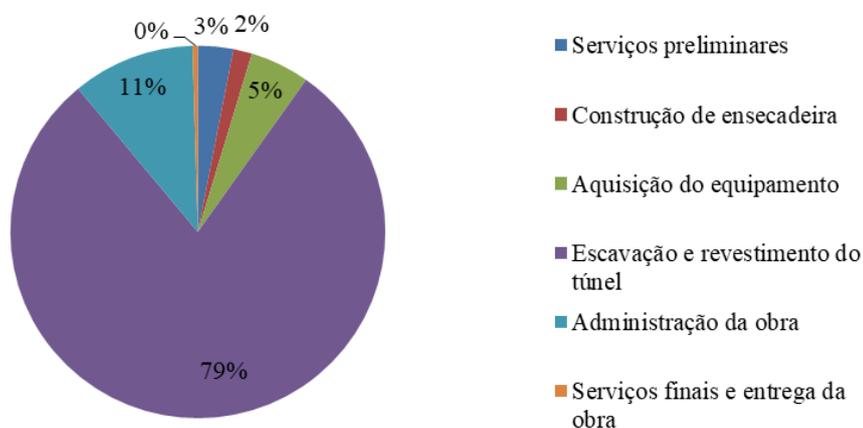


Figura 62 – Distribuição de custos para a escavação com couraça.

Fonte: Autora, 2018.

Nota-se que o custo total com a técnica de escavação desenvolvida é maior comparado ao método de escavação manual. A diferença entre os custos das duas técnicas é de aproximadamente R\$ 400 mil.

Os custos sociais, embora amplamente reconhecidos, raramente são considerados nas fases de projeto, planejamento ou avaliação de propostas de construção nos projetos. Isso é atribuído à dificuldade associada à quantificação dos custos sociais usando estimativas e o fato de que esses custos são suportados pela comunidade e não pelas partes contratuais (GILCHRIST, 2005).

Ainda neste contexto, os custos sociais não são considerados durante o planejamento e projeto por não poderem ser calculados usando métodos padrões. Nos últimos anos, foram feitos esforços para introduzir abordagens para prever os custos sociais associados aos projetos de construção. No entanto, faltam os dados nos custos unitários necessários para a previsão dos custos sociais (CELIK, 2017).

Ainda segundo Celik (2017), caso exista algum tipo de risco na obra isso poderá impactar nos custos sociais de tal forma que caso o risco seja baixo o custo será aumentado em 10% do valor total da obra, médio de 10% a 20%, e alto de 20% a 40% do valor (CELIK, 2017).

Portanto, caso seja avaliado os custos sociais envolvidos, principalmente no que diz respeito à segurança de escavação, a técnica semimecanizada poderá vir a ter um custo total próximo ou até mesmo abaixo do custo da escavação manual. Isto pode ser devido ao fator de segurança que na análise de recalques apresentada verificou-se um risco de que o solo venha a sofrer colapso muito inferior quando comparada com

a escavação manual.

Por exemplo, considerando que o risco de haver um colapso no solo com a escavação manual seja alto e, adotando um aumento de 40% dos custos sociais no valor total da obra, tem-se um valor de R\$ 1.866.171,76 e, com isso, a escavação semimecanizada seria a mais adequada também com relação aos custos. Por fim, outra análise importante é quanto ao cronograma físico-financeiro que será apresentado a seguir.

### **1.5 Análise de cronograma físico-financeiro**

O controle de custos em uma obra precisa ser o mais simples, transparente e exato possível. O desembolso caminha juntamente ao avanço físico da obra, o que auxilia um maior controle sobre o fluxo de caixa, evitando, assim, que os custos do projeto, juntamente ao prazo, saiam do controle do gestor. Este conjunto de informações dá suporte à elaboração de um cronograma físico financeiro de obras (MARTINS, 2015).

Ainda segundo Martins (2015), o cronograma físico financeiro é a representação gráfica do plano de execução de uma obra e deve cobrir todas as fases de execução, desde a mobilização, passando por todas as atividades previstas no projeto, até a desmobilização do canteiro. Desta forma, o gerenciamento da obra se torna uma tarefa mais fácil, tendo-o como um aliado poderoso que ajudará a cumprir os prazos das etapas construtivas.

Para o estudo de caso, no qual todas as considerações estão previstas para uma situação ideal onde não haja anomalias que possam vir a prejudicar o andamento da obra, serão apresentados os cronogramas físico-financeiro referentes à escavação manual e à escavação com couraça. A Tabela 19 diz respeito ao cronograma da escavação manual enquanto que a Tabela 20 apresenta o cronograma para a escavação com couraça.

Item	Serviços	Valor (R\$)	Semana								TOTAL	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
1	SERVIÇOS PRELIMINARES	52.702,85	0,00	0,00	44.797,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0,00%	0,00%	85%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	CONSTRUÇÃO DE ENSECADERAS	27.690,96	13.845,48	13.845,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3	ESCAVAÇÃO E REVESTIMENTO DO TUNEL	1.009.646,50	0,00	0,00	0,00	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65
			0%	0%	0%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
4	ADMINISTRAÇÃO DA OBRA	241.739,52	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16
			8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%
5	SERVIÇOS FINAIS E ENTREGA DA OBRA	1.200,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	TOTAL MENSAL		RS 33.184,64	RS 33.184,64	RS 64.136,58	RS 120.303,81						
	PERCENTUAL MENSAL		2,49%	2,49%	4,81%	9,03%	9,03%	9,03%	9,03%	9,03%	9,03%	9,03%
	TOTAL ACUMULADO PREVISTO	1.332.979,83	RS 33.184,64	RS 66.369,28	RS 130.505,87	RS 250.809,68	RS 371.113,49	RS 491.417,30	RS 611.721,11	RS 732.024,93	RS 852.328,74	RS 972.632,55
	PERCENTUAL ACUMULADO PREVISTO		2,49%	4,98%	9,79%	18,82%	27,84%	36,87%	45,89%	54,92%	63,94%	72,97%
			Semana 9									
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
			Semana 10									
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
			Semana 11									
			100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65	100.964,65
			10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
			Semana 12									
			19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16	19.339,16
			8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%
			Semana 13									
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
			Semana 14									
			600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00
			5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%
			Semana 15									
			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
			TOTAL									
			RS 52.702,85	RS 105.405,70	RS 169.542,28	RS 290.846,09	RS 411.149,90	RS 531.453,71	RS 651.757,52	RS 772.061,33	RS 892.365,14	RS 1.012.669,95
			100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabela 19 – Cronograma Físico-Financeiro para escavação manual.

Fonte: Autora, 2018.

Item	Serviços	Valor (R\$)		Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7
1	SERVIÇOS PRELIMINARES	52.702,85	R\$	0,00	44.797,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			%	0%	85%	0%	0%	0%	0%	0%
2	CONSTRUÇÃO DE ENSECADERA	27.690,96	R\$	24.921,86	2.769,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			%	90%	10%	0%	0%	0%	0%	0%
3	AQUISIÇÃO DO EQUIPAMENTO	88.718,80	R\$	44.359,40	44.359,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			%	50%	50%	0%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4	ESCAVAÇÃO E REVESTIMENTO DO TUNEL	1.366.911,00	R\$	0,00	0,00	205.036,65	205.036,65	205.036,65	205.036,65	136.691,10
			%	0%	0%	15%	15,00%	15,00%	15,00%	10,00%
5	ADMINISTRAÇÃO DA OBRA	182.678,16	R\$	16.441,03	16.441,03	16.441,03	16.441,03	16.441,03	16.441,03	16.441,03
			%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%	9,00%
6	SERVIÇOS FINAIS E ENTREGA DA OBRA	7.825,00	R\$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	TOTAL MENSAL		R\$	RS 85.722,30	RS 108.366,95	RS 221.477,68	RS 221.477,68	RS 221.477,68	RS 221.477,68	RS 153.132,13
			%	4,97%	6,28%	12,83%	12,83%	12,83%	12,83%	8,87%
	TOTAL ACUMULADO PREVISTO	1.726.526,77	R\$	RS 85.722,30	RS 194.089,25	RS 415.566,94	RS 637.044,62	RS 858.522,30	RS 1.079.999,99	RS 1.233.133,12
			%	4,97%	11,24%	24,07%	36,90%	49,73%	62,55%	71,42%
	PERCENTUAL ACUMULADO PREVISTO									
				Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	TOTAL
				0,00	0,00	0,00	7.905,43	0,00	0,00	RS 52.702,85
			%	0%	0%	0%	15%	0%	0%	100%
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	RS 27.690,96
			%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	RS 88.718,80
			%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
				136.691,10	136.691,10	136.691,10	0,00	0,00	0,00	RS 1.366.911,00
			%	10,00%	10,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
				16.441,03	16.441,03	16.441,03	18.267,82	0,00	0,00	RS 182.678,16
			%	9,00%	9,00%	9,00%	10,00%	0,00%	0,00%	100%
				0,00	0,00	0,00	3.912,50	3.912,50	0,00	RS 7.825,00
			%	0%	0%	0%	50%	50%	0%	100,00%
				RS 153.132,13	RS 153.132,13	RS 153.132,13	RS 30.085,74	RS 3.912,50	RS 0,00	RS 1.726.526,77
			%	8,87%	8,87%	8,87%	1,74%	0,23%	0,00%	
				RS 1.386.264,26	RS 1.539.396,39	RS 1.692.528,53	RS 1.722.614,27	RS 1.726.526,77	RS 1.726.526,77	RS 1.726.526,77
			%	80,29%	89,16%	98,03%	99,77%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabela 20 – Cronograma Físico-Financeiro para escavação com couraça.

Fonte: Autora, 2018.

A obra tem uma extensão de 50 m para ambas as situações. Na escavação manual a área da seção transversal é de 12,11 m<sup>2</sup> totalizando um volume de 605,50

m<sup>3</sup>. Considerou-se que o avanço diário da escavação pode chegar a montagem de dois anéis por dia totalizando um volume de 11,14 m<sup>3</sup>/dia, tendo esta etapa finalizada em 10 semanas. Entretanto, levando em conta a pré e pós escavação, o cronograma apresentado define um total de 15 semanas para o método convencional.

Por outro lado, ao analisar a obra executada com o equipamento desenvolvido, o volume de escavação é de 685,50 m<sup>3</sup>, pois agora a seção transversal apresenta uma área de 13,71 m<sup>2</sup>. Entretanto, por se tratar de uma escavação que utiliza um suporte durante toda a execução, oferecendo maior segurança, e com a possibilidade de usufruir de uma escavação mecanizada, o avanço torna-se ligeiramente maior podendo chegar a um volume diário de 18,92 m<sup>3</sup>/dia o que representa a montagem de três anéis de revestimento. Portanto, para a escavação com couraça o cronograma apresentado define um total de 13 semanas para a finalização completa da obra.

É importante chamar a atenção de que o cronograma foi vislumbrado para uma situação ideal, ou seja, a escavação deve ocorrer de forma que não haverá interrupções durante o procedimento.

## 1.6 Resumo das análises do estudo de caso

O presente capítulo apresentou o estudo de caso referente à travessia sob a rodovia BR101 pertencente ao projeto de macrodrenagem do município de Biguaçu/SC. Foi exposta toda a contextualização sobre o tema com o objetivo de analisar o melhor método para o caso em questão.

Dentre os métodos de escavação aqui estudados, destaca-se a escavação manual como sendo o mais viável. A tecnologia HDD não atende ao diâmetro solicitado e o método *pipe jacking* não é economicamente justificável para a aplicação.

Foram realizadas as análises de recalque, custos e cronograma, comparando a escavação manual com o equipamento conceitual desenvolvido.

Ao investigar os níveis de recalque para as duas situações, verificou-se que houve uma redução de 85% a favor do método desenvolvido. Enquanto que na escavação manual os recalques atingiram um valor máximo de 0,03 m a escavação semimecanizada apresentou um valor máximo de 0,0045 m.

Com relação aos custos, a escavação manual apresenta os custos diretos e indiretos cerca de 30% menores quando comparado com a escavação semimecanizada. Nota-se pela Figura 63 as diferenças de custos.

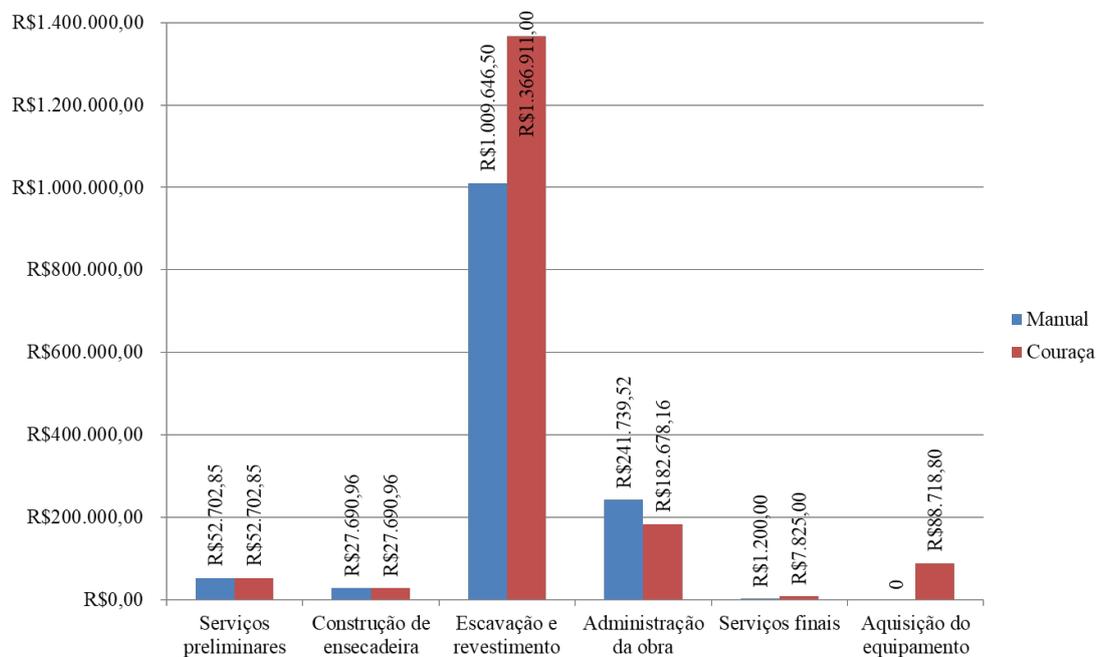


Figura 63 – Diferença entre os custos.

Fonte: Autora, 2018.

Dentre os serviços considerados para o levantamento de custos tem-se os serviços preliminares, construção de ensecadeira, escavação e revestimento, administração da obra, serviços finais e aquisição de equipamento.

Dentre as fases apresentadas existe uma significativa diferença no serviço de escavação e revestimento em favor da escavação manual, enquanto que os custos de administração da obra apresentaram diferenças a favor da escavação semimecanizada, e os serviços finais uma diferença a favor da escavação manual.

O custo com a aquisição do equipamento pertence apenas à escavação semimecanizada e refere-se à aquisição da couraça, placa, cabos, cabos de segurança, cilindros, cliques metálicos para amarração dos cabos, tubulação guia, entre outros dispositivos.

Porém, caso venha a ser considerado os custos sociais, principalmente o fator de segurança envolvido, haverá uma inversão no sentido de que a escavação semimecanizada agora ficará em torno de 10% mais barata que a escavação manual.

Por fim, foi analisado o tempo de execução para os dois casos. Aqui é possível verificar a diferença entre os tempos de execução na

Figura 64.

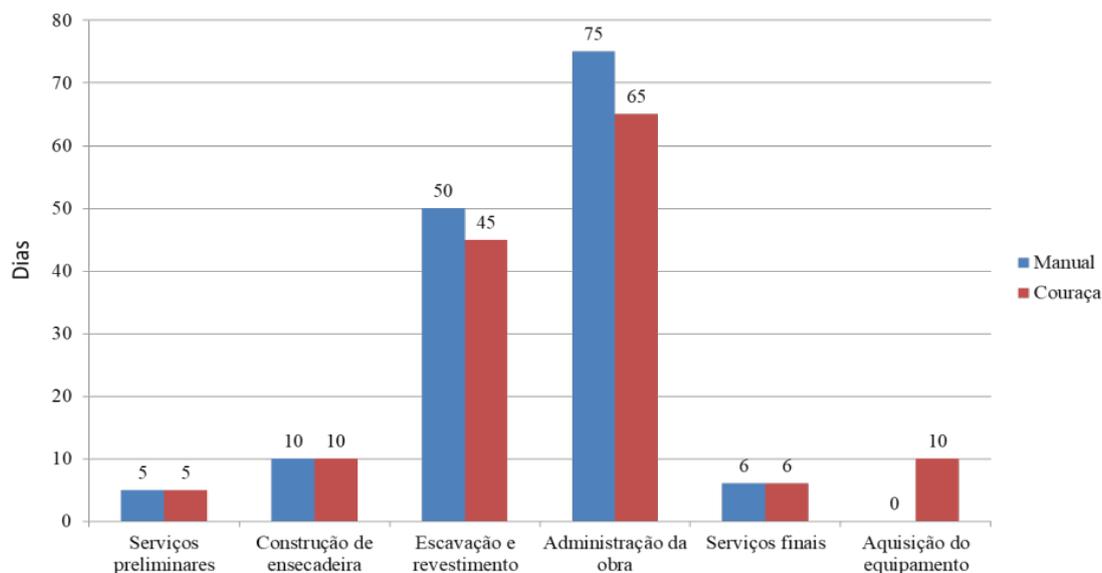


Figura 64 – Diferença entre os tempos de execução.

Fonte: Autora, 2018.

As mesmas etapas que foram estudadas na análise de custo foram levadas em consideração desde os serviços preliminares até a entrega da obra com a limpeza fina e a desmobilização do canteiro de obra.

Como a administração da obra ocorre durante toda a execução, é possível determinar que a escavação manual leva 75 dias para sua finalização enquanto que a escavação semimecanizada leva em torno de 65 dias, ou seja, 15 semanas para a manual e 13 semanas para a semi-mecanizada.

Logo, com relação ao tempo tem-se uma redução de aproximadamente 15% em comparação com a escavação manual.

Lembrando que todas as considerações levaram em conta uma situação ideal na qual o material escavado é homogêneo, de fácil escavação, e que não há interrupções. Do contrário, caso haja alguma dificuldade técnica todos os valores podem sofrer alterações.

O método desenvolvido mostrou-se bastante competitivo. Dentre suas vantagens podem ser citadas: baixos níveis de recalque em baixas coberturas podendo, caso permitido, dispensar tratamentos de solo; utilização de revestimentos montados manualmente; simplicidade no manuseio; fácil manutenção; aproveitável em diversas obras; e fácil treinamento do pessoal envolvido. Por outro lado, como desvantagem do equipamento tem-se que o mesmo é apenas operado em trechos curtos e retilíneos e com diâmetros acima de 2m.

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 1.1 Considerações

O desenvolvimento de projeto nos levou a uma concepção de um equipamento para escavação em solo em trechos retos e curtos. Além disso, o estudo proporcionou um grau de mecanização da escavação manual com a adição de um sistema inovador de tracionamento de cabos que movimentam o equipamento sem exigir esforços do revestimento.

A concepção mais adequada é formada por um equipamento que será composto por uma couraça e uma placa metálica unidas por cabos de aço que será responsável pela movimentação da couraça até encontrar a placa metálica. Este dispositivo é inovador e promove a utilização de revestimentos menos robustos e de fácil manuseio.

Além de todo o desenvolvimento conceitual do equipamento, análises de recalque, custos diretos e indiretos e cronograma foram apresentados.

Sobre os recalques identificou-se que a escavação semimecanizada apresentou níveis de deslocamentos significativamente menores quando comparado com a escavação manual nas mesmas condições. Houve uma redução de aproximadamente 85% nos níveis de deslocamentos da escavação semimecanizada quando comparado com a escavação manual. Portanto, o conceito desenvolvido apresenta maior segurança em escavações mesmo com baixas coberturas.

Sobre tempo de execução a escavação semimecanizada também apresentou um cronograma ao seu favor com uma redução em aproximadamente 15% no tempo considerando as mesmas condições.

Por fim, sobre os custos, apesar de a escavação semimecanizada apresentar um aumento de 30% em comparação com a escavação manual, ele ainda torna-se competitivo quando analisado em conjunto com a segurança. Ao analisar os custos sociais, principalmente no que diz respeito ao quesito segurança, a escavação semimecanizada torna-se 10% mais barata que a escavação manual e, portanto, todas as análises apontam o novo método como sendo muito competitivo.

Em suma, o desenvolvimento do conceito apresentou um equipamento, semimecanizado, para escavações em solo, com trechos retos e curtos, seguro, custos e tempo de execução competitivos, atuação em baixas coberturas, com grande importância no sentido de atender as demandas de infraestruturas da sociedade brasileira.

## 1.2 Recomendações para trabalhos futuros

Para a continuidade da tese recomenda-se finalizar o método PRODIP nas demais fases, ou seja, concluir o projeto preliminar e o detalhado. A partir de então o equipamento poderá ser prototipado e testado.

Adicionalmente, na fase preliminar deve-se calcular as forças de cravação da couraça no solo para determinação dos cabos e cilindros que serão utilizados.

Deve-se também estudar a possibilidade de acoplamento de um sistema mecanizado para a escavação.

Além disso, deve-se verificar a viabilidade de adotar um sistema de fluido que atuará na redução do atrito entre couraça e o solo, reduzindo as forças de atrito e os diâmetros dos cabos de aço.

Por fim, recomenda-se estudar a possibilidade de extrusão de concreto para que o revestimento seja realizado automaticamente à medida que a couraça avance.

- ABDOLLAHIPOUR, S. **Performance Assessment of on-grade Horizontal Directional Drilling**. Journal of Construction Engineering and Management , V. 138 pag 458-468. 2012.
- AKAO, Y. **Quality Function Deployment: Integrating Customer requirements into Products design**. Cambridge Productivity Press, 1990.
- ALMEIDA, M. HDD - **Boas Práticas de Lições Aprendidas em Obras da Petrobras**. 30th International NO-DIG . São Paulo, 2012.
- ASOKA, G. W. N. **Effects of Population Growth on Urban Infrastructure and Services: A Case of Eastleigh Neighborhood Nairobi, Kenya**. Journal of Anthropology & Archaeology. June 2013 pp. 41-56
- BACK, N. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. Ed. Manole, Barueri, 2008.
- BAIK, H.-S. **A Decision Support System for Horizontal Directional Drilling**. Tunneling and Underground Space Technology. V. 18, pg 99-109, 2003.
- BEAUCOUR, A. P. **Experimental and Analytical Study of Friction Forces During Microtunneling Operations**. Tunnelling and Underground Space Technology. V. 17, pg. 83-97, 2002.
- BERGESON, W. **Review of Long Drive Microtunneling Technology for use on Large Scale Projects**. Tunnelling and Underground Space Technology. V. 39, pg. 66-72, 2014.
- BRASFIX. **Brasfix Fundações**. Disponível em: Brasfix Perfuração Direcional de Grandes Diâmetros. <http://www.brasfixfundacoes.com.br/furodirecional>. Acessado em 13 de Outubro de 2015.
- BROERE, W. **Urban Underground Space: Solving The Problems Of Today's Cities**. Tunnelling and Underground Space Technology V. 55, pg. 245-248, 2015.
- CELIK, T. **Social Cost in Construction Projects**. Environmental Impact Assessment Review, V.64, pg. 77-86, 2017.
- CHAPMAN, D. **Introduction to Tunnel Construction**. Applies Geotechnics V. 3. Spon press, 2010.
- CHENG, M. **Developing a Risk Assessment Method for Complex Pipe Jacking Construction Projects**. Journal Automation in Construction. V. 58, pg. 48-59, 2015.
- COWELL, D. A. **Evaluation of High-Density Polyethylene Pipe Installed Using Horizontal Directional Drilling**. Journal of Construction Engineering and Management, V. 129, pg 47-55, 2003.
- DEZOTTI, M. C. **Análise da Utilização de Métodos não-Destrutivos como Alternativa para Redução dos Custos Sociais Gerados pela Instalação, Manutenção e Substituição de Infraestruturas Urbanas Subterrâneas**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. . São Paulo, 2008.
- DNITT - **SICRO. Sistema de Custos Referenciais de Obras**. Diposnível em: <http://www.dnit.gov.br/>

custos-e-pagamentos/sicro. Acessado em: 12/04/2018.

EPI'S ONLINE. **Corda de Segurança**. Disponível em: <https://www.episonline.com.br/produto/corda-de-seguranca-poliamida-12mm-rolo-c-200m-nr18-64463>. Acessado em: 12/04/2018.

FARIA P. **Microtunnels and Urban Macrodrainage: Two Case Studies in Brazil**. No Dig, 2013, Berlin. Wasser Berlin Internacional 2013

FARIA, R. **Subsolo Congestionado - Prefeituras Brasileiras não têm Cadastro Unificado das Redes Subterrâneas e Concessionárias se Unem para Minimizar Acidentes em Escavações**. 2008. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/140/artigo285448-1.aspx>. Acessado em 19/11/2015.

FERRAMENTAS GERAIS. **Cabo de Aço**. Disponível em: <https://www.fg.com.br/cabo-de-aco-afp-trancado-6x41-3-4--190mm-ruptura-21600kg---cimaf/p>. Acessado em: 12/04/2018.

FONSECA, A. J. H. **Sistematização do Processo de Obtenção das Especificações de Projeto de Produtos Industriais e sua Implementação Computacional**. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GILCHRIST, A. **Quantification of Social Costs Associated With Construction Projects: State-of-the-Art Review**. Tunnelling and Underground Space Technology V. 20, pg. 89–104, 2005.

GODARD, J. P. **Why go Underground? Contribution of the Use of Underground Space to Sustainable Development**. ITA, AITES, 2002.

GODARD, J. P. **Urban Underground Space and Benefits of Going Underground**. World Tunnel Congress 2004 and 30th ITA General Assembly - Singapore, 22-27 May 2004.

GOEL, R., K. **Underground Infrastructures: Planning, Design, and Construction**. Elsevier Science, 2012.

GOMES, A. **Challenging Underground Space: Bigger, Better, More**. 16<sup>th</sup> Australasian Tunnelling Conference. ITA-AITES, 2017.

HERRENKNECHT. **Herrenknecht Pipejacking Microtunnelling Animation**. Disponível em Youtube: <<https://www.youtube.com/watch?v=z1y5PIETr3Y>>. Acessado em 23 de novembro de 2015.

HUNT, D. **Sustainable Utility Placement via Multi-Utility Tunnels**. Tunnelling and Underground Space Technology. V. 39, pg. 15-26, 2014.

LAN, H. **Prediction of Rotational Torque and Design of Reaming Program Using Horizontal Directional Drilling in Rock Strata**. Tunnelling and Underground Space Technology, V. 26, pg 415-421, 2011.

LEGRAND, L. **Promoting the Urban Utilities Tunnel Technique Using a Decision-Making Approach**. Tunnelling and Underground Space Technology. V. 19, pg. 79-83, 2004.

LI, S. et al. **An Overview of Ahead Geological Prospecting in Tunneling**. Tunnelling and Underground Space Technology. V. 63, 2017, pg 69-94.

MARTINS, B. C. F. **Cronograma Físico-Financeiro em Obras de Edificação**. Revista Científica da FEPI, 2015. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web>. Acessado em: 25/03/2018.

MEARS, G. **The HDD Process**. Disponível em Mears Group, Inc: <<http://www.mears.net/horizontal->

directional-drilling/index.php> Acessado em 17 de Novembro de 2015.

MERCADO LIVRE. **Clips Grampo**. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-935221932-clips-grampo-pcabo-de-aco-starfer-3419mm-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-935221932-clips-grampo-pcabo-de-aco-starfer-3419mm-_JM). Acessado em: 12/04/2018.

MERCADO LIVRE. **Cilindro Telescópico**. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-984353376-cilindro-hidraulico-telescopico-04-estagios-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-984353376-cilindro-hidraulico-telescopico-04-estagios-_JM). Acessado em: 12/04/2018.

MIDAS GTS 4.0. **Information Technology**. Seongnam-si, South Korea, Midas. [Computer software].

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Normas Regulamentadoras**. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/index.php/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras>. Acessado em: 21/02/2018.

NAJAFI, M. **Tecnologia não Destrutiva: Planejamento, Equipamentos e Métodos**. Bookman grupo, 2013.

NARESI, L. A. **Tunnel Liner – Execução e Problemas**. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/lanjconsultoria/75-tunnel-liner-execucaoe-problemas-tipicos>> Acessado em: 22/08/2017

NORONHA, M. **Construction of Non-Circular Tunnels with Water Jet Cutting**. International No-Dig 2012 30th International Conference and Exhibition. São Paulo, Brazil 12-14 November 2012

OLIVEIRA, E. L. **Métodos não Destrutivos e Túneis de Multi-Utilidade: Benefícios para a Sustentabilidade das Redes de Infraestrutura Urbana**. International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2011.

PAIVA, A. R. **Escavação de Túneis de Pequenas Dimensões em Áreas Urbanizadas: Tunnel Liner e Pipe Jacking**. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Civil da Universidade Anhembi Morumbi, 2011.

ROCHA, M. D. **Estudo da Estabilidade da Frente de Escavação de Túneis Rasos em Solo**. Dissertação apresentada ao curso de mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

ROYAL, A. **Pull-in Force Predictions for Horizontal Directional Drilling**. Geotechnical Engineering. V. 163, pg. 197-208, 2010.

SANTOS, R. P. dos. **Um Conceito de Tuneladora com Jato de Água e Fio Diamantado como Princípio de Corte de Rochas Brandas**. Tese apresentada ao departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

SENDA, T. **Studies on Surrounding Soil During Construction Using the Deep Pipe Jacking Method in the Deep Strata**. Procedia Earth and Planetary Science, V. 6, pg. 396-402, 2013.

SHOU, K. **On the Frictional Property of Lubricants and its Impact on Jacking Force and Oil-Pipe Interaction of Pipe-Jacking**. Tunnelling and Underground Space Technology, V. 25, pg. 469-477, 2010.

SILVA, E. L., MENEZES, E. M.. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível: [http://tccbiblio.paginas.ufsc.br/files/2010/09/024\\_Metodologia\\_de\\_pesquisa\\_e\\_elaboracao\\_de\\_teses\\_e\\_dissertacoes1.pdf](http://tccbiblio.paginas.ufsc.br/files/2010/09/024_Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes1.pdf). Acesso em: 20 Abril de 2018.

SILVEIRA, S. R. **Aplicação da Técnica de Análise Preliminar de Risco (APR) para Avaliação de Risco no Trabalho de Tunnel Liner**. Monografia de especialização em Engenharia de Segurança do

Trabalho - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

SINAPI, 2017. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>> Acessado em: 22/08/2017.

STACO, A. **Armco Staco**. Disponível em Tunnel Liner - TL circular: <http://www.armcostaco.com.br/pt/produto/3> Acessado em 19 de Novembro de 2015.

STERLING, R. L.; GODARD, J. P. **Geoengineering Considerations in the Optimum Use of Underground Space**. ITA-AITES, 2002.

STERLING, R. L. **Advances in Underground Construction Help Provide Quality of Life for Modern Societies**. Engineering, 2017, pg 780–781.

SUN, Y. **Prediction of Lateral Displacement of Soil Behind the Reaction Wall Caused by Pipe Jacking Operation**. Tunnelling and Underground Space Technology, V. 40, pg. 210-217, 2014.

TENDER, M. L. **The Role of Underground Construction for the Mobility, Quality of Life and Economic and Social Sustainability of Urban Regions**. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, 70(3), 265-271, 2017.

TERRATEC. **Products: Microtunnelling**. Disponível em: <[http://terratec.co/product\\_details\\_microtunnelling](http://terratec.co/product_details_microtunnelling)> Acessado em: 22/08/2017

VIEIRA, F. A. **Execução de Túneis em N.A.T.M (New Austrian Tunneling Method) para Obras de Saneamento**. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Civil - Universidade Anhembi Morumbi, 2003.

YEN, J. **Numerical Simulation for the Estimation the Jacking Force of Pipe Jacking**. Tunnelling and Underground Space Technology. V. 49, 2015, pg. 218–229

ZAYED, T. **Data Acquisition and Factors Impacting Productivity of Horizontal Directional Drilling (HDD)**. Tunneling and Underground Space Technology, V. 33, pg 63-72, 2013.

ZHEN, L. **Analysis and Remedial Treatment of a Steel Pipe-Jacking Accident in Complex Underground Environment**. Engineering Structures, V. 59, pg. 210-219, 2014.

# SOBRE OS AUTORES

**LIDIANI CRISTINA PIERRI** Nascida em Florianópolis, dedico minha vida aos estudos. Em 1999 iniciei o curso de Licenciatura em matemática finalizando-o em 2004 na Universidade Federal de Santa Catarina. Logo em seguida, ainda em 2004, comecei o curso de Engenharia de Materiais, na mesma instituição tendo este sido concluído em 2009. Já no ano seguinte dei início ao mestrado na Engenharia Mecânica tendo este sido finalizado em 2012. Em, 2013 o doutorado foi iniciado na área de Engenharia Civil e concluído em 2018. Ainda em 2010 tive o prazer de conhecer meu amigo Rafael Pacheco dos Santos nas primeiras aulas do mestrado, e ele não apenas dividiu as puras emoções durante o desenvolvimento do projeto de dissertação, como também esteve ao lado em festas e momentos de distrações. Além disso, fui indicada por ele a trabalhar na empresa Brabo Engenharia na qual atuo até hoje. Lá conheci outros grandes amigos, o professor Marcos Aurélio Marques Noronha (chefe e amigo), a professora Patricia de Oliveira Faria (chefe e amiga) e o engenheiro Jair José dos Passos Junior (colega de trabalho e amigo). Por fim, tenho apenas a agradecer ao grande trabalho de desenvolvemos juntos e espero seguir em frente com essa equipe que já faz parte da minha vida não somente profissional como também pessoal.

**RAFAEL PACHECO** Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2009), mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2012), especialização em Petróleo e Energia Renováveis pela Universidade Estácio de Sá (2018) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (2017). Atualmente é pesquisador da BraBo Engenharia em Santa Catarina desde 2012. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e Civil, com ênfase em escavação mecanizada e predição de desempenho, atuando principalmente nos seguintes temas: máquinas tuneladoras, sondas de petróleo e escavação com jato d'água de alto teor energético.

**MARCOS AURÉLIO MARQUES NORONHA** Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (1991), mestrado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1994), doutorado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1998) e University of Stuttgart, Alemanha (1995-1996, programa-sanduiche), pós-doutorado pela Technical University of Graz, Áustria (2004), e pós-doutorado pela University of California, Davis (2006). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina, após ter atuado por 11 anos como professor doutor da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia de Túneis, atuando principalmente nos seguintes temas: sondas de perfuração, máquinas tuneladoras, obras subterrâneas, infra-estrutura subterrânea de transportes. O seu principal trabalho de pesquisa atualmente é voltado para novos desenvolvimentos tecnológicos de sondas de perfuração e máquinas tuneladoras de alto desempenho.

**JAIR JOSÉ DOS PASSOS JUNIOR** Possui mestrado em Engenharia de Sistemas de Transportes pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018), com graduação em

Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2016) e Engenharia Civil pelo Centro Universitário Estácio de Santa Catarina (2018). Atualmente cursa o MBA em Infraestrutura de Transportes e Rodovias pelo IPOG-Florianópolis. Tem atuado com Pesquisa e Desenvolvimento na BraBo Engenharia desde 2015, com experiência na área de Engenharia Mecânica e Civil, com ênfase em escavação mecanizada e predição de desempenho, atuando nos seguintes temas: Máquinas Tunneladoras, Escavação com Jato D'água, Obra Subterrâneas e Infraestrutura Subterrânea de Transportes.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-219-7

