

**CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL**

DANIELI CRESCÊNCIO

**PROCESSO CONSTRUTIVO DE FORMAS DE
ESTABILIDADE EM TÚNEIS**

LAGES – SC

2021

DANIELI CRESCÊNCIO

**PROCESSO CONSTRUTIVO DE FORMAS DE ESTABILIDADE EM
TÚNEIS**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Civil do Centro Universitário
Unifacvest como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Aldori Batista dos Anjos.

LAGES – SC
2021

Crescêncio, Danieli

Monografia Processo Construtivo e Forma de Estabilidade em Túneis / Danieli Crescêncio – Lages/SC: Centro Universitário UNIFACVEST, 2021.

Orientador: Aldori Batista dos Anjos

Trabalho de Conclusão de Curso – UNIFACVEST/Curso de Engenharia Civil, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 51

1. Introdução. 2. Metodologia. 3. Breve Histórico dos Túneis 4. Estudo de Escavação 5. Método de Escavação 6. Método de Suporte 7. Infra Estruturas Auxiliares. 8. Conclusões.

Danieli Crescêncio

PROCESSO CONSTRUTIVO E FORMAS DE ESTABILIDADE EM TÚNEIS

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Civil

Lages, 13 de julho de 2021

Prof. Aldori Batista dos Anjos,
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Nicolas Negri,
Avaliador
Centro Universitário UNIFACVEST

Prof. Pierre W. dos Anjos,
Avaliador
Centro Universitário UNIFACVEST

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer a Deus por, ao longo deste processo complicado e desgastante, me ter feito persistir neste caminho, nos momentos mais sombrios em que pensei em desistir.

A esta universidade pelo privilégio de poder ter feito parte, todo o conhecimento adquirido e onde todas as ideias são bem recebidas.

Deixo também um agradecimento especial a todos os meus professores, que nestes anos passaram com toda a dedicação pelas salas de aula e de certa monografia contribuíram para mim chegar nesse momento tão aguardado reta final do curso que não teria sido possível sem a contribuição de todos.

Aos meus pais, Dirlei e Orlando aos quais eu devo a vida e todas as oportunidades que tive e que espero um dia poder lhes retribuir em dobro. E aos meus irmãos, Fernando, Leandro e Denilce pelo apoio.

Agradeço ainda ao meu namorado Emerson que foi amigos, porto seguro que ao longo desta etapa me encorajou a nunca desistir do curso e nem da vida e me apoiou, fazendo com que as fases difícil se amenizasse me dando força.

Serei eternamente grata a todos que nestes últimos anos de alguma forma contribuíram na minha formação profissional e pessoal.

RESUMO

O presente trabalho tem intenção de descrever o processo de construção de túneis subterrâneos, especialmente quanto às técnicas em estabilidade. As características geomecânicas do maciço e das condições de contorno dos túneis método de suporte, escolhidos decorrente aos resultados dos estudos dos fatos geológicos, que leva à correta escolha do traçado adequado às condições do contorno do maciço, decisões à frente da execução. Além dos controles de ambiente (temperatura, gases e ação) perante o trabalho dos profissionais. Com isso, demonstra que não se tem a se seguir no processo único, cada projeto se torna único e exclusivo decorrente das características muito vastas dos maciços, como estas podem auxiliar no projeto e execução de uma obra de túneis estudando caso a caso.

Palavras-chave: Túneis subterrâneos, maciço, estabilidade, construção.

ABSTRACT

The present work demonstrate the construction process of underground tunnels, especially regarding stability techniques. The geomechanical characteristics of the massif and the contour conditions of the tunnels Support method, chosen as a result of the results of the studies of the geological facts, which leads to the correct choice of the adequate route to the conditions of the massif contour, decisions ahead of execution. In addition to environmental controls (temperature, gases and action) before the work of professionals. With this, it demonstrates that there is no need to follow in the single process, each project becomes unique and exclusive due to the very vast characteristics of the massifs, as these can help in the design and execution of a tunnel work, studying case by case.

Keywords: Underground tunnels, massif, stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Túneis paralelos a direção das camadas/ Túneis cortando a direção das camadas.	16
Figura 2 - Túnel perpendicular à direção das camadas/ Túnel paralelo à direção das camadas.	16
Figura 3 - Partes do túnel.	18
Figura 4 - Classificação dos túneis quanto ao método construtivo.	19
Figura 5 - Classificação das máquinas tuneladoras.	20
Figura 6 - Tuneladora para perfuração em maciços rochosos.	21
Figura 7 - Slurry Shield: (1) corte, (2) câmara de escavação, (3) anteparo de pressão, (4) entrada de bentonita, (5) câmara de ar, (6) separador, (7) aduela, (8) instalador de aduelas.	22
Figura 8 - EPS Shield: (1) corte, (2) câmara de escavação, (3) anteparo de pressão, (4) cilindros de pressão, (5) rosca sem-fim, (6) aduela.	23
Figura 9 - Single Shield TBM: (1) couraça, (2) cilindros hidráulicos de propulsão, (3) segmento pré moldado instalado, (4) corte, (5) cavidade para entrada de material escavado, (6) transportador.	23
Figura 10 - Gripper TBM: (1) gripper, (2) instalador de cambotas, (3) perfuradores para ancoragens, (4) instalador de malha de arame.	24
Figura 11 - Segmentos de concreto.	24
Figura 12 - Sistema de escavação/ Aro de impulsão.	26
Figura 13 - Processo de trabalho.	26
Figura 14 - Escava e cobre de baixo para cima.	27
Figura 15 - Escava e cobre de cima para baixo.	30
Figura 16 - Seção transversal típica de túnel em NATM.	32
Figura 17 - Esquema de perfuração para explosivos.	33
Figura 18 - Escavação por galeria frontal/ Escavação por galeria de bancada.	33
Figura 19 - Ciclo do método com explosivos.	34
Figura 20 - Escavação auxílio de galerias.	35
Figura 21 - Ilustração dos elementos de suporte de túneis.	44
Figura 22 - Enfiagem e Cambota.	45
Figura 23 – Túnel em Solo (Cambota. Revestimento de 1º fase. Revestimento de 2º fase. Arco invertido)	45
Figura 24 – Túnel em Rocha (Revestimento de 1º fase. Revestimento de 2º fase. Ancoragem)	46
Figura 25 – Infra Estruturas auxiliares	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPB - Earth Pressure Balance

MPa - Mega Pascal

NATM - New Austrian Tunneling Method

SPT - Standard Penetration Test

TBM - Tunneling Boring Balance

SUMÁRIO

PROCESSO CONSTRUTIVO DE FORMAS DE ESTABILIDADE EM TÚNEIS	27
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Objetivo Geral	27
1.1.2 Objetivos Específicos	27
2 METODOLOGIA	29
3 BREVE HISTÓRICO DOS TÚNEIS	29
4 ESTUDO DE EXECUÇÃO	30
5 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO	33
5.1 MÉTODOS MECANIZADOS	35
5.1.1 TUNELADORA TUNNELING BORING MACHINE (TBM)	35
5.1.2 TUBOS CRAVADOS (PIPE- JACKING)	40
5.2 MÉTODO NÃO MECANIZADO	42
5.2.1 VALA RECOBERTA PELO MÉTODO DIRETO	42
5.2.2 VALA RECOBERTA PELO MÉTODO INVERTIDA	44
5.2.3 ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL POR ESCAVAÇÃO DE SOLO	46
5.2.4 ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL POR DESMONTE DE ROCHA	49
6 MÉTODO DE SUPORTE	51
6.1 CONCRETO PROJETADO	51
6.2 CÂMBOTAS	53
6.3 ENFILAGEM	54
6.4 PREGAGEM A FRENTE	54
6.5 CHUMBAMENTO	55
6.6 ARCO INVERTIDO	55
6.7 TIRANTES	56
7. INFRA ESTRUTURAS AUXILIARES	59
7.1 VENTILAÇÃO	59
7.2 ILUMINAÇÃO	61
7.3 ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO RESISTENTES AO FOGO	61
7.4 SISTEMAS DE SEGURANÇA	64
8 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

O túnel tem a competência de superar os obstáculos naturais ou artificiais, barreiras que podem ser vencidas mediante execução de túneis, como d'águas fluviais e marinhos, e zonas urbanas densamente edificadas. Escolher o meio mais adequado para se atingir o resultado esperado, tarefa decisiva na execução de túneis, na composição e impactos, a técnica adotada afeta diretamente a qualidade do produto que se executa, constrói ou realiza.

No âmbito da construção civil, há mais de um meio para se chegar ao mesmo fim. Existem diversas formas de se implantar uma metodologia construtiva na execução de um túnel. A tomada de decisão, ao buscar pela melhor opção. A escolha do método construtivo de um túnel está muito distante do óbvio, os fatores cruciais para a tomada de decisão são substituídos por estudos e avaliações.

Predominância por um lado de túneis bem-sucedidos e aparentemente muito mais caros do que merecido e, por outro lado, surpresas de graves acidentes, tão caros quanto lamentáveis. O traçado deve considerar a seção transversal e o comprimento do túnel, condições geotécnicas, hidrogeológicas e ambientais. O processo decisório de escolha do método construtivo de túneis. Embora muito progresso seja notado nos aspectos de projeto dos túneis e no tratamento das incertezas geológicas e construtivas que afetam custos e prazos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

A presente monografia tem como finalidade fornecer diretrizes para escolha do método construtivo de túneis.

As instalações foram concebidas de forma a permitir o desempenho, com eficiência e em boas condições de segurança, dos fins a que se destinam.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar o tipo de terreno e do seu comportamento à escavação.
- Caracterizar os aspectos do maciço.
- Demonstrar métodos de escavação mecanizada e não mecanizada de solos moles e solos duros.
- Apresentar equipamentos e instalações como ventilação, iluminação, instalações elétricas, equipamento de emergência.

2. METODOLOGIA

O tema em questão foi pesquisado por meio de livros, teses de mestrado, artigos, manuais técnicos de empresas. O trabalho teórico, onde se apresenta os principais conceitos referentes ao tema, com ponto de vista técnico mais aprofundado, tendo como objetivo principal contextualizar e esclarecer a metodologia de escavação de túneis e suas frentes de estudos. Em seguida, apresenta-se o procedimento de escavação dos túneis com o intuito de descrever a aplicação prática da metodologia apresentada. O texto foi desenvolvido com supervisão de um orientador acadêmico, com pesquisas bibliográficas sobre escavações em maciços.

3. BREVE HISTÓRICO DOS TÚNEIS

Ao longo da história dos túneis, muitas das obras foram realizadas de forma empírica, através da experiência de construtores e, mais tarde, com engenheiros. Os conhecimentos baseavam-se em obras subterrâneas anteriormente construídas (FRANÇA, 2006).

Desde a Pré-História podemos acompanhar a evolução das experiências geotécnicas dos seres humanos. O Homo Faber, por exemplo, possuía entendimento em relação à dureza e planos de fissuras de diferentes tipos de rochas. Temos também indícios de que 200 mil anos atrás o homem já desfrutava da estabilidade de cavernas como abrigo (MOREIRA, 2006).

O túnel sob o rio Eufrates foi construído a céu aberto com o desvio do rio, há 4.000 anos, na Babilônia, e tem seções de 3,6 a 4,5 m e comprimento de 1 km. Túneis dos aquedutos romanos foram construídos há 1.800 anos, reconstruídos em 1925 e ainda hoje em dia em uso. Monte Cenís, entre França e Itália, iniciou-se a construção em 1857 com sua conclusão em 1871, com a introdução de perfurações nas rochas e utilização de explosivos. Escavação de 610.000 m³ de material e comprimento de 12,8 km. Londres em 1869 usou um shield cilíndrico (couraça). O

desenvolvimento desse processo ocorreu durante a construção dos metrô de Moscou, Londres e Leningrado (CHIOSSI, 2013).

A engenharia de túneis no Brasil começou a se expandir na segunda metade do século XIX, algumas décadas após a independência. O primeiro túnel ferroviário no Brasil foi construído em 1860, porém a obra de engenharia mais importante no período foi a construção de quinze túneis da ferrovia Dom Pedro II, atravessando a Serra do Mar, no Rio de Janeiro. A partir do começo do século XX, a maioria dos projetos começou a ser conduzida por engenheiros brasileiros, que antes eram exclusivamente profissionais vindos de fora do Brasil (CELESTINO & ROCHA, 2011).

4. ESTUDO DE EXECUÇÃO

A ideia de túnel não se limita apenas às estruturas subterrâneas construídas sem atingir a superfície, bem como as escavações feitas a partir da superfície e posteriormente reaterradas também são consideradas túneis (CHIOSSI, 2013).

“O objetivo dos túneis é permitir uma passagem direta através de certos obstáculos, que podem ser elevações, rios, canais, áreas densamente povoadas, etc. (PEREIRA, 2012)”.

Desde que se constata a necessidade de executar uma determinada obra subterrânea (túnel) até a sua construção, é amplo e árduo, devendo seguir um desenvolvimento coerente das distintas etapas, desde a fase inicial de estudos, passando pelas etapas intermediárias até sua conclusão, a realização de estudos indispensáveis como de geotécnicos, e ambientais e elaboração do anteprojeto, até a etapa final da elaboração do projeto de construção (JIMENO, 2005).

Deverão ser obtidos dados topográficos, de geologia e fisiografia da região. Posteriormente deve ser elaborado um mapeamento geológico de campo, que servirá de base para a definição de um futuro acompanhamento de investigações (GERALDI, 2011).

A escolha do traçado básico de uma obra subterrânea é administrada primeiramente pelos dados obtidos dos estudos geológicos e hidrológicos peculiares

de cada área. A tendência para a predisposição de um alinhamento de túnel é mantê-lo o mais aprumado possível, reto, não só por seu trajeto menor, como gastos inferiores e melhor visibilidade, mas pela simplificação da construção e da sua locação topográfica (CHIOSSI, 2013).

De acordo com o profissional cada projeto, devem ser executadas as sondagens à percussão e rotativas com ensaios de penetração, permeabilidade e perda d'água; abertura de trincheiras, poços e galerias subterrâneas; ensaios geofísicos e sondagens com radar (PEREIRA, 2012).

A investigação geológico-geotécnica realizada na fase de planejamento de uma obra subterrânea é adaptada à complexidade geológica e às características de cada projeto, assim reduzir as incertezas geotécnicas e, portanto, e custos desnecessários, aumentos de tempo durante a construção (JIMENO, 2005).

O número de furos mecânicos realizados aumentará, atingindo o comprimento total perfurado até atingir relações máximas de 1,5 m de furo / 1 m de túnel. E bem documentado que, em caso de incertezas geológicas significativas, a aplicação de programas especiais de pesquisa reduz os custos de construção em um valor entre 5 e 10 vezes o custo das pesquisas adicionais realizadas, minimizando também atrasos no prazo de construção e potencial conflitos e reivindicações (JIMENO & CHIOSSI, op. cit.).

A investigação geológica e geotécnica será aumentada de forma a representar até 3% dos custos de construção. Em casos muito complexos, esse percentual pode ultrapassar (8%). Aperfeiçoamento das técnicas de perfuração. Aumento da perfuração de poços mecânicos direcionados para obter uma melhor compreensão das estruturas geológicas e núcleos de rocha orientados na direção do túnel. Aumento significativo das técnicas geofísicas, bem como de outros métodos não destrutivos, tanto de superfície como de perfuração, com utilização em larga escala das mesmas (JIMENO, 2005).

Conforme MANGOLIM FILHO & OJIMA (1995), os métodos de investigação, dividem-se em métodos indiretos, constituídos por:

Pesquisa bibliográfica (levantamento de dados disponíveis);

Mapeamento geomorfológico: Mapeamento geológico;

Aerofotointerpretação;

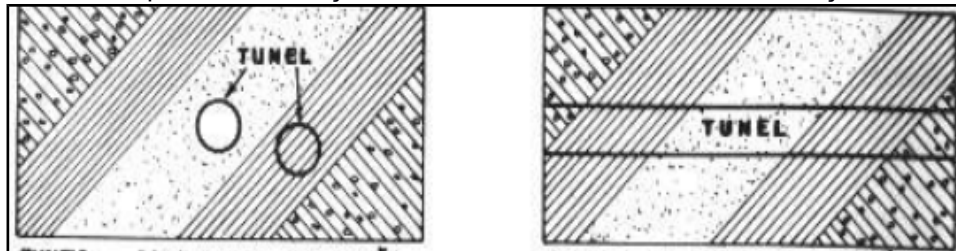
Mapeamento geológico-geotécnico: Sondagens geofísicas.

Os métodos diretos, que permitem acesso ao material investigado, são:

Sondagens mecânicas: Ensaios geotécnicos in situ, Poços e túneis pilotos.

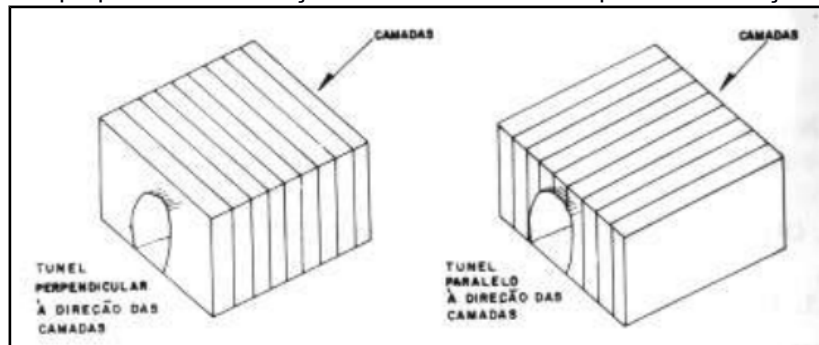
Dentre estes métodos, MANGOLIM FILHO & OJIMA (op. cit.) destacam a importância das sondagens à percussão com ensaios de penetração, tipo SPT (Standard Penetration Test), em áreas com dados disponíveis historiados em obras, tais investigações fornecem informações preliminares adequadas a um projeto de túneis.

Figura 1 - Túneis paralelos a direção das camadas/ Túneis cortando a direção das camadas



Fonte:(CHIOSSI,2013).

Figura 2 - Túnel perpendicular à direção das camadas/ Túnel paralelo à direção das camadas



Fonte:(CHIOSSI, 2013).

A presença de disciplinas da Engenharia Civil tais como: Geotecnia e Estruturas, integridade física e comportamento mecânico do conjunto maciço-túnel. Topografia, alinhamento vertical, alinhamento horizontal e geometria da seção. Pavimentação, recuperação de pavimentos da superfície afetados pela obra. Impermeabilização, limitação ou veto à entrada de água na via permanente e nas áreas de acesso de passageiros. Sistemas de infraestrutura, instalações hidráulicas, via permanente, instalações de combate a incêndio e de recalque. Acústica,

ventilação e iluminação, conforto aos trabalhadores e passageiros e otimização no consumo de energia. Paisagismo e urbanismo, interface com a superfície e recuperação de áreas afetadas pela obra (BRASIL, 1961).

E elevada complexidade na construção de um túnel também recebe a contribuição de restrições tipicamente envolvidas que acabam por limitar sua construção, obrigando buscar novas soluções técnicas inovadoras. Ocupação da superfície sobre o túnel, limita a emissão de vibrações, ruídos e poluição e diminui as possibilidades de manobras de reparo e acesso ao subterrâneo. Desapropriação de imóveis, na interface com a superfície (poços, zonas de emboque e zonas de desemboque) existe a possibilidade de que propriedades privadas interfiram com a obra, obrigando o poder público a desapropriá-las. Interferências, redes de luz, telefonia, saneamento e demais utilidades, posicionadas a não mais do que dois metros de profundidade precisam ser minuciosamente mapeadas e, se necessário, remanejadas, em conformidade com concessionárias e usuários envolvidos. Questões ambientais, escavação de solo contaminado que requeira bota-fora de classe especial, utilização eventual de material tixotrópico para sustentar escavações, emissão de ruído e vibrações, remoção de espécies vegetais. Sítios arqueológicos, uma vez identificados, possuem prerrogativa legal de serem avaliados, mensurados e protegidos (BRASIL, op. cit.).

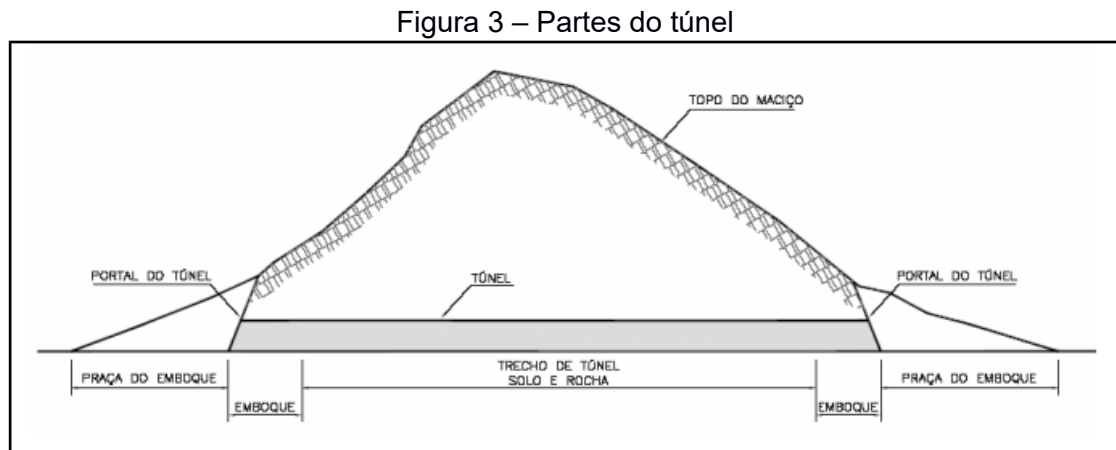
5. MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO

“Os métodos construtivos de túneis dividem-se em dois grupos, mecanizados e os não mecanizados (PEREIRA, 2012)”.

O projeto do túnel divide-se nas seguintes partes:

A área na frente onde se encontra o portal do túnel, onde a conformação do terrapleno passa a ser adaptada e planejada para as necessidades de execução do emboque do túnel é conhecida como praça do emboque. O conjunto dos elementos estruturais e arquitetônicos que compõem a entrada do túnel é conhecido como portal do túnel. O trecho inicial do túnel com extensão, cerca de 3 vezes o seu diâmetro, a partir da seção do portal é chamado de emboque do túnel. O intervalo

em túnel entre final dos emboques é chamado de trecho de túnel. (DER/SP, 2005, p.11)

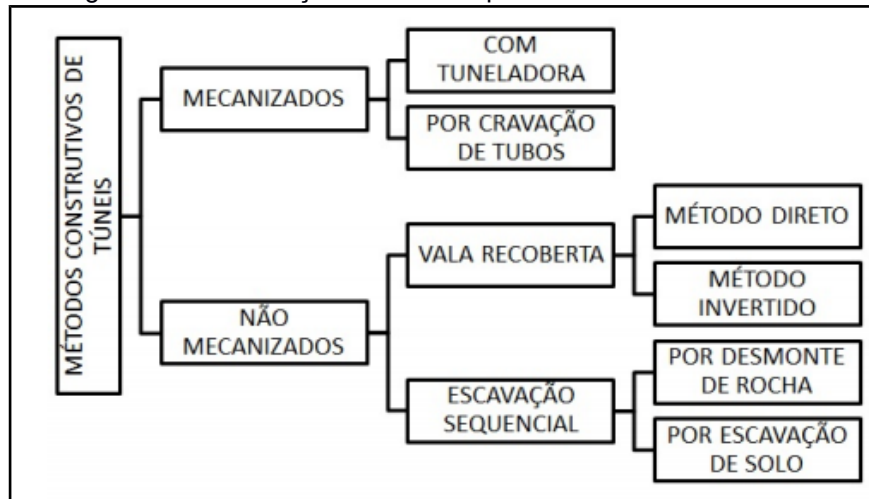


Fonte: DER/SP (2005, p. 11).

Assis (2001) defende a classificação dos métodos construtivos de túneis nas seguintes categorias de Valas Recobertas, Escavações Sequenciais, Escavação Mecanizada, Escavação Não Mecanizada. Outros estudiosos, porém, adotam classificação mais simples, tal como Sauer e Mergelsberg (2004), que dividem as metodologias em Túneis Mecanizados e Túneis Mineiros. A partir de outro ponto de vista, Moreira (2006) opta por classificar as tecnologias construtivas em função do momento de instalação do suporte: túneis com suporte retardado ou túneis com suporte imediato. No presente estudo será adotada uma classificação mista baseada tanto em Sauer e Mergelsberg (2004) quanto em Assis (2001), porém diferente de ambas. Nesta proposta de classificação os métodos construtivos de túneis são inicialmente agrupados em função do grau de mecanização do processo de escavação, dando origem à categoria “Túneis Mecanizados” e à categoria “Túneis Não Mecanizados”. Em cada categoria, uma subclassificação será adotada, de forma a contemplar os processos construtivos vigentes, à exceção dos túneis submersos, que contam com métodos e técnicas únicas para sua condição, dispensando esforços para a tomada de decisão. Dentre aqueles cuja escavação se dá com alto índice de mecanização, há túneis executados com máquina tuneladora e há túneis executados através da cravação de tubos. Com relação aos Túneis Não Mecanizados, há aqueles feitos através de recobrimento de vala, de forma direta ou

invertida, e aqueles feitos através de escavação sequencial, com desmonte por explosivo ou simples escavação.

Figura 4 - Classificação dos túneis quanto ao método construtivo



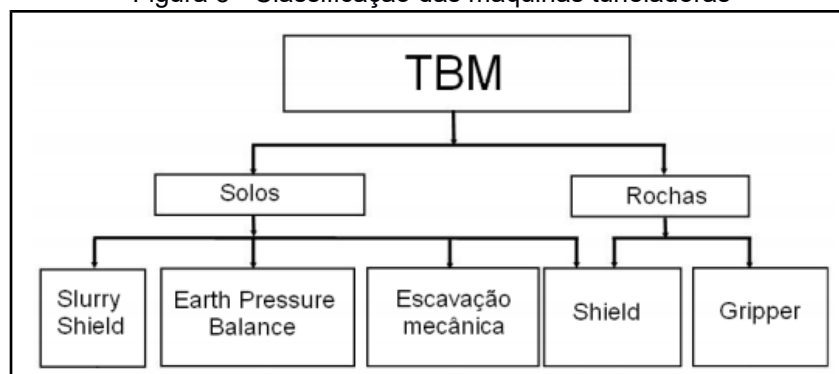
Fonte: TRAVAGIN (2012)

5.1. MÉTODOS MECANIZADOS

5.1.1 TUNELADORA TUNNELING BORING MACHINE (TBM)

A escavação mecanizada com tuneladoras TBM (Tunneling Boring Machine), popularmente chamada de “Tatuzão” no Brasil. Máquina metálica de grande porte com seção transversal igual a seção do túnel a ser escavado, onde a face do túnel é escavada de forma plena, e seção geométrica circular. Utilizadas para maciços de alta e média resistência e com boas condições de estabilidade (ASSIS, 2001)

Figura 5 - Classificação das máquinas tuneladoras



Fonte: NACIONAL...,2009 (adaptado e traduzido)

Consiste na escavação de túneis em seção plena da face do túnel em seção de geometria circular. Equipamento complexo composto de um corpo principal e outros elementos de apoio, constituído por mecanismos de corte, impulso, direção, de proteção, de perfuração exploratória, de controle e suporte do maciço, de instalação do revestimento, de remoção de escombros, de ventilação e de abastecimento energético (CHIOSSI, 2013).

As tuneladoras têm dominado predominantemente o presente estado da tecnologia de túneis rasos escavados em solos e em meios urbanos (ASSIS, 2001).

Existem diversos tipos de máquinas tuneladoras, algumas delas possuindo couraças, também nomeados escudos ou shields, para auxiliar a escavação em rochas brandas, solos saturados ou outras condições que requeiram colocação imediata de estrutura de suporte. Os tipos de tuneladoras e sua classificação são em função do solo a ser escavado (BASTOS, 1998).

Figura 6 - Tuneladora para perfuração em maciço rochosos



Fonte: ASSIS (2005).

Na ocorrência de situações em solo que demandam confinamento para estabilizar o maciço escavado, Moreira (2006) observa que ar comprimido, lama bentonítica ou contrapressão de terra podem ser utilizados para este fim. A estabilização feita com lama bentonítica ou outro líquido tixotrópico é feita em tuneladoras conhecidas como Slurry Shields, nas quais o líquido se mistura com o

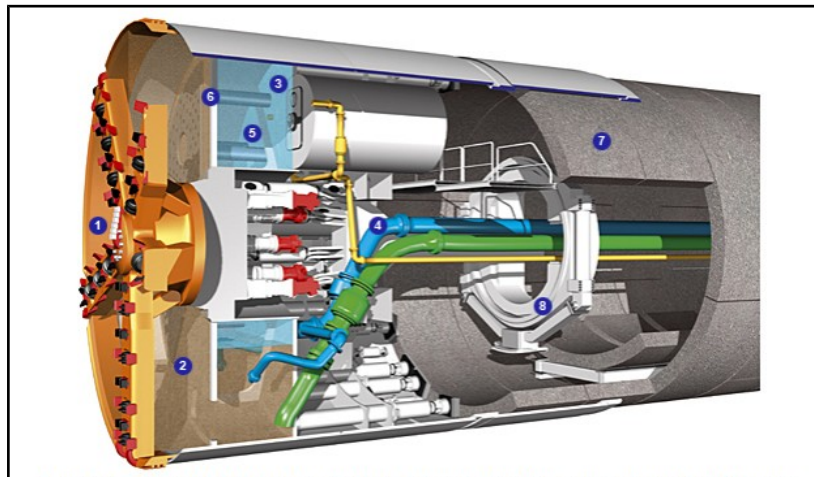
material escavado em uma câmara frontal da tuneladora e, através de um circuito, é conduzida para o exterior da escavação, procedendo-se à separação por decantação. A estabilização feita por contrapressão de terra, técnica internacionalmente conhecida por EPB (Earth Pressure Balance), ocorre com a utilização do próprio material escavado, o qual é colocado sob pressão em uma câmara situada logo após a ferramenta de corte.

Moreira (2006, op. cit) complementa com a observação de que uma válvula associada a uma rosca sem-fim que conduz o material escavado para fora da câmara é o conjunto responsável pela manutenção da pressão necessária. Quando o solo escavado não demanda medidas de estabilização, as máquinas tuneladoras adotadas podem ser de escavação mecânica simples, aberta ou fechada, com ou sem utilização de ar comprimido. Nestes casos, as máquinas são simplificações das já citadas Slurry Shields e EPB. Sendo a escavação realizada em rocha, as tecnologias usuais são as tuneladoras fechadas, com Shield, ou tuneladoras abertas, com Grippers. As tuneladoras fechadas para rochas têm seu funcionamento baseado no corte do maciço em seção plena, condução do material escavado através de transportadores, propulsão por sistema hidráulico e instalação dos segmentos e anéis de suporte. As máquinas abertas não possuem carapaça cilíndrica e seu sistema de propulsão baseia-se na ancoragem provisória de elementos laterais (os Grippers) que agarram-se às paredes da cavidade já escavada. De forma geral, a construção de túneis com tuneladoras caracteriza-se pela escavação plena da face do túnel em sessão de geometria circular, seguida pela execução do revestimento do túnel. Normalmente, o revestimento é feito com segmentos pré-moldados de concreto justapostos, podendo ainda ser executado em concreto projetado quando a TBM for aberta, com ocorre na utilização dos Grippers. Também caracterizam a construção com TBMs a diversidade de solos em que pode ser empregado e a diversidade de diâmetros de túnel que podem ser atendidos. Isto não significa, todavia, que uma mesma máquina tuneladora é aplicável a qualquer solo ou qualquer diâmetro.

Afirmam Jimeno & Mendez (1997) que as máquinas tuneladoras permitem escavar até mesmo rochas com resistência à compressão entre 300 a 350 MPa,

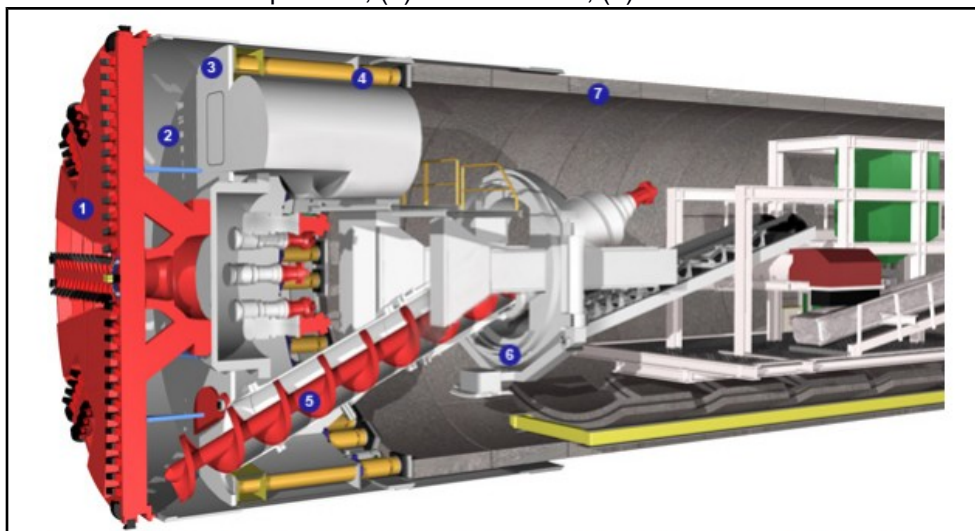
apesar de serem observados melhores resultados em rochas de dureza média a baixa.

Figura 7 - Slurry Shield: (1) corte, (2) câmara de escavação, (3) anteparo de pressão, (4) entrada de bentonita, (5) câmara de ar, (6) separador, (7) aduela, (8) instalador de aduelas



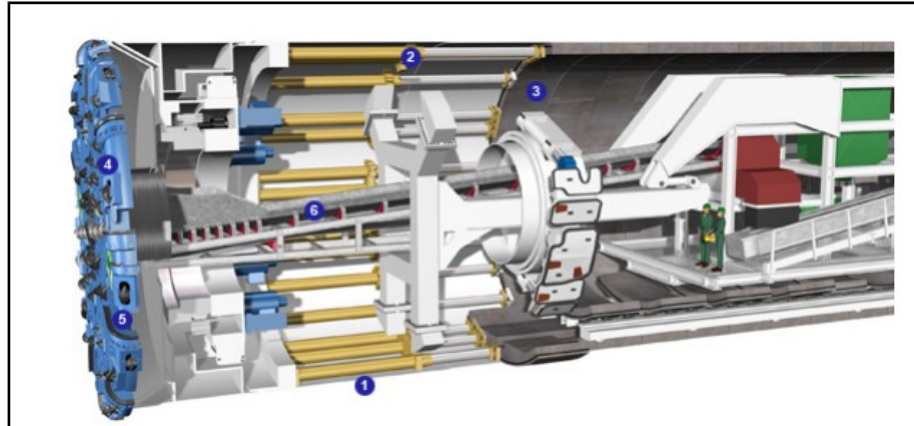
Fonte: HERRENKNECHT, (2011)

Figura 8 - EPS Shield: (1) corte, (2) câmara de escavação, (3) anteparo de pressão, (4) cilindros de pressão, (5) rosca sem-fim, (6) aduela



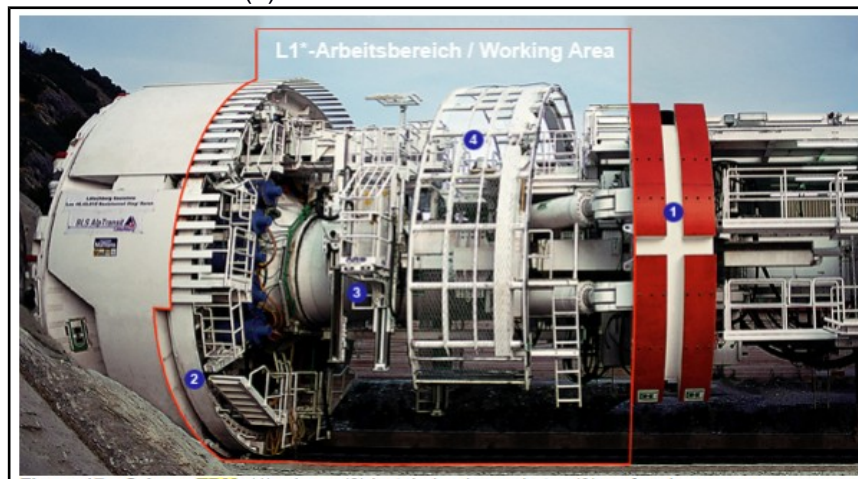
Fonte: HERRENKNECHT, (2011)

Figura 9 - Single Shield TBM: (1) couraça, (2) cilindros hidráulicos de propulsão, (3) segmento pré moldado instalado, (4) corte, (5) cavidade para entrada de material escavado, (6) transportador



Fonte: HERRENKNECHT, (2011)

Figura 10 - Gripper TBM: (1) gripper, (2) instalador de cambotas, (3) perfuradores para ancoragens, (4) instalador de malha de arame



Fonte: HERRENKNECHT, (2011)

Figura 11 - Segmentos de concreto



Fonte: NACIONAL..., (2009)

5.1.2 TUBOS CRAVADOS (PIPE- JACKING)

Pipe Jacking é uma técnica de execução de obras subterrâneas onde todo o túnel se movimenta em sincronia com o avanço da escavação. O termo "pipe jacking", tubos cravados por cilindros hidráulicos, nos tubos que compõem a estrutura do túnel (NACIONAL..., 2009).

Dezotti (2008) e Abraham, Baik e Gokhale (2007), classificam como Pipe-Jacking apenas aqueles métodos de construção por cravação em que é necessária a presença de trabalhadores na frente de escavação. Aqueles que assim preferem acabam por entender a técnica de Microtunneling, sem a presença humana na frente de escavação, à parte.

A escavação é realizada por uma cabeça de corte ou shield, o material escavado é removido por dentro do túnel, mecânica ou hidráulicamente. No poço de serviço de cravação é instalado o conjunto de macacos, responsável pelo deslocamento e avanço do túnel, neste poço também é instalado um equipamento de alinhamento a laser responsável pelo controle direcional do túnel. Toda operação é controlada a partir de um container computadorizado, instalado na superfície, ao lado do poço de serviço (DEZOTTI, 2008).

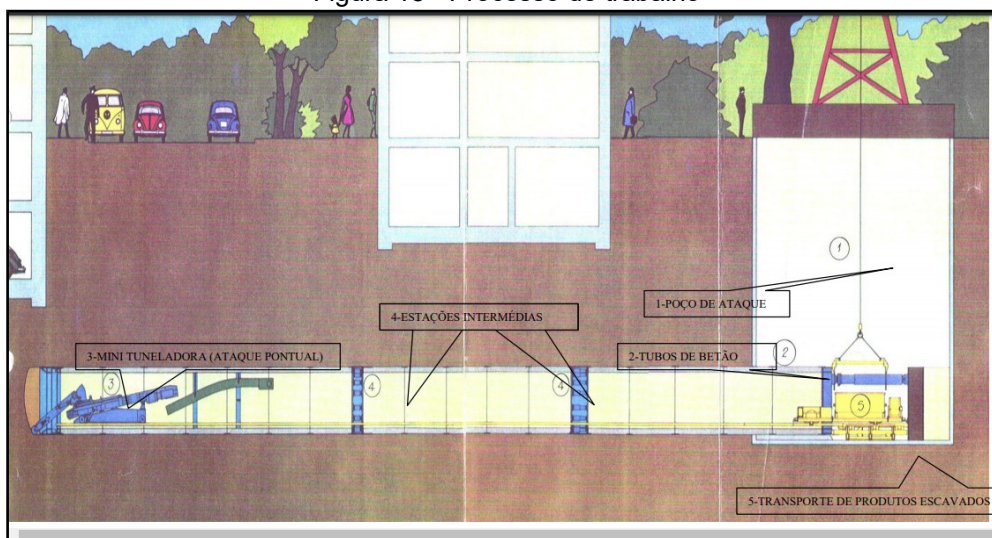
Esse sistema de execução de túneis tem como principal atividade a cravação de segmentos de tubos geralmente de concreto solo, a partir de poços de serviço. Estes tubos ligam-se por uma junta flexível e, normalmente, selada. Precedendo à cravação, há a escavação do solo, que, segundo a Pipe Jacking, pode ocorrer manualmente, remotamente ou com uma pequena tuneladora. Alguns autores e entidades optaram por classificar como Pipe-Jacking apenas aqueles métodos de construção por cravação em que é necessária a presença de trabalhadores na frente de escavação. Aqueles que assim preferem acabam por entender a técnica de Microtunneling- sem a presença humana na frente de escavação. Nesse método, observa-se que ao menos dois poços de serviço são necessários. Depois de construídos os poços, instala-se o cravador no emboque e inicia-se o trabalho com o escavador. Em seguida são cravados os tubos que empurram o escavador até o desemboque. A cravação dos tubos se dá através de macacos hidráulicos instalados e ancorados em um poço de serviço (EURO, 2021).

Figura 12 - Sistema de escavação/ Aro de impulsão



Fonte: Euro (2021)

Figura 13 - Processo de trabalho



Fonte: Euro (2021)

5.2. MÉTODO NÃO MECANIZADO

5.2.1 VALA RECOBERTA PELO MÉTODO DIRETO

Esta técnica, também conhecida como cut-and-cover, consiste na abertura de umas grandes valas de acesso ou trincheiras, a partir da superfície, para implantação da obra subterrânea. No perímetro das trincheiras são implantadas as estruturas de sustentação e contenção, parcial ou total, para propiciar a construção propriamente dita da estrutura da obra de forma convencional (de baixo para cima), a qual posteriormente será coberta para a liberação do espaço de superfície (TRAVAGIN, 2012).

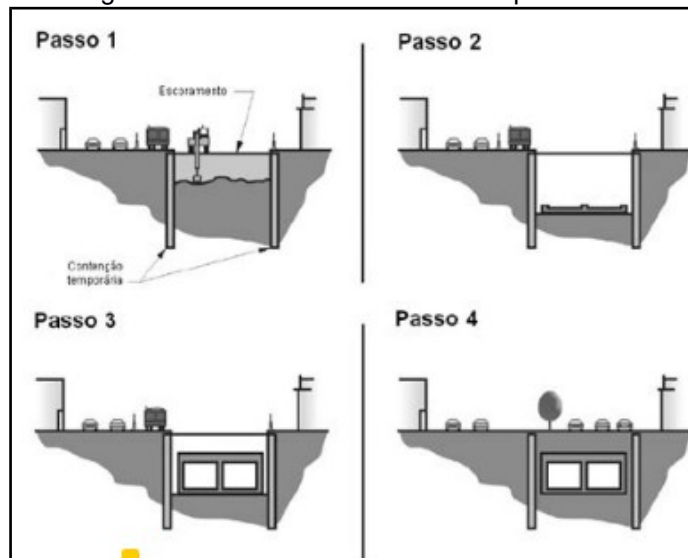
Em linhas gerais, os procedimentos são os seguintes: Construção de paredes laterais de contenção, escoradas ou em talude. Abertura de valas de grandes dimensões Rebaixamento de lençol freático existente à profundidade necessária. Construção das estruturas definitivas, como paredes, lajes e pilares. Reaterro. O problema maior desta metodologia é o transtorno causado à população no caso de ser construído em uma área densamente povoada, onde é impossível construir devido às restrições urbanas. Como o tempo para liberação final da área é muito longo, são intensos os transtornos causados pela interferência que causa no trânsito, seja de pessoas, seja de veículos (NACIONAL...,2009).

Concernente aos custos de construção, esta metodologia geralmente apresenta os valores mais baixos, em que pesem os transtornos à qualidade de vida das populações atingidas, em relação aos demais métodos que não causam as mesmas interferências danosas. Por isso, muitas vezes a adoção da vala recoberta pode causar tantos transtornos e prejuízos indiretos que a avaliação para a sua utilização é negativa (Peixoto & Carvalho 2006).

A execução das trincheiras compreende as metodologias usuais de escavação, sem restrição geológica, e contenção, provisórias ou definitivas. Em sendo as contenções de caráter definitivo, elas próprias desempenham a função de limites laterais do túnel. Como é típico da construção de grandes trincheiras, especialmente em ambientes urbanos, é usual a utilização de elementos estruturais que possibilitem às contenções desempenhar seu papel até o momento do reaterro. Tais elementos consistem de tirantes, pregagens do solo e estroncas (TRAVAGIN, 2012).

Como é típico da construção de grandes trincheiras, especialmente em ambientes urbanos, é usual a utilização de elementos estruturais que possibilitem às contenções desempenhar seu papel até o momento do reaterro. A atividade de rebaixamento do lençol freático, essencial quando o nível da água subterrânea excede o nível do fundo da escavação e a contenção por si só não é suficiente para mitigar os efeitos da presença de água (Da Silva, 2007).

Figura 14 - Escava e cobre de baixo para cima



Fonte:(NACIONAL ..., 2009 (adaptado e traduzido)

O problema se complica nos locais a serem atravessados com presença de água ou pela necessidade de se adotar taludes muito íngremes. Nos locais com permeabilidades moderadas pode-se manter esta alternativa de vala recoberta com o auxílio do rebaixamento do lençol freático do terreno, sempre que não se produzam recalques ou efeitos prejudiciais no entorno. De um modo geral, as soluções mais baratas são as de execução por meio da abertura de trincheiras, com frequente uso de estruturas de contenção do tipo paredes de perfis metálicos e pranchões de madeira, paredes de estacas-pranchas de aço e paredes diafragmas. Ao contrário, as alternativas mais caras são em terrenos permeáveis, com lençol freático alto, onde se requerem cortinas contínuas de grande extensão e eventuais tratamentos do terreno (ORTIZ, 1992).

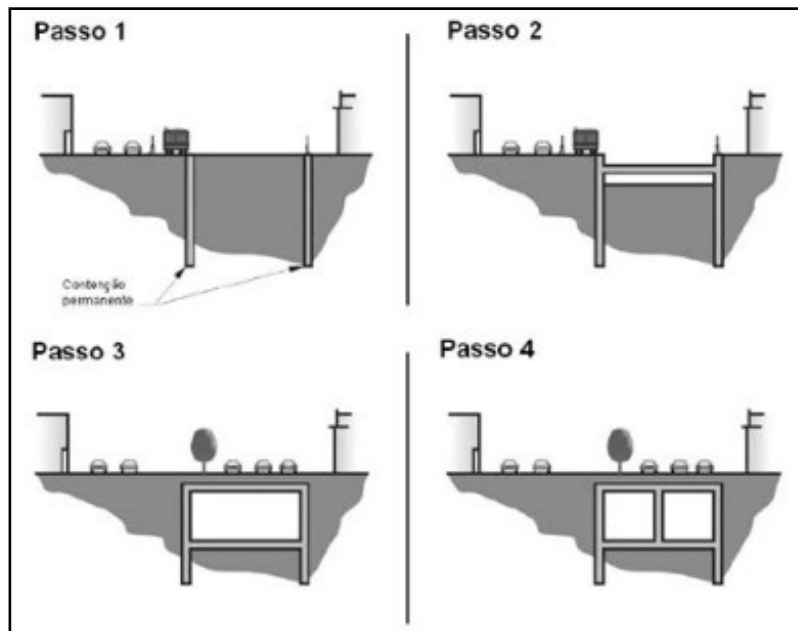
5.2.2 VALA RECOBERTA PELO MÉTODO INVERTIDA

Método Invertido é uma variação da escavação em Vala Recoberta pelo Método Direto. A variação entre as duas metodologias reside na sequência construtiva do túnel e, conseqüentemente, no momento de recobrimento da vala escavada. Este método, também chamado Cut and Cover, recebe a denotação Top-

down. A metodologia de escavação invertida é equivalente à vala recoberta, contudo com a recomposição da superfície em tempo menor do que a primeira. Ela propõe a remoção de uma pequena cobertura de solo e a pré-instalação da laje do futuro teto da escavação, em concreto, apoiada em uma estrutura também previamente construída que pode ser a própria para contenção. Após a construção da laje, executa-se o reaterro com o próprio material escavado e libera-se o espaço de superfície, continuando-se a escavação e construção da obra sob condições seguras sob a laje de teto. Este método apresenta-se mais vantajoso em obras onde a interferência longa na superfície não é possível, já que o tempo de paralisação é menor do que na metodologia de vala recoberta (TRAVAGIN, 2012).

A técnica Top-Down, inicia-se pelas instalações das contenções definitivas, que posteriormente vão ser as paredes do túnel, através de paredes-diafragma, estacas secantes ou estacas justapostas, seguida de rebaixamento do lençol freático (se necessário). Contemplar a escavação até a cota da cobertura do túnel, a construção da cobertura, sua ligação com as contenções e posterior impermeabilização. O reaterro seguido da recuperação e restauração da superfície, escavação do interior do túnel, por baixo da cobertura construída, e construção da estrutura de fundo e ligação dela com as demais estruturas já construídas. Finalmente, complemento das construções internas do túnel (NATIONAL ..., 2009)

Figura 15 - Escava e cobre de cima para baixo



Fonte: (NACIONAL...,2009)

5.2.3 ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL POR ESCAVAÇÃO DE SOLO

O New Austrian Tunneling Method (Novo Método Austríaco de Túneis) NATM é uma maneira eficiente para a construção de túneis. É denominada de escavação sequencial porque, após a escavação do maciço instala-se a estrutura de suporte, geralmente em concreto projetado, e complementa-se, quando necessário, por instalação de tirantes. Estes sistemas de suporte são instalados para garantir certos níveis de deslocamentos admissíveis ou para prevenir a ruptura do maciço (DA SILVA, 2007)

O NATM é dimensionar a estrutura que suporta o maciço, de tal maneira a obter um equilíbrio permanente) destaca o reconhecimento de que o verdadeiro material suporte é o maciço; o revestimento desempenha apenas o papel de uma superfície auxiliar. Isto indica que o NATM busca caminhos adequados para tirar proveito, tanto quanto possível, da capacidade de sustentação do maciço (RABCEWICZ, 1979) (GOLSER (1996).

O NATM foi inicialmente desenvolvido por Rabcewicz e patentado em 1948 (GOLSER, 1996), teve uma evolução significativa na Europa entre o final da década de 50 e a primeira metade da década de 60 (DA SILVA, 2007 op. cit).

O método se baseia em três princípios: permitir a deformação do maciço para redistribuir as tensões, logo o maciço passa a ser o principal elemento estrutural do túnel. Este princípio engloba a redução dos danos ao maciço, utiliza a capacidade de suporte do maciço para mobilizar o efeito arco (permitindo deformação) e previne deformações excessivas impedindo o afrouxamento do maciço (ASSIS, 2001).

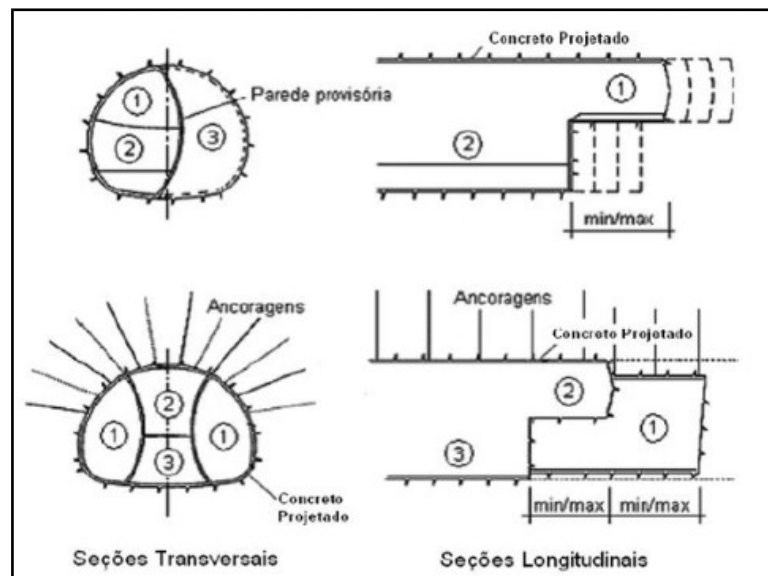
Caso haja risco de ruptura ou deslocamentos que não sejam admissíveis, instala-se um sistema de suporte ótimo, incluindo tipo, procedimento e tempo de instalação, rigidez e carga limite. Neste caso, para ser mobilizado, o anel do suporte deve estar fechado e o sistema de suporte deve estar em contato com o maciço. O tipo mais comum normalmente inclui o concreto projetado devido à sua flexibilidade e porque fornece um contato mais adequado com o maciço do que as cambotas metálicas. Ressalta-se que quando não há um perfeito contato entre o maciço e o suporte, ocorrerá um afrouxamento do terreno com conseqüente acréscimo de tensões sobre o suporte que, frequentemente, entrará em colapso, instalação de um sistema de instrumentação em túneis pilotos para o controle ativo durante a construção, visando permitir eventuais mudanças de projeto ou de procedimentos construtivos para adequação do controle de deslocamento do maciço. Aqui, a instrumentação avaliará o tempo de autossustentação e permitirá selecionar e calibrar o método de escavação, tipo de suporte e tempo de instalação, além de dimensionar a estrutura final do túnel e avaliar a segurança (DA SILVA, 2007).

A concepção do NATM sugere a utilização de um suporte otimizado, que deve possuir uma determinada flexibilidade bem como ser instalado no momento oportuno. Deve-se determinar o tempo ideal de instalação do suporte, uma vez que, caso a mobilização de sua capacidade se dê tardiamente, ultrapassando o tempo de autossustentação do maciço, ocorrerá o colapso. Caso o suporte seja instalado precocemente, o alívio de tensões no maciço será reduzido, se houver a necessidade de uma estrutura mais resistente e conseqüentemente mais robusta. Define-se como tempo de autossustentação do maciço o período entre a abertura da

cavidade e a ruína da mesma, sem que haja ação de qualquer agente externo. A avaliação do tipo de suporte deve considerar o tempo de autossustentação do maciço, a resistência requerida e o tempo de aplicação do suporte, ou seja, o tempo que o mesmo requer para adquirir a resistência prevista (ASSIS, 2002 op. cit).

O procedimento construtivo básico do método é a parcialização da seção de escavação do túnel em diversos esquemas, em que a escavação e o sistema de suporte vão sendo conduzidos de forma sequencial. Este princípio objetiva atender aos critérios de controle de deslocamentos do maciço, medidos por meio da instrumentação (ASSIS, 2001).

Figura 16 - Seção transversal típica de túnel em NATM



Fonte: (NACIONAL...,2009)

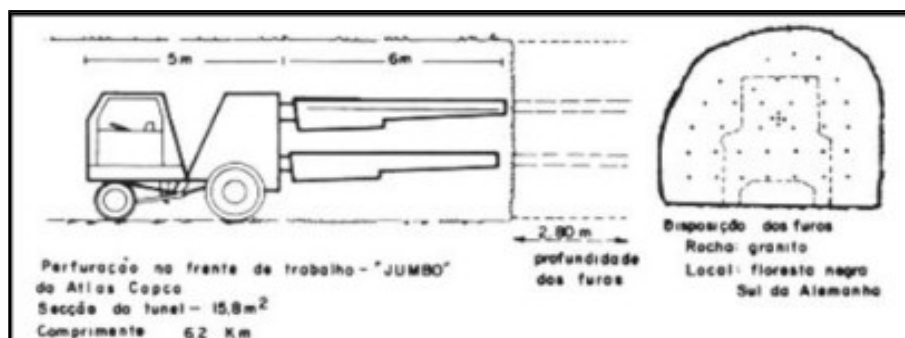
Vale destacar que uma escavação em solo muito rasa, a uma profundidade inferior a duas vezes o diâmetro do túnel, é melindrosa, já que envolve as interferências nas estruturas superficiais que, muitas vezes, não podem sofrer recalques. Para minimizar este efeito, o limite ideal para propiciar uma estabilização é de uma escavação à profundidade mínima equivalente a quatro vezes o diâmetro do túnel, o que encarece muito. No caso de túneis em solos, pode-se aumentar a capacidade de suporte reforçando o maciço, por meio de maior revestimento.

Esquema de construção de um “guarda-chuva” de enfilagens cravadas em solo, na calota do túnel (DA SILVA, 2009).

5.2.4 ESCAVAÇÃO SEQUENCIAL POR DESMONTE DE ROCHA

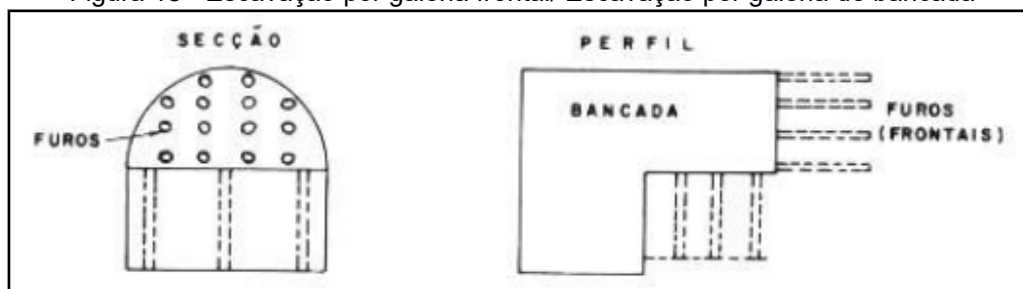
As escavações de túneis em rocha são predominantemente feitas a partir do método tradicional, conhecido também como Drill and Blast (perfuração e detonação). A frente a ser escavada é perfurada com furos horizontais, paralelos e de mesmo comprimento, distribuídos segundo um plano de fogo projetado a partir dos condicionantes geológicos do maciço rochoso. A perfuração é feita através de equipamentos denominados “Jumbos”. Após a detonação, deve ser feita a ventilação do túnel (GERALDI, 2011).

Figura 17 - Esquema de perfuração para explosivos



Fonte:(NACIONAL...,2009).

Figura 18 - Escavação por galeria frontal/ Escavação por galeria de bancada



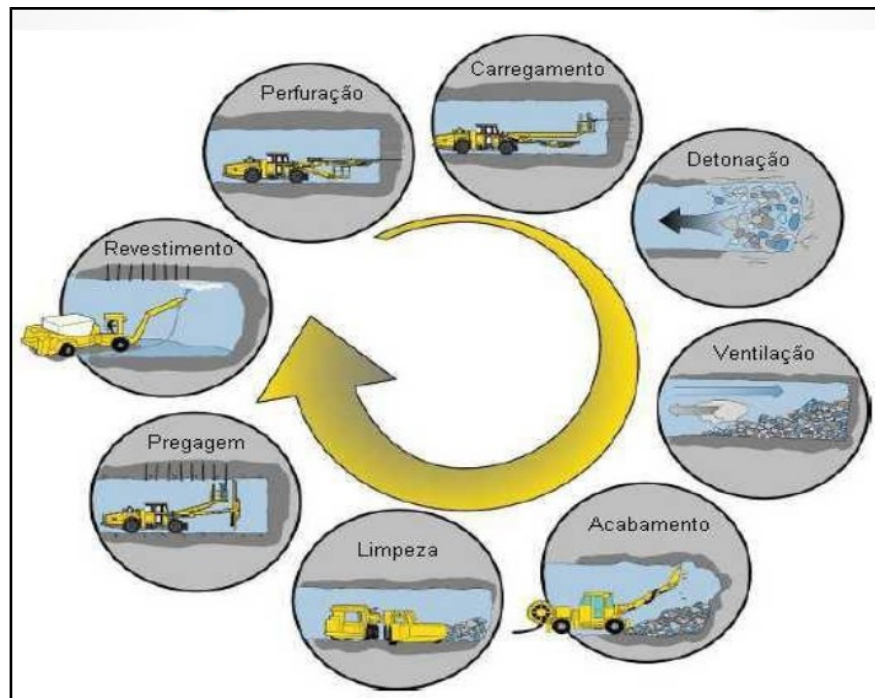
Fonte: (CHIOSSI, 2013)

Os explosivos a base de pólvora foram empregados pela primeira vez em obras civis, no desmonte da face de escavação, em 1679. Com o advento da Revolução Industrial houve uma rápida evolução dos métodos de escavação, em

face da crescente demanda por ferrovias. A introdução do dinamite nas escavações subterrâneas ocorreu em 1864 (MORAES JR., 1999).

De uma maneira geral estas escavações ocorrem de forma lenta, dado aos processos de execução que englobam ciclos de perfurações da rocha conforme planos de fogo. Este método ainda é predominantemente executado a fogo de uma maneira geral estas escavações ocorrem de forma lenta, englobando ciclos (DA SILVA, 2007).

Figura 19 - Ciclo do método com explosivos



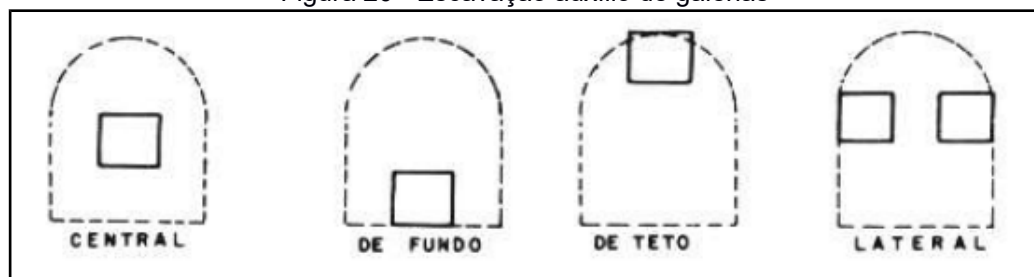
Fonte: PEREZ (2019).

A produção de avanço deste método depende fundamentalmente da velocidade de perfuração e da potência do explosivo. Nos dias atuais ambos têm sofrido avanços significativos, seja na fabricação de perfuratrizes mais eficazes, seja na substituição dos explosivos convencionais (dinamite e similares) por explosivos plásticos (slurry explosives), os quais têm custo ligeiramente superior aos anteriores, mas que compensam na composição do custo final devido ao sistema de carregamento mais eficaz e à redução da emissão de fumaças e poeiras tóxicas, o

que produz economia no sistema de ventilação e melhora das condições ambientais dentro dos túneis. Isso tudo proporciona um menor custo final na medida em que há redução do tempo de ciclo entre detonações (DA SILVA, 2007).

Escavação com galerias em túneis bastante largos, pode ser vantajoso desenvolver um túnel menor, chamado galeria, antes da escavação total da frente. De acordo com sua posição (CHIOSSI, 2013).

Figura 20 - Escavação auxílio de galerias



Fonte: CHIOSSI (2013)

6. MÉTODO DE SUPORTE

6.1. CONCRETO PROJETADO

Concreto projetado é composto por cimento, areia, pedrisco, água e aditivos que é transportado por um mangote desde o equipamento de projeção até um bico, e por meio de ar comprimido é projetado a grande pressão, contra uma superfície. Este processo pode ser feito por via seca ou por via úmida (SILVA, 1997).

Via seca: insere-se no equipamento de projeção os agregados e o cimento, que são bombeados pelo mangote e adiciona-se água e aditivos no bico projetor. O mangoteiro realiza o controle da adição de água. Via úmida: insere-se no equipamento de projeção a mistura de cimento, agregado e água, preparados previamente em uma usina dosadora de concreto. Bombeia-se essa mistura pelo mangote e no bico projetor aplica-se aditivo. Devem ser adotados os requisitos de, alta resistência inicial, deformabilidade inicial. Aplicação em camadas (se a instrumentação detectou uma deformação excessiva é possível que se aplique outra camada sobre a já existente) (SERRANO; MELRO; CUNHA 2013).

O concreto projetado possui algumas características problemáticas, além de ser bastante dependente da experiência e técnica da equipe responsável pela sua execução, porém, com a utilização das adequadas técnicas de aplicação, podem ser minimizadas. Devido ao impacto do concreto projetado contra superfícies duras (armaduras, próprio concreto, etc) parte do material é refletido, não sendo incorporado à superfície que se deseja projetar. Por razões econômicas e de desempenho do revestimento, a reflexão deve ser a menor possível. As superfícies que serão projetadas devem ser limpas, para melhor aderência do revestimento e umedecidas antes da projeção. A superfície é molhada apenas para umedecer, caso o solo esteja muito úmido ou apresentar baixa coesão, deverá ser feito um reforço com tela metálica; Projeção: A projeção deverá ser feita a partir das extremidades para o centro, e de baixo para cima. A distância entre o bico de projeção deve ser de 1 metro da superfície recém-preparada (para acabamentos a distância pode ser de 1,5 m a 2,0 m) e a aplicação deve ser perpendicular à superfície. O concreto é projetado em círculos. (SILVA, 1997).

Segundo GERALDI (2011), a pressão de ar comprimido na projeção deve ser da ordem de 6 a 7 kgf/cm²; A dosagem da água e dos aditivos, tanto para a aplicação via seca quanto para via úmida, deve ser cuidadosamente controlada, a fim de se obter as resistências projetadas a curto e médio prazos, espessura final da camada de projetado deverá ser obtida através de várias passadas e não de uma só vez, evitando-se perdas por deslocamento e reflexão, Em maciços com grande presença de água subterrânea, deverão ser executadas drenagens, pois a presença de água provoca baixa aderência do concreto à superfície, conseqüentemente aumenta a reflexão de material. A obra deve ter uma equipe que faça o controle de qualidade do concreto, através de coleta de corpos de prova e ensaios para verificar a resistência dos mesmos e garantir que a resistência do projeto foi atingida.

Na maioria dos túneis utiliza-se concreto projetado pela facilidade de aplicação e alta resistência inicial. O concreto projetado pode ser empregado isoladamente em túneis que não mobilizem tração nas estruturas, em maciços terrosos que possuam tempo de autossustentação suficiente para garantir a estabilidade até que o concreto atinja sua cura, ou seja, em solos firmes e

expansivos, atentando-se às tensões mobilizadas no suporte. Concreto projetado com tela metálica ou fibras (BARBOSA,2015).

6.2. CAMBOTAS

As cambotas são elementos metálicos (treliças ou perfis metálicos calandrados ou soldados e de barras, vergalhões ou treliças de aço) que formam um arco no entorno da seção do túnel em papel estrutural, associado ao concreto projetado, e construtivo, funciona como o gabarito das escavações. As cambotas chegam segmentadas à obra e são montadas nas frentes do túnel, após a liberação da locação da mesma pela topografia. O espaçamento entre as cambotas é definido em projeto e varia de acordo com a qualidade do maciço (quanto melhores as propriedades do solo, maiores são os espaçamentos entre as cambotas). Logo após a fixação da cambota, é aplicado o concreto projetado para a consolidação do suporte (SERRANO; MELRO; CUNHA, 2013).

Geraldi (2011) que estes elementos são recomendados para casos de rochas alteradas e solos. As primeiras cambotas cobriam toda a superfície escavada, com comprimentos 0,60 a 0,80 metro. As cambotas costumam ser muito pesadas por conta de seu tamanho. Isto acarreta num maior risco de implantação pois exige o uso de parafusos ou soldagens numa região de solo ainda instável.

6.3. TELAS METÁLICA OU FIBRAS

Segundo GERALDI (2011), às telas metálicas eletrossoldadas são elementos de suporte bastante utilizados em rochas alteradas e em solo. Após a aplicação de uma pequena camada de concreto projetado com aproximadamente 3 centímetros de espessura, as telas são fixadas com o auxílio de pequenos chumbadores. Em seguida é projetada uma nova camada de concreto, incorporando a tela ao maciço. As telas podem ser substituídas como suporte primário nos túneis em rocha por concreto projetado reforçado por fibras metálicas, possuem vantagens referentes à rapidez e facilidade na execução e economia de concreto projetado.

As telas metálicas são armaduras pré-fabricadas constituídas por fios de aço

nervurados longitudinal e transversalmente de alta resistência mecânica, sobrepostos e soldados entre si em todos os pontos de cruzamento (nós), por corrente elétrica (caldeamento), formando malhas retangulares.

Aumento da resistência à tração do revestimento primário, proporcionando segurança contra a queda de pequenos blocos de rocha antes da aplicação do concreto projetado. As fibras possuem a mesma função da tela metálica exercida no revestimento primário, que é de aumentar a resistência à tração. A inclusão de fibras no concreto projetado reduz o tempo de aplicação do revestimento primário se comparado ao sistema equivalente com a instalação da tela metálica, que requer tempo para o posicionamento das telas. A aplicação de fibras no concreto projetado iniciou por volta de 1970. O uso de fibras de aço, vidro, carbono e polipropileno. As fibras de aço incorporadas ao concreto (SERRANO, MELRO; CUNHA, 2013).

6.4. ENFILAGEM

As enfilagens são elementos auxiliares de suporte utilizados em conjunto com outros tipos de suporte e têm a função de garantir a estabilidade da abóbada da cavidade enquanto o suporte ainda não está ativado. São instaladas longitudinalmente na região da face da escavação, com pequena inclinação em relação à horizontal. As enfilagens cravadas são, geralmente, constituídas de barras de ferro curtas aplicadas na periferia da cavidade. São utilizadas em maciços que apresentam tempo de autossustentação compatível com o processo construtivo. Elas mobilizam o efeito arco e as tensões da camada acima da calota são redistribuídas ao longo do arco, impedindo que cheguem ao teto do túnel. As enfilagens injetadas se constituem de calda de cimento injetada através de tubos instalados na abóbada e são aplicadas em maciços onde o solo é muito instável ou deformável. Nesta situação, as enfilagens têm a função de colaborar com a formação de um arco longitudinal à escavação viabilizando e tornando mais seguros os trabalhos na frente de escavação. Enfilagens injetadas, constituídas de tubos passantes instalados na abóbada do túnel sob aterro (Assis,2005).

6.5. PREGAGEM A FRENTE

Estes métodos de suporte atuam passivamente conferindo ao maciço resistência ao cisalhamento evitando movimentações excessivas.

Em geral, estes tipos de suporte são realizados em furos desde 4 até 12 metros, onde são inseridas barras metálicas (aço CA-50 com diâmetro de 20 a 25 mm) e depois injetadas calda cimentícia. Cada um destes elementos suporta uma área designada em projeto (entre 1,5 e 3 m²) e pode ser aplicado sistematicamente ao longo do contorno superior da seção e na extensão do alinhamento do túnel. A ponta externa da barra é virada em 90 graus, facilitando a amarração de telas metálicas. Ao final, é utilizado o concreto projetado para cobrir toda a superfície escavada. Os resultados confirmaram a importância da pregagem da frente no aumento da estabilidade e no controle dos deslocamentos, na frente e à superfície.

Segundo Lunardi (1989) a técnica da pregagem frontal em solos soltos foi aplicada pela primeira vez em Itália, em 1988, no túnel com 60 m² de seção da linha ferroviária designada por "Direttissima" entre Roma e Florença

6.6. CHUMBAMENTO

Os chumbadores são sistemas de suporte que possuem função similar a dos tirantes, sendo aplicados em túneis escavados em maciços rochosos que apresentam instabilizações dos blocos próximos à seção escavada. Tal restrição limita seu uso em maciços que apresentem condições de ancoragem para chumbamento próximo a estes blocos potencialmente instáveis. O processo do sistema de aplicação de chumbadores se traduz na perfuração da rocha; introdução de cartuchos de resinas e posteriormente das barras de aço; injeção de nata de cimento; posicionamento da placa metálica e aplicação da presilha.

As barras que são introduzidas no maciço possuem uma extremidade ancorada nos blocos do maciço rochoso que estão estabilizados, e a outra extremidade na face da cavidade. Se o bloco potencialmente instável deslocar, ele solicita o chumbador que por sua vez mobiliza esforços no maciço rochoso estável.

(SERRANO, C. E.; MELRO, F. C. A.; CUNHA, G. A., 2013)

6.7. ARCO INVERTIDO

“Parte do revestimento de túneis com a forma de anel fechado, representado pelo arco do lado inferior. Pode ser chamado também de arco reverso ou simplesmente invert (DER/SP, 2005)”.

Os arcos invertidos ou inverts são necessários em escavações de túneis em solos não consolidados ou quando existem esforços laterais advindos da movimentação do maciço. Essas estruturas podem ser de concreto armado ou projetado e provisórios ou definitivos, dependendo das condições do maciço e da seção empregada. (BALAGUER, 2014)

Segundo GERALDI (2011), as principais características dos inverts são: Melhoria nas condições de fundação para apoio do sistema de suporte (cambotas e concreto projetado). Travamento dos pés das cambotas, evitando movimentações laterais; Melhor distribuição dos esforços atuantes sobre a seção escavada, uma vez que o arco invertido é incorporado ao revestimento do túnel.

6.8. TIRANTES

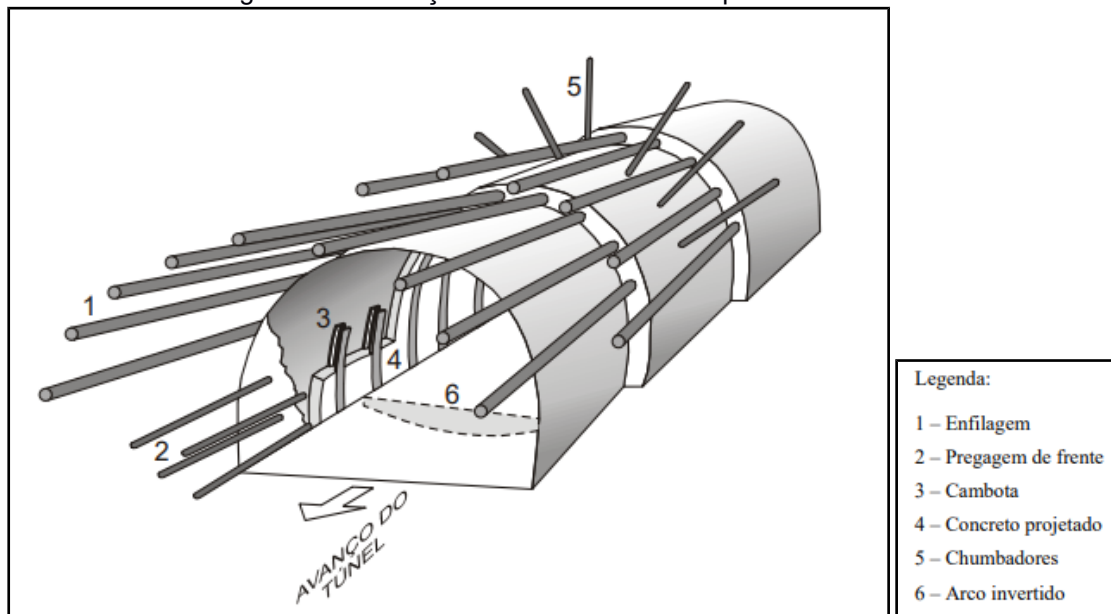
Os tirantes são barras de aço com comprimento entre 2 e 8 metros, protendidas, com cargas que variam de 8 a 20 toneladas, exercendo sobre o maciço esforços de compressão praticamente imediatos, evitando processos de movimentação, deformação e ruptura. A aplicação é feita na seção de forma radial, e ao longo do túnel constitui uma malha com espaçamentos definidos em projeto em função das características geológicas do maciço. A utilização dos tirantes produz um arco de maciço sob forte compressão, conferindo maior estabilidade à seção escavada. Este efeito é conhecido como arco colaborante (GERALDI, 2011).

Caso o maciço escavado tenha baixa qualidade e necessite de maior intervenção, podem ser aplicados tirantes para aumentar a capacidade de suporte. Diferentemente das pregagens e ancoragens, os tirantes são suportes ativos, pois aplicam uma compressão no maciço em todos esses elementos. Em geral, os

tirantes são realizados em perfurações para a inserção de barras de engaste no maciço. Quando já está em seu local definitivo, faz-se uma travacão do tirante aplicando uma pós-tensão. Para melhorar as condições de manutenção do equipamento, aplica-se calda cimentícia por toda a extensão do furo.(DER/SP, 2005)

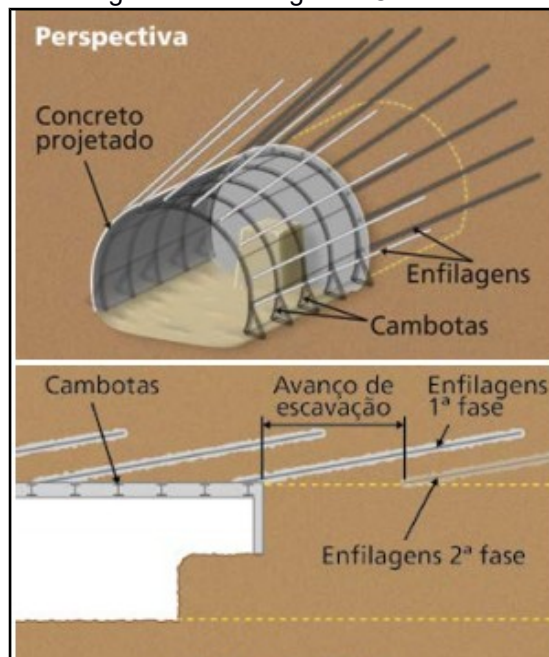
O arqueamento, pode-se redistribuir tensões superficiais para as partes mais internas do maciço envolvente. As placas de fixação dos tirantes podem segurar telas de aço, ajudando a redistribuir os esforços. Tirantes são utilizados em maciços rochosos com a função de estabilizar as fraturas e planos de descontinuidade, a fim de evitar a queda de blocos potencialmente instáveis e escorregamentos de superfícies, que possuem as descontinuidades mergulhando na direção contrária à frente de escavação do túnel. O processo do sistema de atirantamento se traduz na perfuração dos blocos rochosos; introdução de cartuchos de resina e posteriormente das barras, que podem ser de aço ou fibra de vidro; injeção de nata de cimento; posicionamento da placa metálica; aplicação da protensão e, por fim, da presilha ou rosca. As barras que são introduzidas no maciço possuem uma extremidade ancorada nos blocos do maciço rochoso que estão estabilizados, e a outra extremidade na face da cavidade. A protensão do tirante estabelece zonas previamente comprimidas, que se desenvolvem no formato de bulbos de compressão e sustentam o peso dos blocos potencialmente instáveis. (SERRANO; MELRO; CUNHA, 2013)

Figura 21 - Ilustração dos elementos de suporte de túneis



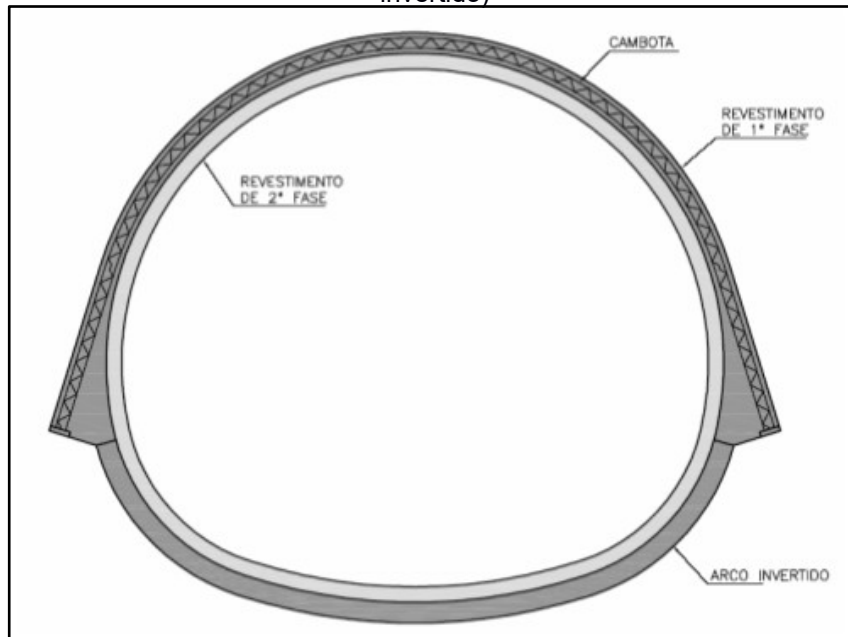
Fonte: DER/SP (2005)

Figura 22 – Enfilagem e Cambota



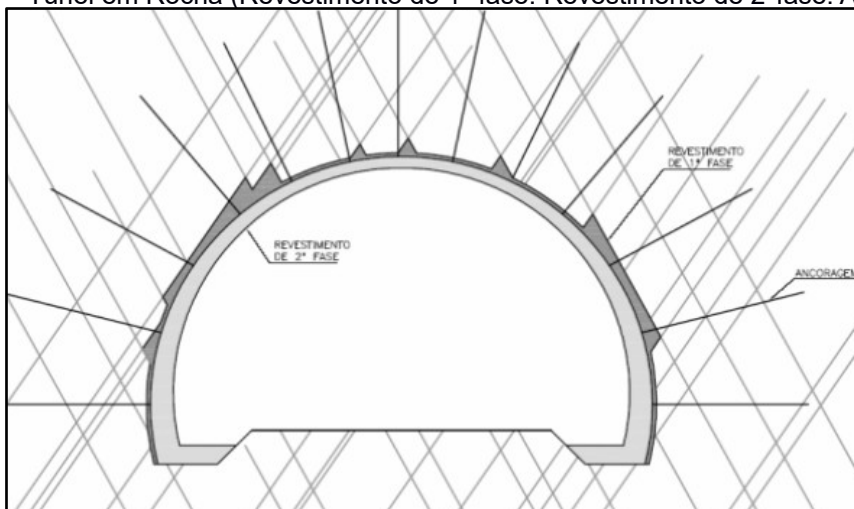
Fonte: SOLOTRAT (2021)

Figura 23 – Túnel em Solo (Cambota. Revestimento de 1º fase. Revestimento de 2º fase. Arco invertido)



Fonte: DER/SP(2005)

Figura 24 – Túnel em Rocha (Revestimento de 1º fase. Revestimento de 2º fase. Ancoragem)



Fonte: DER/SP(2005)

7. INFRA ESTRUTURAS AUXILIARES

Figura 25 – Infra Estruturas auxiliares



Fonte: (SCT, 2016)

7.1. VENTILAÇÃO

Os sistemas de ventilação do túnel se dividem em, ventilação forçada longitudinal e ventilação natural. O sistema de ventilação tem como função o transporte de gases tóxicos para o exterior do túnel, devem ser levados em consideração, a contribuição à geração e acúmulo de gases e os que regem o comportamento dos gases. Teores máximos de poluentes, opacidade do ar, causada por fuligem e fumaça, volume diário médio e a composição de veículos, extensão e inclinação do túnel, sentido do tráfego, altitude do túnel em relação ao nível do mar e variação de temperatura entre as bocas, velocidade de circulação média dos veículos, crescimento do volume de tráfego, características do duto de ar nas paredes do túnel, características temperatura e eliminação de gases em caso de incêndio, efeito dos ventos externos. (DER/SP, 2005)

Segundo CHIOSSI (1979), na ventilação dos túneis é necessário o fornecimento de ar puro para os colaboradores, remoção dos gases provenientes da detonação dos explosivos, eliminação da poeira causada pela perfuração e detonação. O sistema de ventilação, normal e de emergência, precisa melhorar em

vários aspectos, os equipamentos de ventilação mais eficazes, com menor consumo de energia e que ofereçam níveis de resistência ao calor suficientes para garantir, durante o período necessário, o auto resgate das pessoas, ampliar o campo de aplicação da ventilação longitudinal para túneis mais longos, com o estado tecnologia atual, seções de até 18 km podem ser ventiladas a partir de um ponto de entrada de ar afresco. Os sistemas de ventilação, dos mais simples aos mais complexos, devem ser administrados por meio de programas de computador inteligentes.

Para operar em segura, é necessário equipar o espaço subterrâneo com uma infinidade de microssensores muito robustos e de baixo custo, capazes de enviar toda a enorme informação gerada aos computadores da central de controle que, através desses programas inteligentes, são até capazes de aprender com os próprios erros e levar em consideração, em futuras tomadas de decisão, a experiência adquirida em ações passadas. Desenvolvimento de programas de computador de simulação de incêndio. Em espaços subterrâneos complexos, será necessário desenvolver técnicas confiáveis de acantonamento de fumos e gases, de forma que sua difusão pelo espaço subterrâneo seja controlada e limitada, por meio de cortinas de água e / ou ar ou outras técnicas eficazes. (JIMENO, 2005)

7.2. ILUMINAÇÃO

O projeto de iluminação do túnel deve ser elaborado considerando, entre outros, os seguintes aspectos: - características da iluminação diurna e noturna, acomodação visual do motorista nas zonas de entrada e saída do túnel, velocidade de projeto e iluminação de emergência. (DER/SP, 2005)

O nível de iluminação dentro de um espaço subterrâneo é de grande importância para alcançar um nível de conforto e segurança para os usuários. Em túneis, o nível de luminância demonstrou desempenhar um papel importante na segurança dirigindo dentro do túnel. É necessário continuar o esforço inovador para melhorar o desempenho das luminárias, para reduzir o seu consumo de energia, ao mesmo tempo que aumenta os níveis de luminância com a obtenção de revestimentos, não porosos, mais lisos, mais resistentes ao ataque físico-químico ,

com tons claros fáceis de limpar sabe-se que as lâmpadas normais consomem 80% da energia que consomem no calor. No momento tem luminárias de baixo consumo de energia usando filamentos de nanotubos carbono puro. Em túneis longos (> 1 km) será muito conveniente que a superfície de rolamento não seja de cor escura, seja fácil de limpar e não contenha betume, pois, em caso de incêndio, gera uma quantidade ag de muito densa e viscosa fumos que impedem a visibilidade. (JIMENO, 2005)

7.3. ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO RESISTENTES AO FOGO

O crescente desenvolvimento de novos materiais compósitos vai permitir a utilização, dentro dos espaços subterrâneo, materiais mais resistentes ao fogo e aos ataques físico-químicos, utilizando diversos tipos de polipropileno, vidro, fibras de carbono, etc., e de materiais cerâmicos em tratamentos de superfície Todos os elementos ou componentes que contenham materiais que, em caso de incêndio, não serão mais utilizados liberta gases tóxicos ou nocivos, gases em grande quantidade ou gases muito densos e viscosos. Controle integrado das instalações É muito necessário fazer um esforço contínuo para conseguir uma racionalização no uso gestão de todas as instalações dispostas dentro do espaço subterrâneo, tais como: controle, sinalização, ventilação, iluminação, drenagem e exaustão, comunicação, detecção automática de incidentes, entre outros. É necessário ter um único centro de controle principal, no qual é centralizado e gerenciado, através de um sistema de computador inteligente, todas as informações enviadas pelos equipamentos de controle e pelos sensores instalados.(JIMENO, 2005)

Uma grande diversidade de materiais será alcançada pela combinação de uma grande variedade de plásticos, como matriz do material compósito (poliésteres insaturados, resinas epóxi, fenólicas), somando-se a esses aditivos e fibras de alto desempenho (vidro, carbono, etc., até 14 tipos de fibras). Esses materiais compósitos tornarão possível fazer formulações à prova de fogo com uma produção de vapores de baixo volume e baixa densidade e toxicidade.(JIMENO, 2005 op. cit)

7.4. SISTEMAS DE SEGURANÇA

Os projetos dos sistemas de segurança devem ser previstos de acordo com as necessidades da rodovia em particular e com as legislações vigentes, na sua versão mais atualizada. Deve ser consultado, em especial, a norma do Corpo de Bombeiros de cada estado, para atendimento aos requisitos de segurança e obtenção da aprovação do projeto e do alvará de funcionamento.

Entre os sistemas mais usuais estão os sistemas de monitoramento CFTV, sistema de detecção de gases, sistema de telefonia em viva voz, sistema de detecção e combate a incêndio.(DER/SP, 2005 op.cit)

7.5. SISTEMA DE SINALIZAÇÃO

O projeto de sinalização e comunicação visual deve ser projetado de forma a facilitar a compreensão dos sinais pelos usuários. Os elementos de sinalização devem ter dimensões, visibilidade, cores e legibilidade compatíveis com a velocidade de tráfego e com as padronizações, permitindo que o usuário receba a mensagem em distância adequada. O sistema de sinalização pode ser composto por elementos como placas, painéis de mensagem variável, sinais luminosos, dentre outros. Devem ser indicados, entre outras, informações como, gabarito máximo do veículo, área de parada de emergência; - saídas de emergência; - rotas de fuga com indicação da distância da saída mais próxima; - postos de emergência; - sentidos de fluxo. Deve ser estudada a necessidade de implementação de semáforos, painéis de sinalização variável, barreiras automáticas, indicação de sentido de tráfego etc. nas entradas e saídas do túnel, prevendo-se a possibilidade e necessidade de interdições ou reversões do sentido de tráfego. (DER/SP, 2005 op.cit)

8. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma revisão bibliográfica dos principais aspectos na construção de túneis, os tratamentos necessários para construção e estabilidade dos maciços, métodos de suporte e revestimento tanto para túneis em solo como em rocha.

Através da análise das informações descritas se realizadas e das informações obtidas com a infraestrutura, pôde-se concluir que as escavações dependendo do traçado e da estabilidade os maciços foram feitas de maneira segura e os procedimentos se mostraram eficazes.

Tendo em vista que a exploração cada vez maior do espaço subterrâneo é uma tendência em todo o mundo, o estudo, conhecimento e desenvolvimento das tecnologias na área de túneis se mostram fundamentais e evolutivas.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, Dulcy M.; BAIK, Hyeon-Shik; GOKHALE, Sanjiv B. **Development of a decision support system for selection of trenchless technologies to minimize impact of utility construction on roadways**. Report. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, EUA, 2007.

ASSIS, A.P. (2001). **Métodos Construtivos Aplicados a Túneis Urbanos**. Curso Sobre Túneis em Meios Urbanos. Sociedade Portuguesa de Geotecnia & Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, Conferência: 12 p.

ASSIS, A.P. (2002). **Mecânica das Rochas: Obras Subterrâneas**. Publicação G.AP-AA004/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 57 p.

ASSIS, A.P. (2003). **Mecânica e Engenharia de Rochas**. Publicação G.AP-AA002/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 1: 2.1-2.45.

ASSIS, A.P. (2005). **Obras Subterrâneas**. Apresentações de Aula do Curso de Pós-Graduação, Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF.

BALAGUER, Diogo Aoni. **Estudo de caso: A execução do Túnel de Serviço da Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro – Emboque Gávea** – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica , 2014.

BARBOSA, M.G.T. (2015). **Análise dos efeitos do melhoramento das condições de maciços de túneis em seu comportamento**. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002AA/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104 p.

BASTOS, Mário José N. **A Geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos**. 1998. 166 f. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 1998.

BRASIL. Lei N° 3.924, de 26 de julho de 1961. Dispõe sobre os monumentos arqueológicos e pré-históricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 jul. 1961.

BRASIL. Lei N° 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 jun. 1993.

BRASIL. Lei N° 11.079, de 30 de dezembro de 2004. Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 2004.

SERRANO, C. E.; MELRO, F. C. A.; CUNHA, G. A. **Projeto e Construção de Túneis de Escavação Convencional - NATM**. 2013. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Mauá de Tecnologia - São Caetano do Sul, 2013.

DA SILVA, Carlos Antônio R. **Perfil geológico-geotécnico do subsolo ao longo do traçado do Metrô de Goiânia**. 2007. 227 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF, 2007.

DA SILVA, Guilherme Tavares. **Revestimento de Concreto Extrudado para Túneis**, 2018. Dissertação submetida à Coordenadoria do Curso do PPGTG da Universidade Federal de Santa Catarina:SC: 2018.

DELGADO, Alexandra Maria Eiras Ferreira da Costa. **Estabilidade da Frente de Túneis com Inclusões Lineares**, 2009, Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

DER/SP, 2005, **Projeto de Túnel**, Diretoria de Engenharia – Departamento de Estradas de Rodagem, São Paulo

DEZOTTI, Mateus Caetano. **Análise da utilização de métodos não-destrutivos como alternativa para redução dos custos sociais gerados pela instalação, manutenção e substituição de infraestruturas urbanas subterrâneas**. 2008. 231 f. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CELESTINO, T. B., ROCHA, H.C., **Tunneling Market in Brazil**, Revista Tunnel 5/2011, p.10-16, 2011.

CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de Engenharia**, 3ª Edição, São Paulo, Oficina de Textos, 2013.

FRANÇA, Pedro Teodoro. **Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos**, 2006. 206 f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GERALDI, José Lúcio Pinheiro. 2011 **O ABC das escavações de rocha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 284 p. ISBN 978-85-7193-238-8.

GOLSER, J. (1980). **Recent developments in the NATM. Water Power & Dam Construction**, 27: 35-39.

GOLSER, J. (1996). **Retificações sobre as opiniões do professor Kovári sobre o novo método austriaco de abertura de túneis** - tradução nº. 14, ABGE, São Paulo, SP, 16 p.

HERRENKNECHT. **Machine Technology**. Disponível em: <<http://www.herrenknecht.com/process-technology/machine-technology.htm>> . Acesso em: 17 maio. 2021.

JIMENO, Carlos Lopez. **Ingeo Tuneles**, Madrid, 2005. Tradução: Autor 2021.

JIMENO, C. López; MENDEZ, B. Díaz. **Classificación de los terrenos según su excavabilidad. Manual de túneles y obras subterráneas**. Ed. C. López Jimeno. Entorno Grafico, S. L. Madrid, 1997, p.183-210.

LUNARDI, P.; BINDI, R.; FOCARACCI, A. (1989). **Nouvelles orientations por le projet et la constrution des tunnels dans les terrains meubles**. Études et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front. Colloque International, Tunnels et Microtunnels en terrain meubles. Paris: Presses de l'ENPC, pp 625-644.

NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE; U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION; FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Technical manual for design and construction of road tunnels: civil elements**. Washington, EUA, 2009.

MANGOLIM, Filho, A. & Ojima, L. M. (1995), **Planejamento de investigações**. TURB Simpósio sobre Túneis Urbanos, ABGE/CPT, São Paulo, SP, p. 11-20.

MORAES JÚNIOR., A. H. V. (1999). **Análise Tridimensional de Escavações Subterráneas pelo Método NATM**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF, 121 p.

MOREIRA, Carlos Manuel da Cruz. **Túneis: uma herança ancestral rumo ao futuro**. A obra nasce: revista de Arquitectura da Universidade Fernando Pessoa. Porto, Portugal, n. 3, p. 92-115, jan. 2006.

PEIXOTO, B.A.M & Carvalho, M.A. (2006). **Proposta de Garagem Subterrânea como Ferramenta de Otimização do espaço Urbano no Centro de Brasília**, Monografia de Projeto Final em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 84 p.

PEREIRA, Valdir Moraes. **Métodos de Execução de Túneis**, curso de Engenharia Civil, 2012.

PEREZ, Joel Ojeda. **Nuevas soluciones para la mejora técnica y económica de concreto en las peraciones mineras**. Siminario Internacional de Mineía - Especialidad, 2019.

SILVA, P. F. A. **Concreto Projetado para Túneis**. 2. Ed, 92 p. São Paulo: Pini, 1997.

SOTOTRAT. **Túnel NATM**. Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda. p. 44, 2021.

TRAVAGIN, Vinícius Bernardinho. **Subsídios para escolha do método construtivo de túneis**. 2012. Dissertação (Programa de Pós- Graduação em Engenharia civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Curitiba.