

Guilherme Tavares da Silva

REVESTIMENTO DE CONCRETO
EXTRUDADO PARA TÚNEIS

Dissertação submetida à
Coordenadoria do Curso do PPGTG
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia de
Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Aurélio
Marques Noronha

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Guilherme Tavares da
REVESTIMENTO DE CONCRETO EXTRUDADO PARA TÚNEIS /
Guilherme Tavares da Silva ; orientador, Marcos
Aurélio Marques Noronha, 2018.
153 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão
Territorial, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão
Territorial. 2. Revestimento de túneis. 3. Concreto
extrudado. 4. SENS. 5. TBM. I. Noronha, Marcos
Aurélio Marques . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Guilherme Tavares da Silva

REVESTIMENTO DE CONCRETO
EXTRUDADO PARA TÚNEIS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Sistemas de Transportes e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial – PPGTG.

Florianópolis, 13 de setembro de 2018.

Prof. Norberto Hochheim Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.^a
Orientador - Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.^a
Examinador Interno – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Kochen, Dr. (por videoconferência)
Escola Politécnica da USP

Prof. Antônio Domingues Figueiredo, Dr. (por videoconferência)
Escola Politécnica da USP

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por me colocar neste local e momento. Foi Ele quem me permitiu ter tido minhas experiências e meus estudos de engenharia.

Aos meus pais Itamar e Gelda Silva, que cuidaram de minha família desde os tempos de criança, passando pela adolescência, fase adulta e até os dias atuais. Ensinarão os exemplos de dedicação, persistência e carinho.

A meus familiares, minha esposa Amanda Ibagy, filha Manuela Ibagy, meus irmãos Michelle, Gabriel Tavares da Silva e minhas afilhadas Sarah Zimmermann Tavares da Silva e Maria Catarina Parreiras Ghisi.

Aos profissionais que já atuam nesta área e que ajudaram a elucidar o tema, como Lars Babendererde (Babendererde Engineering), Edson Peev (Herrenknecht AG) e Luis Mamede (HLT Equipamentos Especiais).

Ao CBT (Comitê Brasileiro de Túneis), instituição da qual sou membro, porque promovem eventos nesta área para o Brasil. Tive a oportunidade de participar 4º do Congresso Brasileiro de Túneis, promovido pela instituição. A instituição ainda forneceu livros que compõem a bibliografia deste estudo.

À ACE (Associação Catarinense de Engenharia), entidade de classe que atuo como assessor de esportes. Foi através desta que consegui conquistar o posto de conselheiro do CREA-SC pela CEEC (Câmara Especializada de Engenharia Civil).

À Vale mineradora, onde pude trabalhar por quase 5 anos na África. Foram nas dificuldades que enfrentamos no trecho de montanhas rochosas em Mwanza (Malawi) e na implantação do porto de Nacala (Moçambique) que me inspiraram a estudar ainda mais questões geotécnicas.

Ao meu orientador, professor Marcos Noronha, grande companheiro de aulas. Ele me permitiu participar de suas aulas enquanto eu ainda não conhecia meu caminho. Seu tom calmo não reflete sua qualidade técnica, tão necessária para sua área de atuação.

Ao professor Amir Mattar Valente, precursor desta pós-graduação, sempre presente no Departamento de Engenharia Civil da UFSC. Seus esforços demonstram como integrar o estudo didático com projetos reais.

Em nome destes dois grandes professores, estendo meus agradecimentos aos outros que lecionaram desde a minha graduação até estes recentes tempos de pós-graduação. Todos são fontes de inspiração por suas carreiras e estudos.

À PPGTG, por disponibilizar este curso de aperfeiçoamento. Pude perceber o quanto eu ainda poderia melhorar em aspecto profissional. O sentimento que tenho é de que sempre haverá espaço para aperfeiçoamentos de técnica.

À FAPESC, instituição de apoio à pesquisa que foi financiadora de meu projeto. Uma fonte de orgulho catarinense e grande apoiador moral.

Aos colegas de curso, que compartilhavam com nossas vitórias e derrotas.

Agradeço, enfim, a todos que me ajudaram a percorrer este caminho difícil, mas prazeroso.

It always seems impossible until it's done
Madiba – Nelson Mandela

A vida é um sopro
Oscar Niemeyer

Stay hungry, stay foolish
Steve Jobs

RESUMO

Os métodos mais utilizados para construção de túneis são o NATM (*New Austrian Tunneling Method*) e as escavações mecanizadas com TBMs (*Tunnel Boring Machine*). Em ambos os métodos, as técnicas de revestimento normalmente usam concreto projetado e aduelas pré-moldadas, respectivamente.

Foi conduzida uma pesquisa em fontes acadêmicas e de mercado relevantes para se entender o tema estudado. Uma análise bibliométrica auxiliou a identificar os autores e localidades mais relevantes das publicações. Destacaram-se o Brasil, Japão, Alemanha, Estados Unidos e Inglaterra.

Inicialmente, descreve-se alguns conceitos sobre o setor tuneleiro. O estudo inclui classificação de rochas, escavações, sistemas de suporte e de revestimento tuneleiro. Ao final desta seção, discute-se sobre como os valores de custo do projeto são influenciados por estas características construtivas.

O revestimento com concreto extrudado (ECL – *Extruded Concrete Lining*) tem sido recentemente utilizado como uma alternativa inovadora em túneis. Esta técnica foi desenvolvida no século passado por entidades europeias e japonesas. Sua utilização ocorreu em obras de transportes, energia e saneamento.

Dois metodologias de execução de revestimento extrudado são demonstradas no presente estudo. A primeira delas é uma iniciativa do grupo brasileiro BraBo (*Brazilian Borer*), ainda em caráter conceitual, onde foi proposto usar uma forma deslizante e reologias especiais para a pasta cimentícia. A segunda alternativa é uma iniciativa japonesa denominada SENS (*Shield Extruded NATM System*), usada no túnel Sanbongi Hara, no Japão. Neste último caso, foi utilizada uma forma desmontável para auxiliar na atividade de concretagem (revestimento).

Foram descritos três estudos de caso com técnicas diferentes de túneis. No primeiro caso, observou-se um túnel feito com uso de NATM e concreto projetado. O segundo caso descreve foi sobre um projeto com uso de uma TBM e aduelas de concreto. O terceiro caso refere-se a um túnel feito no Japão utilizando concreto extrudado como revestimento.

Com base na bibliografia e estudos de caso, foi realizada uma comparação entre os diferentes métodos de escavação. Foi evidenciada a performance na execução do revestimento quanto nos aspectos logísticos (transporte e armazenamento), esforços de flexão, processos executivos e custos.

Algumas das características desejáveis dos túneis foram comparadas. Por fim, os resultados indicaram que o revestimento de túneis com concreto extrudado apresenta algumas vantagens em relação às alternativas tradicionais de revestimento (concreto projetado e aduelas de concreto). Isto poderia favorecer a aplicação em segmentos de novos projetos.

Palavras chave: revestimento de túneis; concreto extrudado; SENS; TBM.

O vídeo de apresentação desta dissertação está disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=WLLqtGJnDWs>

ABSTRACT

The methods for tunnel construction most commonly used are NATM (New Austrian Tunneling Method) and mechanized excavations with TBMs (Tunnel Boring Machine). In both methods, the tunnel lining techniques usually use precast concrete and precast concrete, respectively.

A research was conducted in relevant academic and market sources to understand the studied subject. A bibliometric analysis helped identify the most relevant authors and locations of publications. Brazil, Japan, Germany, the United States and England stood out.

Firstly, some concepts about the tunnel sector are described. The study includes classification of rocks, excavations, systems of support and tunnel coating. At the end of this section, we discuss how project cost values are influenced by these constructive characteristics.

Extruded Concrete Lining (ECL) has recently been used as an innovative alternative in tunnels. This technique was developed in the last century by European and Japanese entities. Its use occurred in works of transport, energy and sanitation.

Two extruded lining methodologies are demonstrated in the present study. The first one is an initiative of the Brazilian group BraBo (Brazilian Borer), still in conceptual character. The team proposed to use a sliding form and special rheology for the cement paste. The second alternative is a Japanese initiative called SENS (Shield Extruded NATM System), used in the Sanbongi Hara tunnel in Japan. In this last case, a dismountable formwork was used to aid in the concreting (lining) activity.

Three case studies with different tunneling techniques were described. In the first case, a tunnel made using NATM and projected concrete was observed. The second case described was about a project using a TBM and precast segments. The third case concerns a tunnel made in Japan using extruded concrete as a lining.

Based on the bibliography and case studies, a comparison was made between the different excavation methods, in terms of performance in the execution of the lining, logistic aspects (transport and storage), bending moments, executive processes and costs.

Some of the desirable characteristics of the tunnels were compared. Finally, the results indicated that the tunnel lining using extruded concrete presents some advantages over the traditional alternatives (sprayed concrete and precast segments). This could favor the application in segments of new projects.

Key words: tunnel lining; extruded concrete; SENS; TBM.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\frac{1}{2}$ "	Meia polegada
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
AWV	<i>Alaskan Way Viaduct</i>
B	Largura da base do túnel
B_0	Largura da área de arqueamento
D	Altura de influência do arqueamento
<i>Backup</i>	Parte traseira que dá suporte a uma TBM
BraBo	<i>Brazilian Borer</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBT	Comitê Brasileiro de Túneis
ECL	<i>Extruded Concrete Lining</i>
e_h	Momento fletor horizontal
e_v	Momento fletor vertical
EPB	<i>Earth Pressure Balance</i>
FAPESC	Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina
FMGM	<i>Field Measurements in Geomechanics</i>
<i>Grouting</i>	Preenchimento de vazios com caldas cimentícias
H	Altura da cobertura de rocha do túnel
H_0	Altura do túnel
<i>In situ</i>	No local
<i>Invert</i>	A porção inferior do túnel, em geral repleta
ITA	<i>International Tunneling and Underground Space Association</i>
J_a	Classificação para o grau de alteração das discontinuidades
J_n	Classificação para o número de discontinuidades
J_r	Classificação para a rugosidade das discontinuidades
J_w	Classificação para as condições hidrogeológicas
JSCE	<i>Japanese Society of Civil Engineers</i>
K_0	Coefficiente de pressão neutra do solo
MEF	Método dos Elementos Finitos
<i>Microtunnelling</i>	Técnica de escavação que usa diâmetros menores que 2 metros
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MPa	Mega Pascal
MSV	<i>Multi Service Vehicle</i>
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>

<i>Overbreaking</i>	Sobrescavação – Escavação exagerada de uma seção transversal
P	Pressão radial
P'	Pressão no revestimento ótima
P ₀	Tensão inicial no revestimento
P _s	Tensão no revestimento
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
PPGTG	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial
R	Raio externo do revestimento do túnel
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
SABESP	Companhia de água e esgoto de São Paulo
SC	Santa Catarina
SENS	<i>Shield Extruded NATM System</i>
<i>Smart Power</i>	Técnica de desagregação de material escavado
SRF	Rácio de classificação para o fator de redução de tensões
T	Carga do revestimento
T _s	Carga do revestimento nas laterais
T _{c,i}	Carga do revestimento na coroa e no <i>invert</i>
TBM	<i>Tunnel Boring Machine</i>
TCE	Tribunal de Contas do Estado
TCU	Tribunal de Contas da União
TUST	<i>Tunnelling and Underground Space and Technology</i>
U ₀	Deformação inicial
U _{Maciço}	Deformação total do maciço
U _{Suporte}	Deformação do suporte
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
W	Pressão exercida pelo peso do solo
WTC	World Tunneling Congress
σ _h	Pressão Horizontal
σ _v	Pressão Vertical
Θ	Ângulo do ponto de estudo com o eixo de cálculo
γ	Peso específico do solo

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema NATM.....	21
Figura 2 - Escavação com uso de TBM	22
Figura 3 - Estrutura da dissertação	27
Figura 4 - Pesquisa na base Scopus sobre os temas da dissertação	31
Figura 5 - Rede de relacionamento dos autores utilizados nesta dissertação.....	32
Figura 6 - Rede de relacionamento de palavras chave das referências utilizadas nesta dissertação.....	33
Figura 7 - Tipos de referências que compõem esta dissertação	34
Figura 8 - Origem das referências	35
Figura 9 - Principais atividades e objetivos das etapas do empreendimento	41
Figura 10 - Métodos Executivos de túneis	42
Figura 11 - Processo de construção NATM	43
Figura 12 - Mobilização dos esforços para regiões ao redor do maciço	44
Figura 13 - Os diferentes tipos de esforços em túneis.....	45
Figura 14 - Direções dos esforços numa seção em forma de "boca"	46
Figura 15 - Aplicação do concreto projetado	47
Figura 16 - Instrumentação em um túnel.....	48
Figura 17 - Esforços no <i>invert</i> de um túnel tipo ferradura	49
Figura 18 - Gráfico de classificação de maciços rochosos.....	50
Figura 19 - Perfuratrizes do tipo <i>jumbo</i> , usadas em túneis.....	52
Figura 20 – Marcações dos furos para escavação e colocação de tirantes	53
Figura 21 - Influência de condicionantes geológicos na forma da escavação obtida.....	54
Figura 22 - Parcialização da seção	55
Figura 23 - <i>Sidedrift</i> aplicado em um dos túneis da BR-116, serra do cafezal	56
Figura 24 - Estação Canary Wharf em Londres, construída com o método <i>cut and cover</i>	57
Figura 25 – Métodos <i>Cut and cover</i>	58
Figura 26- Técnica de <i>pipejacking</i> (macaqueamento hidráulico)	59
Figura 27 - Imagens e fotografia da tuneladora do túnel St. Clair (1898)	60
Figura 28 - Evolução das escavadoras TBM.....	61
Figura 29 - Diagrama do processo de corte com uso de um disco de largura constante	62

Figura 30 - Classificação das máquinas tuneladoras.....	64
Figura 31 - Cálculo dos esforços atuantes no revestimento	65
Figura 32 - Fatores de influência das sollicitação das cargas.....	67
Figura 33 - Contribuição de consecutivas seções para o cálculo sequencial da escavação.....	68
Figura 34 - Gráfico Convergência x Confinamento.....	69
Figura 35 - Desenho esquemático de um tirante	70
Figura 36 - Placa de tirante servindo como suporte à telas de aço.....	71
Figura 37 - Tipos de fluxo de concreto no mangote	72
Figura 38 - Desenho do uso de enfilagens	74
Figura 39 - Aplicação de cambotas.....	75
Figura 40 - Utilização de formas para a concretagem <i>cast in place</i>	76
Figura 41 - Representação das aduelas pré-fabricadas de concreto	77
Figura 42- Modelo de extrusão	78
Figura 43 – Detalhe do sistema de compactação do concreto.....	80
Figura 44 - Uso de concreto extrudado no esgoto de Hamburgo de 1978	81
Figura 45 - Comparativo de custos entre <i>drill and blast</i> e TBM	83
Figura 46 - Inovações propostas pela BraBo	85
Figura 47 - Componentes da extrusão.....	86
Figura 48 – Circunferência de extrusão	87
Figura 49 – Forma para extrusão do concreto.....	89
Figura 50 - Relação água x cimento com a resistência do concreto (lei de Abrams)	90
Figura 51- Misturador de zona fluidizada.....	91
Figura 52- Sistema de injeção de ácido.....	93
Figura 53 - Sistema de arrefecimento	94
Figura 54 - Etapas do processo de extrusão da metodologia SENS.....	95
Figura 55 - Seção transversal da máquina de forma SENS.....	97
Figura 56 - Foto da seção superior da máquina de forma SENS	97
Figura 57 - Emboque Sul do Túnel da Via Expressa Sul.....	99
Figura 58 - Seção transversal do túnel	100
Figura 59 - A TBM sendo preparada para escavação	103
Figura 60 - Esquema de escavação e fotos de frentes de obra	104
Figura 61 - Comparação de custos entre SENS, NATM e TBM.	105
Figura 62 - Medidas da TBM usada no túnel Sangongi Hara.....	106
Figura 63 - Forma do SENS.....	107
Figura 64- Fábrica de aduelas da linha 4 de metrô do Rio de Janeiro	115
Figura 65 - Transporte rodoviário de aduelas na linha 4 no metrô do Rio	116
Figura 66 - Transporte de insumos com auxílio de locomotivas	118

Figura 67 - Veículo de transporte de aduelas	119
Figura 68 - Caminhão betoneira para túneis.....	120
Figura 69 - Cabeça de corte e sistema eretor.....	121
Figura 70 - Pré-estresse do solo pelo processo de extrusão pressurizada	123
Figura 71 - Recomendação de tempo sem suporte por classificação RMR.....	126
Figura 72 - Publicação de poster no WTC 2018	129

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1 -Tipos de equipamentos de furação para desmonte.....	54
Tabela 2 - Escopo da aplicação e princípio fundamental da TBM	63
Tabela 3 - Comparativo de métodos de projeção de concreto	73
Tabela 4 - Projetos que usaram o revestimento de concreto extrudado	79
Tabela 5 - Custos dos insumos críticos do Túnel da Via Expressa Sul102	
Tabela 6 - Vantagens do uso do método NATM	110
Tabela 7 - Desvantagens do uso do método NATM.....	111
Tabela 8 - Vantagens do uso do método TBM	112
Tabela 9 - Desvantagens do uso do método TBM	113
Tabela 10 - Comparativo das técnicas de revestimento estudadas.....	128

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. JUSTIFICATIVA	23
1.2. OBJETIVO	25
1.2.1. Objetivos específicos.....	25
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
1.4. RECONHECIMENTO.....	28
2. MÉTODO DE PESQUISA	29
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO	29
2.2. BIBLIOMETRIA	30
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
3.1. CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS	38
3.2. ESCAVAÇÕES TUNELEIRAS.....	40
3.2.1. Escavação NATM	42
3.2.1.1. Princípios do NATM.....	44
3.2.1.1.1. Mobilização da força ao redor do maciço	44
3.2.1.1.2. Proteção com concreto projetado	46
3.2.1.1.3. Instrumentação de medição	47
3.2.1.1.4. Suporte flexível	48
3.2.1.1.5. Fechamento do <i>invert</i>	49
3.2.1.1.6. Arranjos contratuais	49
3.2.1.1.7. Indicação de suporte através da classificação do maciço	50
3.2.1.2. <i>Drill and Blast</i>	51
3.2.1.3. Parcialização da seção	55
3.2.2. <i>Cut and Cover</i>	56
3.2.3. Tubos cravados – <i>Pipejacking</i>	58
3.2.4. Escavação com uso da TBM	59
3.3. SISTEMAS DE SUPORTE.....	65
3.3.1. Método de Convergência x Confinamento.....	68
3.3.2. Pregagem e ancoragem passiva	69
3.3.3. Tirantes.....	70
3.3.4. Concreto Projetado.....	71
3.3.5. Enfilagens.....	73
3.4. TIPOS DE REVESTIMENTOS TUNELEIROS	74
3.4.1. Cambotas	75
3.4.2. <i>Cast in place</i>	76

3.4.3. Aduelas de concreto.....	77
3.4.4. Extrusão de concreto.....	78
3.5. ALTERNATIVAS DE CUSTOS DE PROJETOS TUNELEIROS	82
4. METODOLOGIAS DE CONCRETO EXTRUDADO.....	85
4.1. FORMA DESLIZANTE	85
4.1.1. Bocal de concreto e forma	88
4.1.2. Sistema de alimentação.....	89
4.2.2.1. Pasta Cimentícia.....	90
4.2.2.2. Ácido oxálico.....	92
4.1.3. Compactação hidráulica.....	93
4.1.4. Sistema de arrefecimento	94
4.2. FORMA DESMONTÁVEL.....	95
5. ESTUDOS DE CASOS	99
5.1. TÚNEL DA VIA EXPRESSA SUL – FLORIANÓPOLIS, SC	99
5.2. TÚNEL GASTAU – SÃO PAULO, SP	102
5.3. TÚNEL SANBONGI HARA - JAPÃO	103
5.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES METODOLOGIAS.....	107
6. ANÁLISE DE RESULTADOS – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO	109
6.1. NATM.....	109
6.2. TBM REVESTIDO COM ADUELAS DE CONCRETO	112
6.2.1. Fabricação e estocagem de aduelas.....	114
6.2.2. Transporte de aduelas.....	116
6.2.3. Transporte de aduelas dentro do túnel	117
6.2.4. Método executivo de montagem no túnel	120
6.3. TBM REVESTIDO COM CONCRETO EXTRUDADO	121
6.3.1. Redução do momento fletor.....	123
6.3.2. Espessura do revestimento – custos dos insumos	124
6.3.3. Segurança – Tempo de auto suporte	125
6.3.4. Taxa de avanço	127
6.4. RESULTADOS DO ESTUDO COMPARATIVO.....	127
6.5. PUBLICAÇÃO DE PÔSTER EM CONGRESSO MUNDIAL	129
7. CONCLUSÃO.....	131
7.1. PERSPECTIVAS	131
7.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS.....	135

1. INTRODUÇÃO

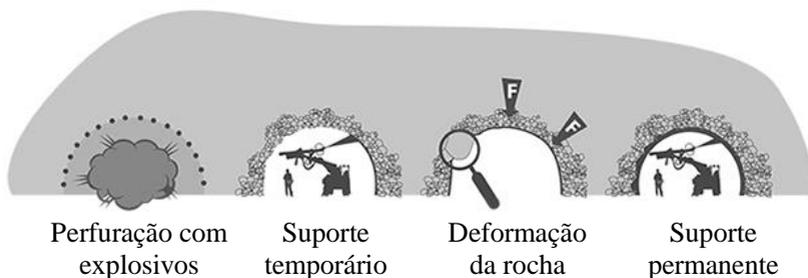
A humanidade também utilizou os túneis para superar suas necessidades. Existem relatos de seu uso para moradias e transporte de águas desde a antiguidade. As técnicas e extensões de túneis evoluíram ao longo dos anos. Sterling (1992) ressalta um aumento expressivo da construção de túneis nos últimos 25 anos do século XX.

Recentemente a Associação Internacional de Túneis e de espaço subterrâneo (ITA, 2014) publicou um manifesto declarando as vantagens como o uso de terras, isolamento, proteção ambiental, melhorias de traçados e outros benefícios sociais.

Dos métodos de escavação disponíveis, podem ser citados o NATM (*New Austrian Tunneling Method*) e a escavação mecanizada com TBM (*Tunnel Boring Machine*) como os mais utilizados (STUVA, 2016) (FONTOURA, 1995).

Atualmente, o NATM é o método mais utilizado para escavações de túneis (Figura. 1). A técnica utiliza a análise do maciço para determinar qual o suporte necessário a ser construído à medida que a escavação avança. Isto resulta numa espessura pequena de revestimento, otimizando o custo desta etapa. Em geral, o revestimento é de concreto jateado (concreto projetado) como suporte e revestimento primário. Um revestimento secundário pode ser adicionado para melhorar os esforços de suporte, impermeabilização e acabamentos do túnel. Esta é considerada uma boa opção e de custo baixo, porém com baixas taxas de progresso.

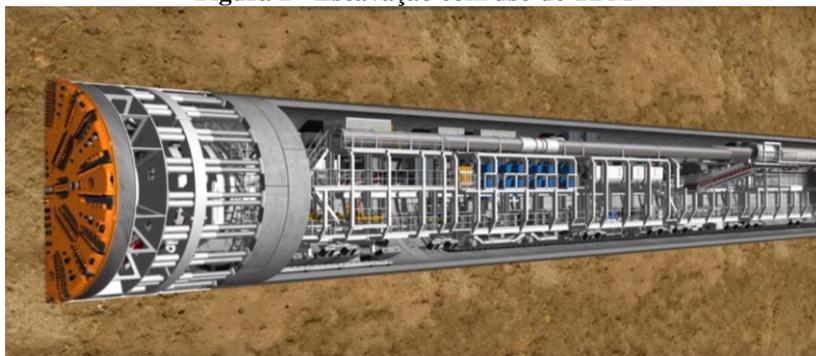
Figura 1 - Sistema NATM



Fonte: Putzmeister, 2017 (traduzido)

Maidl *et al.* (2012), discute sobre os principais esforços de melhoria nas taxas de avanço, em uma revisão dos métodos mecanizados de perfuração com auxílio de um shield (escudo). Estes autores comentam sobre as vantagens e desafios de utilizar uma máquina tuneladora para execução de túneis. A escolha do tipo de revestimento na escavação com TBM normalmente recai em aduelas de concreto pré-fabricadas (Figura 2).

Figura 2 - Escavação com uso de TBM



Fonte: Herrenknecht (2015)

Em comparação ao NATM, os equipamentos TBM tem maior capacidade de escavação, pois realizam o avanço contínuo devido a uma cabeça de corte giratória que escava o material à frente da máquina. Esta tem sido uma técnica muito adaptável, pois consegue lidar com escavações de solos, rochas e até a junção destes dois materiais.

O uso da TBM tem a consequência de ser uma obra mais rápida, porém possivelmente de maior custo direto. Um dos elementos que onera consideravelmente os custos é o revestimento, conforme será descrito no item 3.4. Tipos de revestimentos tuneleiros. Esta observação tem motivado o setor tuneleiro a buscar novos métodos de revestimento.

Uma nova opção para realizar o revestimento seria a utilização de concreto extrudado através de moldes dentro do túnel, logo após a cabeça de corte. Esta opção seria uma técnica inovadora com potenciais benefícios ao longo de todo o projeto.

1.1. Justificativa

Uma obra em túneis é considerada complexa e custosa à sociedade. As obras de infraestrutura geralmente consomem grandes valores para sua execução. De outro lado, não resolver problemas de congestionamentos também possui muitos custos indiretos à sociedade.

Por estes motivos, tenta-se estabelecer novos meios de execução de projetos, para que sejam mais econômicos. Há uma tendência na engenharia para a busca por métodos menos custosos e mais rápidos para se executar estas obras.

O revestimento é um dos elementos do túnel que acaba por se demonstrar custoso para execução. Os volumes de concreto projetado ou número de aduelas (essas ainda mais onerosas) custam grandes cifras no projeto total. Assim, melhorias com o uso racional dos materiais de revestimento trariam impactos positivos para estas obras, seja na redução do tempo de execução ou o na economia dos investimentos.

Durante a construção de um túnel é desejável que a execução do revestimento realize de forma compatível com o avanço da frente de escavação. Se houver um atraso na execução do revestimento, este poderá se tornar um gargalo do processo de escavação que deverá ser atrasado para evitar trechos da escavação sem o suporte adequado. Por outro lado, no caso do NATM a baixa produtividade no avanço da escavação pode ocorrer devido às paradas cíclicas (por conta das explosões) e ao tempo de preparo da detonação da frente de escavação segundo o plano de fogo estabelecido.

Desde a década de 1960 já se estuda a utilização de concreto extrudado como método de revestimento, observando-se um desenvolvimento relativamente rápido dessa metodologia na Europa e no Japão. Alguns autores como BTS (2004), Kolymbas (2005) e Maidl *et al.* (2012) descrevem o concreto extrudado como uma promissora metodologia de revestimento de túneis, mas que ainda requer estudos e novos desenvolvimentos. Também Fukuchi (1991) considerou que o desenvolvimento do revestimento resultaria na substituição de outros revestimentos em muitas ocasiões.

Em termos das propriedades mecânicas, Kelley (1995) realizou pesquisas avançadas na reologia do concreto extrudado, objetivando fazer a pasta cimentícia alcançar uma resistência de 30 MPa em 4 horas, e ainda mantendo sua capacidade de bombeamento. A autora ainda comenta sobre problemas com microfissuras por conta do excesso de calor durante o processo de hidratação do cimento.

Das poucas obras de túneis com concreto extrudado, destacam-se principalmente alguns projetos construídos no Japão, de onde surgiu uma nova tecnologia de revestimento o túnel, diferente das soluções que estavam no mercado. O método japonês proposto consiste em combinar a extrusão com a escavação NATM, sendo premiado pela JSCE em 2012 como uma excelente realização de engenharia de túneis (JSCE, 2012). Este método foi denominado SENS (*Shield, Extruded NATM System*) e será descrito em mais detalhes ao longo da dissertação.

Para fins de verificações e dimensionamentos, Royal *et al.* (2010) apresentou uma análise numérica de um modelo de um túnel escavado com uma TBM e com revestimento de concreto extrudado. Nesta pesquisa, dois tipos de concreto foram analisados (concreto normal e com polímeros) para relacionar o tempo de cura com o desempenho de escavação. Os autores destacam que pode-se utilizar polímeros como revestimento, alcançando melhores resistências do suporte. A opinião dos autores também é de que este revestimento possa substituir os tubos macaqueados (pipejacking) e aduelas de concreto em muitos casos.

O processo de extrusão para túneis também foi discutido por Moser (2013) como parte de uma tecnologia inovadora de escavação e revestimento. Sua sugestão foi de um tipo de escavação potencialmente mais eficiente que o das tecnologias tradicionais, usando jato d'água de alta pressão, resultando em uma tecnologia brasileira inovadora.

No congresso mundial de túneis, Noronha (2014) sugeriu um processo de escavação por hidro-demolição, mais rápido que os métodos tradicionais. Para acompanhar este ritmo mais rápido de execução, ele sugeriu o revestimento por extrusão. Na mesma linha de raciocínio, Paulo (2014) observa que um método com maior produtividade de escavação requer a execução do revestimento através de técnicas mais rápidas, como a extrusão de concreto. Mais recentemente, Giese (2016) também discutiu o uso de concreto extrudado, mas com foco nos custos de construção. Ele propôs que fossem detalhados os custos e taxas de progresso apresentadas, sendo possível então comparar aos métodos convencionais.

No presente trabalho, alguns especialistas e atuantes no construção de túneis foram consultados durante o estudo. Alguns deles já utilizaram a extrusão e são diretos ao afirmar que esta é uma solução que trará economias durante a execução.

Por exemplo, Lars Babendererde, renomado consultor internacional de túneis, já executou este tipo de revestimento. Num encontro informal com o autor afirmou que houveram reduções

significativas quanto a custos e trabalhos. Babendererde (2018) demonstrou conhecimento neste assunto por conta de suas experiências anteriores no aperfeiçoamento e contratação nesse tipo de revestimento.

A compilação de todos estes argumentos indica que o assunto é importante, atual e pode ser abordado de uma forma mais aprofundada. Isto justifica a elaboração do presente estudo descritivo da técnica de construção de revestimentos de túneis com concreto extrudado. De fato, há muitos indícios de ganhos ao longo do processo de revestimento com esta técnica, como já sugerido em diversas literaturas internacionais (e nacionais, mais recentemente).

Assim, apresentam-se propostas inovadoras de extrusão, que em alguns casos poderá substituir os revestimentos tradicionalmente aplicados em túneis. Isto é um motivo para se instigar a investigação do tema.

A contribuição tecnológica deste trabalho será na análise crítica e comparativa do processo de execução com a tecnologia proposta de concreto extrudado, mostrando sua viabilidade técnica e econômica. Esta técnica nunca foi utilizada no Brasil, sendo esta tecnologia uma iniciativa nacional pioneira.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo apresentar métodos de execução de revestimento de túneis com uso de concreto extrudado.

1.2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos definidos no presente estudo são um desdobramento do objetivo principal para conseguir atingir a tarefa de comparar os diferentes métodos, sendo descritos a seguir:

- Pesquisa bibliográfica e bibliométrica sobre escavações tuneleiras, sistemas de suporte e extrusão de concreto;
- Comparar os diferentes métodos em termos de suas performances na execução do revestimento, dos aspectos logísticos (transporte e armazenamento) e dos processos executivos.

- Publicar o conhecimento em evento importante de engenharia de túneis;
- Descrever as conclusões encontradas pelo autor e propor melhorias para trabalhos futuros.

1.3. Estrutura da dissertação

A proposta deste estudo é de dissertar sobre o método de extrusão aplicado ao revestimento de túneis. Como será descrito adiante, existem poucos exemplos estão disponíveis sobre este tipo de revestimento no Brasil e no mundo. Parte dos exemplos aconteceram no Japão e suas publicações foram feitas em japonês, dificultando o aproveitamento destas referências. Esta pesquisa é descrita, em sua maior parte, em caráter conceitual, descrevendo o conceito da extrusão de concreto através de exemplos anteriores à pesquisa.

Neste **capítulo 1**, questões básicas sobre escavações de túneis são introduzidas. O estudo é justificado junto aos fatores que instigaram o início deste estudo, numa indicação que o concreto extrudado poderia ter vantagens em relação a outros métodos.

No **capítulo 2** é apresentada o embasamento desta pesquisa, justificando os motivos pelos quais foram escolhidas as fontes consultadas. Uma busca bibliométrica auxiliou na percepção das publicações mais importantes sobre o assunto.

No **capítulo 3** fez-se uma reunião destes conceitos sobre escavações e revestimentos e custos do projeto. São descritas técnicas de classificação de rochas, escavações, sistemas de suporte e tipos de revestimentos para túneis. Cada escolha de alternativa implicará num custo para a obra.

O **capítulo 4** descreve duas propostas de concreto extrudado. A primeira uma metodologia brasileira, ainda em fase conceitual. Esta solução tem por base formas deslizantes. A segunda tecnologia descrita é japonesa e utiliza formas desmontáveis.

O **capítulo 5** apresenta três estudos de casos referentes aos projetos do Túnel da Via Expressa Sul em Florianópolis/SC, do Túnel Gastau em Caraguatatuba no estado de São Paulo e do Túnel Sanbongi Hara no Japão. Algumas das características de construção foram escolhidas a serem estudadas.

Figura 3 - Estrutura da dissertação



Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação realizada foi essencial para um melhor entendimento sobre os critérios de escolha de revestimentos e o potencial de uso do concreto extrudado.

O **capítulo 6** descreve uma confrontação entre os diferentes métodos construtivos de túneis e apresenta os resultados da análise. Isto

permitiu um melhor entendimento sobre os critérios de escolha de revestimentos.

Por fim, o **capítulo 7** traz as conclusões dos estudos e da análise comparativa realizados, apresentando as perspectivas e recomendações para futuros trabalhos.

1.4. Reconhecimento

O presente trabalho foi realizado com o apoio da pós-graduação em Engenharia dos transportes da UFSC e da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

2. MÉTODO DE PESQUISA

2.1. Caracterização do estudo

Durante a execução de empreendimentos, um dos principais questionamentos refere-se à possibilidade de alterações do produto ou do processo para otimizá-los. Este tipo de questionamento foi caracterizado por Leite (2004) através dos paradigmas reducionista¹ e sistêmico². A autora descreve como o uso destes paradigmas influenciou na evolução da tecnologia.

Estes questionamentos também são presentes na construção de túneis. De forma análoga, utilizam-se os princípios reducionistas e sistêmicos com finalidade de melhorias nos métodos de revestimentos tuneleiros. Com base nestes princípios, buscou-se desenvolver o tema da presente dissertação, que é voltado à investigação analítica das aplicações de concreto extrudado em túneis.

O método da pesquisa foi baseado na linha de raciocínio utilizado ao longo da pesquisa (GIL, 1999), levando-se em consideração o método fenomenológico para esse estudo, sem a aderência a sequências lógicas pré-definidas para atingir o objetivo. Assim, preocupou-se em descrever os eventos como eles são observados na realidade, e também pelas descrições de diversas publicações que já contemplam o tema. Em geral, verificam-se opiniões diferentes sobre as aplicações e metodologias do processo de revestimento de túneis. O presente trabalho buscou sintetizar estas diferentes opiniões, deixando as interpretações e ajustes para casos específicos ao leitor.

Devido ao caráter eminentemente pragmático das obras de túneis, o presente estudo terá uma natureza de pesquisa aplicada, com a

¹ Paradigma Reducionista: Predominante na ciência clássica e, depois na ciência moderna, instituída por Descartes, amplamente usada e difundida desde a sua origem. A lógica é reduzir os fenômenos ao desempenho de suas partes, desconsiderando as conexões entre si.

² Paradigma Sistêmico: Questiona a perfeição e a universalidade do paradigma reducionista, identificando sistemas que somente existem e evoluem, se interagirem, como o caso dos sistemas humanos. Aponta a imprevisibilidade de comportamentos e as relações não-lineares que ocorrem em alguns sistemas. Esses sistemas precisam ser associados ao contexto, e não apenas, analisado em partes isoladas.

discussão do tema voltada especificamente para o problema da técnica de revestimento de túneis.

Por fim, por conta da natureza aplicada onde há várias alternativas e incertezas, o problema será abordado através de uma pesquisa qualitativa. Segundo Gil (1991), isto é realizado pela interpretação dos eventos e de seus significados, não necessitando uso de métodos estatísticos.

2.2. Bibliometria

Um dos primeiros trabalhos realizados foi uma análise bibliométrica para o tema da pesquisa, formando a base das referências da dissertação. Este procedimento é bem conhecido na parametrização de pesquisas. Costa *et al.* (2012) descrevem a **bibliometria** como:

“uma técnica quantitativa e estatística para medir índices de produção e disseminação do conhecimento, bem como acompanhar o desenvolvimento de diversas áreas científicas e os padrões de autoria, publicação e uso dos resultados de investigação”.

Dentre outras fontes consultadas, a pesquisa concentrou principalmente na busca de artigos na base Scopus sobre os temas abordados nesta dissertação. Esta é uma base renomada por reunir informações de artigos publicados em revistas de renome científico.

Para que pudesse fazer uma comparação entre os métodos, foi realizada a pesquisa dos termos “TBM and tunnel”, “NATM and tunnel” e “*extruded concrete lining*”. Estas pesquisas resultaram nas quantidades de 3.062, 849 e 19 artigos, respectivamente.

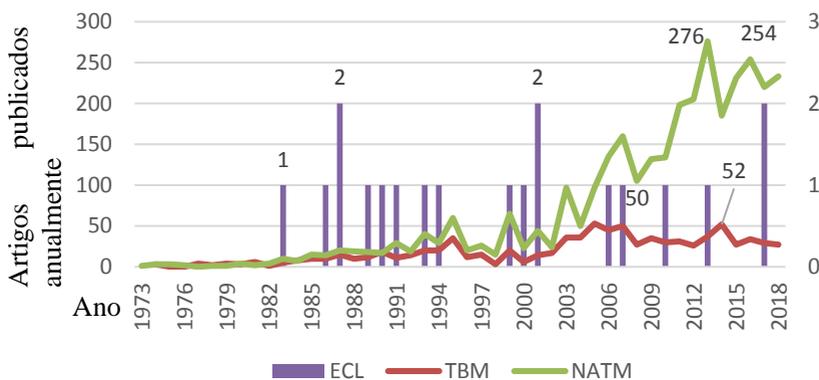
O concreto extrudado (tema central desta dissertação) é pouco citado entre os artigos científicos. Como foi dito no parágrafo anterior, apenas 19 artigos continham este tema. A pequena quantidade revela o ineditismo do assunto e sugerindo novas pesquisas. Isto também justifica o desenvolvimento da presente dissertação.

A análise do conteúdo destas poucas publicações permitiu verificar que a técnica de revestimento extrudado pode ser considerada como uma inovação. Como algo novo, pode ainda ensejar melhorias e aperfeiçoamentos.

A Figura 4 ilustra a evolução da quantidade de artigos publicados anualmente sobre os dois primeiros temas (TBM e NATM) nos últimos 45 anos (de 1973 a 2018). À direita do gráfico da Figura 4,

utilizou-se um segundo eixo vertical para comparar os artigos sobre concreto extrudado. A análise do gráfico permite verificar o maior volume de trabalhos acadêmicos voltados à metodologia TBM superando a quantidade de publicações sobre NATM, talvez pelo fato desta última ser uma técnica mais consolidada e mais utilizada na prática.

Figura 4 - Pesquisa na base Scopus sobre os temas da dissertação



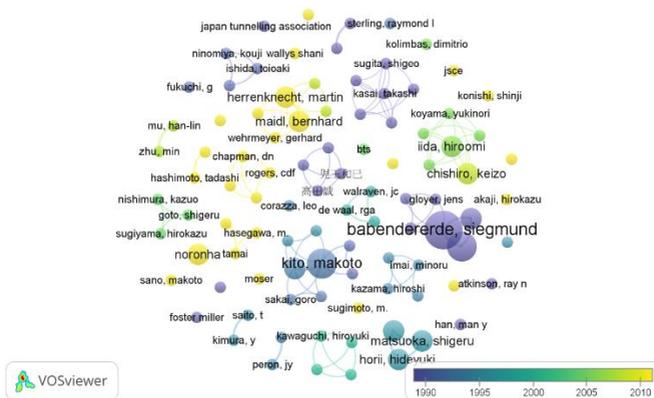
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da pesquisa

Outro indicador importante considerado na pesquisa foi considerado através da técnica de redes de relacionamentos. No caso, foi utilizado o programa VosViewer para gerar a rede de relacionamento da presente pesquisa usando os dados bibliométricos. Este é um software conhecido na comunidade acadêmica por demonstrar os pesquisadores e respectivas linhas de pesquisa de maior impacto no assunto. Foram elaboradas redes de relacionamentos para demonstrar o relacionamento dos autores, palavras chave e anos de publicação.

No diagrama de relacionamentos da Figura 5 pode-se perceber o destaque para o trabalho de Siegmund Babendererde principalmente com duas publicações importantes em 1987 e em 2001. Este autor faleceu em 2012 (WALLYYS, 2012). Seu filho, Lars Babendererde, é um especialista renomado em túneis e foi consultado neste trabalho, como descrito anteriormente. Ele participou da execução no metrô de Lyon (WALLYYS, 2013), onde foi testada a aplicação da técnica de revestimento por concreto extrudado.

A contribuição de Hiroomi Iida (2008) também se destaca nos estudos sobre concreto extrudado. Este autor esteve à frente da agência japonesa de construção de ferrovias, em Tóquio. Sua equipe construiu o túnel Akima (STAJ, 2006) como parte do Shinkansen. Iida (2008) desenvolveu seu doutorado sobre uma nova abordagem do tema de escavação e revestimento de túneis com extrusão, denominada SENS, conforme descrita adiante no item 4.2. Forma desmontável.

Figura 5 - Rede de relacionamento dos autores utilizados nesta dissertação



Fonte: Elaborado pelo autor.

O autor Hiroomi Iida também publicou alguns artigos em parceria com outros pesquisadores. Vale ressaltar, que alguns textos estavam disponíveis apenas em japonês e, por falta de uma tradução fidedigna, não puderam ser incluídos na presente pesquisa. Porém, acredita-se que os textos em inglês foram suficientes para ter uma visão geral do trabalho deste autor.

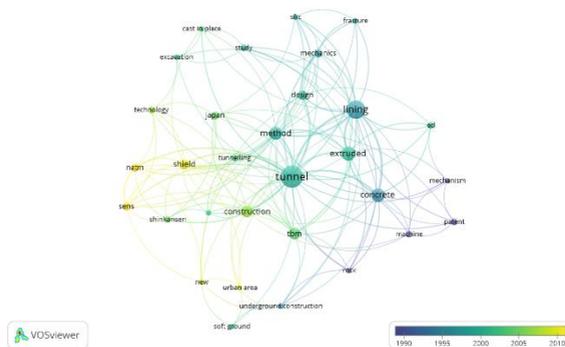
Outro autor de destaque, segundo a rede de relacionamentos obtida, foi o Prof. Dr. Bernhard Maidl que publicou alguns livros contendo assuntos de escavação mecanizada (Maidl *et al.* 2008 e Maidl *et al.* 2012). Em seus livros ele citou os exemplos de máquinas fabricadas pela empresa alemã Herrenknecht. As empresas que mais produzem máquinas tuneladoras são a alemã Herrenknecht, e a norte-americana Robbins. Esta primeira fabricante possui mais literatura contemplando suas obras.

Existem outros autores que desenvolveram trabalhos menos expressivos sobre concreto extrusão em revestimento de túneis, não sendo explicitados na presente pesquisa devido à maior representatividade do trabalho dos autores supracitados. No Brasil, Noronha é um dos poucos autores que detém publicações sobre o tema, demonstrando-se como um dos pioneiros em seu país.

Além da pesquisa sobre autores, utilizou-se a mesma ferramenta VosViewer para traçar as redes de relacionamento das publicações usadas nesta dissertação. Este estudo pode ser observado na Figura 6.

A busca foi realizada entre as publicações onde destacam-se as palavras *tunnel*, *extruded* e *lining*. A busca acabou revelando alguns autores que chegaram a citar a técnica de extrusão utilizando adição de fibras SFRC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*), motivo pelo qual aparece como uma técnica de interesse na década de 1990. Porém, o acrônimo SENS, metodologia desenvolvida no Japão, é o termo que mais aparece próximo aos termos NATM (técnica de escavação) e Shinkansen (sistema ferroviário japonês).

Figura 6 - Rede de relacionamento de palavras chave das referências utilizadas nesta dissertação



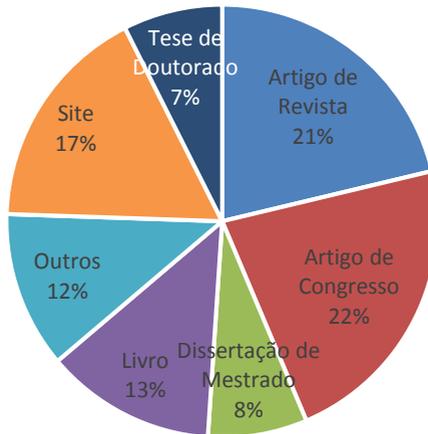
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram utilizados diferentes tipos de fontes para compor as referências deste trabalho. O desejo foi de reunir materiais não consolidados academicamente (sites, vídeos, estudos) com outros já bem reconhecidos no meio acadêmico (revistas, livros, teses), agregando as qualidades de cada tipo de fonte. A Figura 7 apresenta um resumo dos tipos de referência considerados na pesquisa.

Observou-se que em geral, as revistas qualificadas apresentaram as tendências antes de serem descritas por outras publicações. Entre as revistas, destacam-se a TUST (*Tunnelling and Underground Space and Technology*) e a *International Journal of GeoMechanics*.

Os livros selecionados apresentaram conhecimentos mais consolidados sobre o assunto, de onde pode-se perceber seus temas centrais e fazer algumas considerações sobre os autores. Bieniawski (1989) e Barton, Lien e Lunde (1974) destacam-se como grandes estudiosos no uso de concreto projetado em túneis. O livro BTS (2004) descreve as alternativas para revestimentos de túneis e detalhes sobre sua aplicação.

Figura 7 - Tipos de referências que compõem esta dissertação



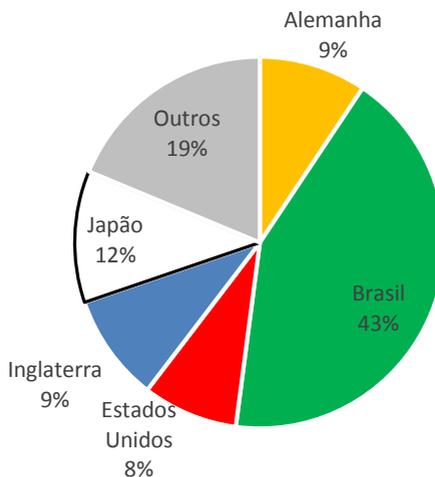
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os livros de Kolymbas (2005) e Chapman, Metje e Stark (2010) descrevem um panorama da construção tuneleira. A escavação mecanizada foi bem descrita por Maidl *et al.* (2012). Estes últimos autores participaram de projetos na Herrenknecht, uma das empresas líderes em escavação tuneleira mecanizada.

As origens das referências foram bastante variadas. O Brasil destacou-se com várias referências sobre escavações tuneleiras, e também algumas sobre concreto extrudado (conceituais). O Japão se destacou pelos túneis construídos com a extrusão de concreto. Como comentado anteriormente, percebeu-se que ainda haviam outros artigos

deste país, mas que não puderam ser considerados por estarem com texto inteiramente em japonês. A Inglaterra se destacou, em especial pelas revistas e alguns livros publicados. Os Estados Unidos e Alemanha se destacaram pela presença de empresas de escavações tuneleiras e associações. A Figura 8 ilustra a distribuição geográfica das principais pesquisas consideradas na presente dissertação.

Figura 8 - Origem das referências



Fonte: Elaborado pelo autor.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém uma revisão sobre os principais temas a serem analisados e comparados no trabalho da presente dissertação. Para tanto, a revisão considerou diferentes tópicos de engenharia de túneis para se entender quais são as influências e ações sobre o sistema de revestimento de um túnel. As referências usadas neste capítulo foram escolhidas por serem as mais frequentemente citadas em trabalhos sobre engenharia de túneis.

Utilizou-se uma pesquisa bibliográfica para compilar as principais referências utilizadas, como artigos de renomadas revistas sobre túneis, livros bem-conceituados e catálogos de especificações de materiais. Alguns trabalhos de conclusão de curso de graduação, mestrado e doutorados contribuíram para o embasamento do tema. Foram usadas notícias de jornais, sites de divulgação de empresas e outras fontes para que o trabalho não fosse além da fronteira acadêmica, considerando a situação real e permitindo que tivesse a sua aplicabilidade melhor contextualizada. Complementarmente, foram apresentados exemplos de obras de túneis com a finalidade de auxiliar a comparação das características e vantagens de cada técnica em aplicações reais de escavação e revestimento.

A escolha do revestimento do túnel determina uma boa parte dos desafios para a construção e operação do projeto executivo. Esta decisão é feita ao longo das características de cada túnel (uniformemente ou seções), dependendo do tipo de solo, rochas, função (estrutural ou apenas acabamento), metodologia executiva (NATM ou TBM), produtividade e tecnologias disponíveis.

Para proporcionar um entendimento geral sobre estes assuntos, o presente capítulo inicialmente discorre sobre a classificação de rochas, um conhecimento importante para definir as diretrizes da escavação, as dimensões do revestimento e os tempos de aplicação do mesmo. A classificação das rochas é uma das atividades mais importantes para o projeto, permitindo definir o revestimento e outras características executivas através de relações empíricas estabelecidas por uma base de estudos de medições em milhares de obras nas últimas décadas. Atualmente, além das relações com base empírica, os projetos agora recorrem a simulações numéricas sobre modelos avançados e com alto grau de aproximação da condição real da execução da obra.

O próximo item estudado no presente capítulo foi o de escavações tuneleiras. Existem algumas metodologias mais comumente utilizadas, das quais foram destacados o NATM, *cut and cover*, *pipejacking* e TBM. Foi realizado um resumo de cada um destes métodos, destacando suas características específicas.

Como será discutido adiante, normalmente o maciço deve ser escorado após ser escavado. O alívio das tensões internas após a escavação tende a deixar a área instável. Medidas de suporte são utilizadas para resistir aos novos esforços e para evitar o colapso. As medidas citadas nesta dissertação são as ancoragens, o concreto projetado, as cambotas e as enfilagens.

Muitas vezes, além do revestimento primário de suporte, utiliza-se uma segunda camada para o revestimento final do túnel. Atualmente há uma tendência para uso revestimentos em quase todos tipos de túneis, principalmente em túneis urbanos, porém nem sempre se consegue usar este revestimento por conta dos custos de implantação. Com relação aos métodos executivos dos revestimentos de túneis, nesta seção serão descritos os métodos *cast in place* e concreto extrudado, tema principal da dissertação.

Uma breve discussão sobre custos na construção de túneis foi realizada no final deste capítulo. Em geral, é uma tarefa difícil mensurar o custo dos diferentes métodos antes do início da construção. Porém, alguns autores sugerem algumas metodologias para a avaliação dos custos.

3.1. Classificação de rochas

O terreno a ser escavado possui características de comportamento estrutural após sua conclusão. Para entender este comportamento, é importante a classificação do maciço. Ao contrário de itens fabricados (que podem ser padronizados com certa facilidade), os terrenos costumam ter variáveis difíceis de prever. Os terrenos a serem escavados estão debaixo da terra, não permitindo uma inspeção visual de toda a extensão da obra.

A classificação geomecânica do maciço rochoso a ser escavado é essencial para se determinar qual o revestimento deve ser utilizado. Existem diferentes tipos de esquemas de classificação de maciços rochosos, mas os mais utilizados são os sistemas de Bienawiski e de Barton (BARTON, LIEN e LUNDE, 1974).

O modelo de Bienawski define um parâmetro denominado RMR (Rock Mass Rating) que é obtido da soma de fatores físicos que

influenciam diretamente as atividades de escavação e suporte de um túnel. O valor desta soma varia de 1 a 100, que são agrupados em cinco faixas de gradação do maciço, variando da escala de I (muito boa) até V (muito má). No RMR, os seguintes cinco fatores são considerados:

Usando esta classificação, é possível se utilizar vários fatores de interesse, como o tempo de auto sustentação, valores de coesão e ângulo de atrito e vão máximo. Cinco elementos são considerados e somados, sendo que cada um tem uma importância por sua influência:

- 1) Resistência à compressão uniaxial da rocha [MPa];
- 2) Índice RQD, relativo à qualidade da rocha [%];
- 3) Grau de fraturação do maciço, através do espaçamento médio entre descontinuidades [m];
- 4) Estado das descontinuidades, segundo a rugosidade [qualitativo];
- 5) Condições hidrogeológicas.

Usando a classificação de Bienawski, (1989) é ainda possível se determinar fatores de interesse para o projeto, como o tempo de autosustentação do maciço, valores de coesão e ângulo de atrito do material escavado e vão máximo do avanço da escavação.

Já o método de Barton define um parâmetro denominado Q, obtido do produto de seis fatores, obtidos de tabelas pré-definidas. Os seis fatores estão descritos abaixo:

- 1) Índice RQD, da qualidade da rocha [%];
- 2) Grau de fraturação do maciço J_n , ponderado de acordo com o número de famílias de descontinuidades presentes e a sua posição relativa;
- 3) Estado das descontinuidades J_r , segundo a rugosidade;
- 4) Grau de alteração das descontinuidades J_a , de acordo com o grau de alteração e preenchimento das descontinuidades;
- 5) Condições hidrogeológicas J_w , aferidas pelo caudal de água;
- 6) Estado de tensão *in situ* (SRF)

O índice Q pode ser decomposto em três relações: o tamanho médio dos blocos de rocha (RQD / J_n), a resistência ao deslizamento das descontinuidades (J_r / J_a) e o nível de pressão hidrostática (J_w / SRF). Após identificados cada um dos elementos, seus valores são relacionados de acordo com a seguinte fórmula:

$$Q = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w / SRF) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

J_a – Fator de classificações para o grau de alteração das descontinuidades

J_n – Fator de classificação para o número de descontinuidades

J_r – Fator de classificação para a rugosidade das descontinuidades

J_w – Fator de classificação para as condições hidrogeológicas

RQD – *Rock Quality Designation*

SRF – Fator de classificação para o fator de redução de tensões

Bienawski (1989) comenta que apenas um valor de classificação não é suficiente para determinar todas as situações a serem analisadas. No entanto, devem ser utilizados um conjunto de métodos, com a finalidade de se fazer uma análise conjunta para se ter um melhor resultado. Este autor destaca que é importante a apreciação de mais métodos para que se conheça cada vez mais as condições reais do empreendimento.

3.2. Escavações tuneleiras

Os túneis já existem na natureza anteriormente à civilização humana. Alguns seres vivos usam túneis como abrigo e local de locomoção. Desde a antiguidade as cavernas foram usadas como moradias por seres humanos.

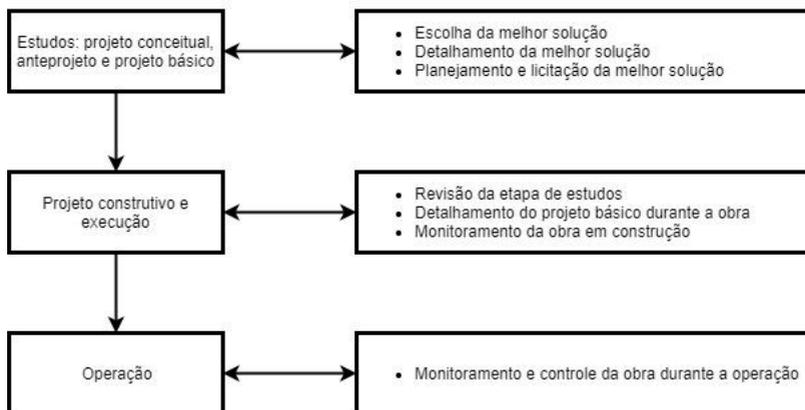
Alguns autores como Maild *et al.* (2008) e Redaelli e Cerello (1998) descrevem que os métodos modernos de escavação têm origem na engenharia de minas. Sua evolução foi acentuada por conta da implantação de ferrovias no século XIX e mais tarde por outros modais de transporte.

As atividades envolvidas para a construção de um túnel são muito variadas. Francis e Rocha (1998) sugeriram uma compilação de atividades e decisões que podem guiar a obra de um túnel. Seguindo os conceitos de implantação de projetos, os autores sugerem uma abordagem incremental de desenvolvimento, separando as atividades em projeto básico, execução e operação (Figura 9).

Francis e Rocha (1998) descrevem que durante o projeto básico são desenvolvidos os primeiros estudos e anteprojetos. Faz-se a escolha da melhor solução, detalhando-a para a futura contratação. Os projetos detalhados são considerados durante a execução, após uma revisão dos

estudos básicos. Ao final das obras, a operação deve monitorar e controlar a construção.

Figura 9 - Principais atividades e objetivos das etapas do empreendimento



Fonte: Francis e Rocha (1998).

Existem fatores técnicos (condições de solo/maciço, profundidade, extensão, forma, diâmetro e seção transversal) e outros não técnicos (custos, tempo, público e relações políticas). Cada escolha sobre as técnicas e atividades de escavação e revestimento causa consequências na flexibilidade, experiência, tempo, custo e outras características importantes do empreendimento. Isto se dá pelas diretrizes e condições (logísticas, geológicas, tecnológicas, contratual, etc.) únicas de cada obra.

Há diferentes métodos executivos que podem ser escolhidos para a execução do projeto de um túnel. Redaelli e Cerello (1998), Toma (2005), Maild *et al.* (2008) e Travagin (2012) descrevem uma árvore de escolhas sobre os métodos executivos, que acabarão por definir o projeto. A figura 10 mostra a classificação dos principais métodos executivos segundo Travagin (2012).

A decisão final sobre qual método deve ser utilizado é bastante complexa. Isto motivou a tese de Toma (2005), que propôs uma classificação de quais seriam os melhores cenários de projeto utilizando indicadores equilibrados (*balanced scorecard*). Ele criou um índice resultado de um somatório de fatores que indicam quais as opções mais eficientes para realizar determinada obra.

Figura 10 - Métodos Executivos de túneis



Fonte: Travagin (2012, adaptado)

3.2.1. Escavação NATM

O NATM (*New Austrian Tunelling Method*) surgiu através da evolução dos métodos de escavações mineiras e tuneleiras. O termo surgiu como uma distinção ao antigo método austríaco, que tinha por base o uso de troncos de madeira. Chapman, Metje e Stark (2010) descrevem sobre os austríacos Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller e Franz Pacher, que desenvolveram a técnica a partir da década de 1950.

Engenheiros da região da Áustria acabaram por consolidar a técnica na década de 1960, no intuito de padronizar a escavação e elementos de suporte do túnel. Este método é o mais comum para escavações sequenciais de túneis.

O uso desta técnica é considerado um ótimo modelo empírico de classificação e suporte de túneis. A técnica vem se desenvolvendo e tendo bons resultados desde os anos de 1970 (BARTON e BIENIAWKSI, 2008).

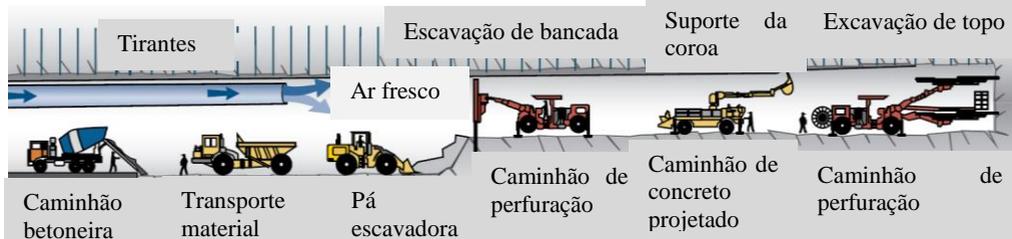
A técnica é amplamente utilizada no Brasil a partir da época supracitada, segundo Redaelli e Cerello (1998). Estes autores destacam duas obras pioneiras: a primeira do sistema de transmissão da SABESP, atravessando argila porosa; e a segunda do sistema metroviário de São Paulo, atravessando rochas brandas.

Considera-se o NATM um método observacional, onde atualmente aplicam-se várias práticas de investigação para conhecer a geologia local e desafios a serem superados. Campanhas de geologia (perfurações, sísmicas, testemunhos de rocha) auxiliam na interpretação de quais elementos serão cruciais na escavação de um túnel.

Geraldi (2011) descreveu que, em média, cada ciclo de escavação leva cerca de 13 horas para efetuar a marcação topográfica, o mapeamento geológico e a perfuração da frente. Após a explosão e checagem de pedras soltas (“bate-choco”) inicia-se a retirada do material escavado para fora do túnel com escavadeiras e caminhões. Após a escavação, o túnel pode receber as camadas de revestimento, normalmente em concreto projetado (*shotcrete*). A Figura 11 ilustra um esquema básico do método NATM.

No NATM é notável que o suporte se adapta muito bem às seções do túnel e às condições do maciço. Podem-se aplicar túneis circulares, ou com trechos retificados (forma de ferradura, por exemplo), mas prefere-se o formato ovalado por conta de seu melhor desempenho estrutural com custos baixos (BTS, 2004).

Figura 11 - Processo de construção NATM



Fonte: Ehrbar (2008), traduzido.

O uso do NATM possui algumas desvantagens, como uma possível necessidade de tratamento do terreno, *overbreaking*, infiltração de águas e necessidade de imediato suporte em rochas com baixa capacidade resistente. Este último caso requer a parada do avanço da frente de escavação para que o concreto projetado seja executado. Isto representa uma perda de produtividade.

A infiltração de água também representa um problema para o revestimento. Souza (2012) ressaltou que podem aparecer goteiras em pontos com menor espessura ou de surgência de água. Neste caso,

medidas alternativas como mantas impermeabilizantes podem ser utilizadas, porém com custos adicionais de implantação.

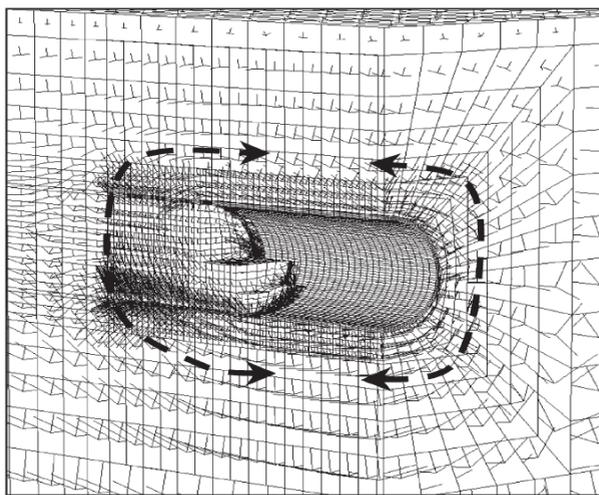
3.2.1.1. Princípios do NATM

O Método NATM baseia-se em 22 princípios fundamentais dos quais destacam-se os 7 principais a seguir (BIENIAWSKI, 1989):

3.2.1.1.1. Mobilização da força ao redor do maciço

Um dos principais princípios do NATM é a consideração do próprio maciço como suporte, uma vez que os materiais circundantes ao túnel escavado servem como escoramento com deslocamentos muito pequenos. Este mesmo princípio considera o alívio de tensões controlado, com a transferência de carregamento para o revestimento. A Figura 12 demonstra este princípio, de modo que se tenha uma melhor mobilização dos esforços ao redor da escavação.

Figura 12 - Mobilização dos esforços para regiões ao redor do maciço



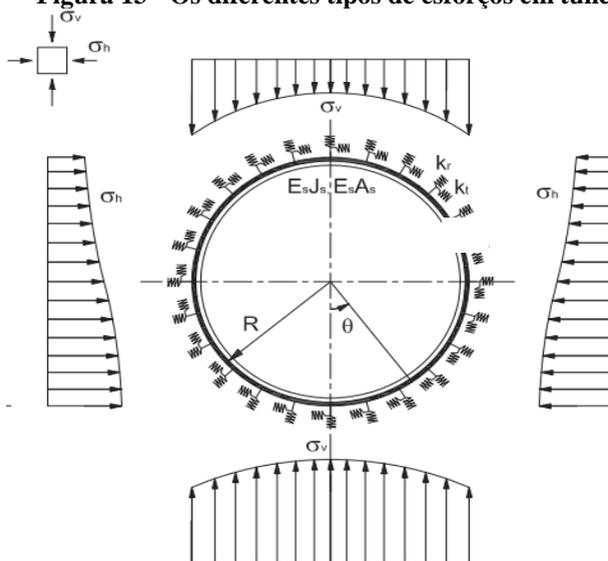
Fonte: BTS (2004)

Em casos como boas rochas, a espessura e o momento fletor atuante em um revestimento são pequenos quando comparados com a

mobilização dos arredores do maciço (CHAPMAN, METJE E STARK, 2010).

Para se obter um melhor resultado de mobilização, além da janela de tempo de aplicação do revestimento, a geometria da seção transversal exerce uma influência relevante. Observa-se que a geometria de um túnel circular não é a mais apropriada para revestir um túnel. Conforme a Figura 13 ilustra, neste caso os esforços não são lineares ao longo do contorno da escavação. Na mesma figura, os elementos σ_v e σ_h representam as pressões verticais e horizontais, respectivamente.

Figura 13 - Os diferentes tipos de esforços em túneis



Fonte: Vu, Broere e Bosch (2017)

Onde:

E_s – Módulo de elasticidade do terreno

k_r – Rigidez radial

k_t – Rigidez transversal

R – Raio do túnel

σ_h – Pressão horizontal

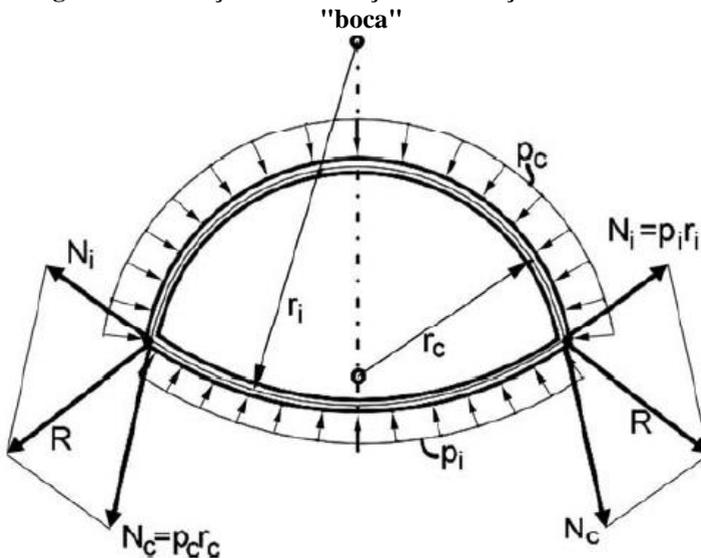
σ_v – Pressão vertical

Kolymbas (2005) sugere que a geometria da seção transversal em forma ovalada (Figura 14) pode favorecer a distribuição de esforços. A pressão lateral cresce à medida que o túnel se aprofunda. Já a pressão

na parte inferior não é uniforme (ou quase linear) como nas laterais. O autor ainda comenta que o túnel se assemelha à uma ponte de tijolos, onde o peso do que está acima é suportado pela parte mais baixa das paredes.

Para melhor acomodar estes esforços com a seção desejada do túnel, faz-se uma maior seção superior e outra menor abaixo, ambos em forma de arco. Este arco inferior (*invert*) fará as reações dos esforços da seção superior. Elementos de suporte como micro estacas podem ser empregados na base da seção superior.

Figura 14 - Direções dos esforços numa seção em forma de "boca"



Fonte: Kolimbas (2005)

3.2.1.1.2. Proteção com concreto projetado

Um segundo princípio de destaque no NATM é que se deve aplicar revestimento de suporte ao maciço com um certo atraso de tempo após a escavação. A aplicação mais comum do revestimento consiste do uso de concreto projetado (Figura 15), feito com o jateamento de concreto no entorno da escavação. Isto gera um suporte primário e uma segurança contra eventuais desprendimentos de rochas, permitindo a continuidade da escavação com segurança.

Figura 15 - Aplicação do concreto projetado



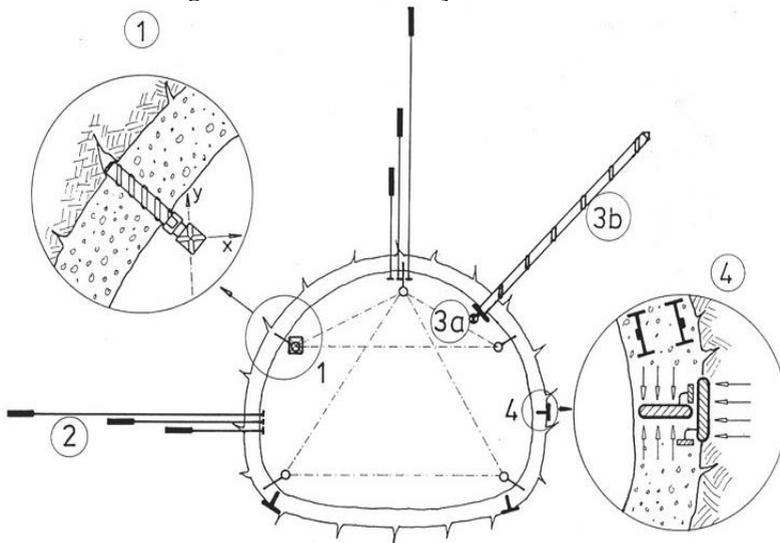
Fonte: Schubert (2015)

3.2.1.1.3. Instrumentação de medição

Outro princípio importante do NATM é a medição contínua dos efeitos da escavação.

A construção com o NATM requer que os movimentos do maciço sejam acompanhados por instrumentos de medição nas proximidades da frente de escavação. Os principais instrumentos, indicados na Figura 16, são: pinos de convergência (1), extensômetros (2), monitores de tirantes (3) e medidores de pressão (4).

Figura 16 - Instrumentação em um túnel



1. Medição dos deslocamentos perimetrais
2. Medição dos deslocamentos ao redor do túnel
3. Monitores dos tirantes
4. Monitoramento do concreto projetado

Fonte: Maidl *et al.* (2012)

3.2.1.1.4. Suporte flexível

O NATM utiliza-se do alívio de tensões antes de aplicar o suporte do túnel. Esta técnica também é destacada mais à frente no item 3.3.1. Método de Convergência x Confinamento.

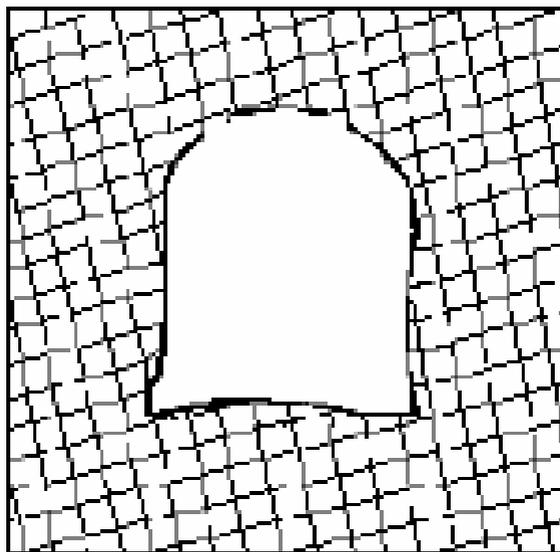
O revestimento de concreto projetado tem um comportamento esperado de deformação. Isto diminui a necessidade de resistência do revestimento. As deformações são controladas através da aplicação de uma sistemática de instrumentação.

Em geral, a principal capacidade de suporte se dá através dos tirantes, telas e barras de aço. O concreto atua apenas passivamente como suporte da escavação e se deforma para se adaptar aos esforços do maciço.

3.2.1.1.5. Fechamento do *invert*

Como o revestimento das paredes sobrecarrega suas fundações (Figura 17), há o aparecimento de esforços na região inferior do túnel, denominada *invert*. A colocação de algum material para resistir a estes esforços é importante, mesmo que temporariamente. Este tempo para a colocação em caso de rochas pode ser adiado, conforme fornecido pela verificação de "convergência x confinamento".

Figura 17 - Esforços no *invert* de um túnel tipo ferradura



Fonte: Bastos (1998)

3.2.1.1.6. Arranjos contratuais

Um outro princípio imprescindível do NATM é a consideração de que arranjos contratuais sejam permitidos no contrato. A possibilidade de alterações nos contratos deve refletir as incertezas geológicas do ambiente real que podem diferir das situações daquilo planejado nos modelos adotados na fase de projeto.

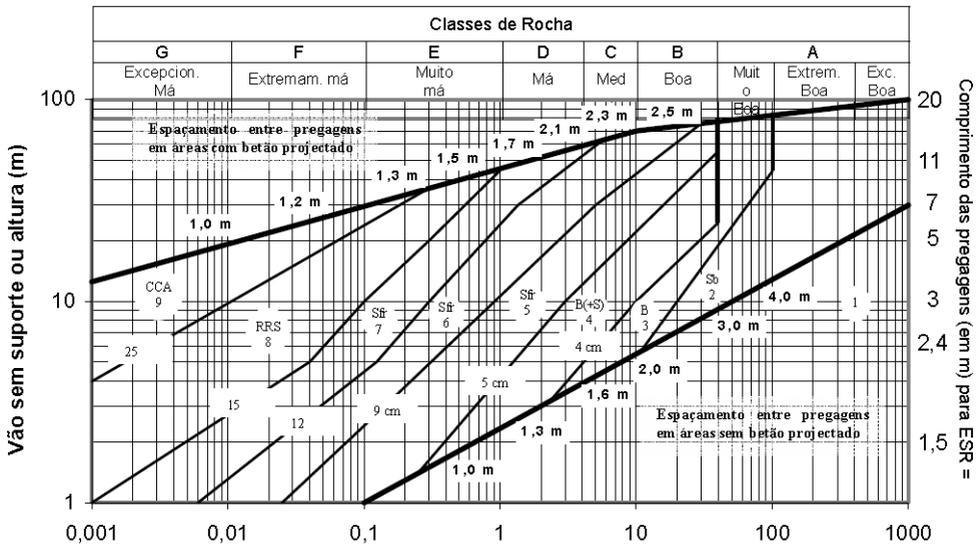
Neste caso, destaca-se a importância dos resultados da instrumentação, que além de verificar a segurança da escavação podem identificar se o modelo adotado está correto ou se há indícios de

situações imprevistas que merecem efetuar alguma alteração no projeto. De fato, estas alterações são bastante frequentes neste tipo de projeto. Por isso, arranjos já devem ser previstos para permitir os ajustes no contrato.

3.2.1.1.7. Indicação de suporte através da classificação do maciço

Por fim, ressalta-se como um importante princípio no NATM a indicações dos elementos de suporte com base nos sistemas de classificação geomecânica. Os suportes adicionais podem ser telas metálicas, tirantes, enfilagens ou cambotas metálicas. A escolha destes elementos ocorre através da pontuação do índice RMR ou Q do maciço. A Figura 18 ilustra o esquema gráfico proposto por Barton (1998), um gráfico bi logarítmico que indica quais elementos de suporte devem ser utilizados, conforme o índice Q e as características do vão livre e do terreno encontrado. Quanto melhor o terreno (Q mais elevado), menos intervenções serão necessárias.

Figura 18 - Gráfico de classificação de maciços rochosos



Fonte: Barton, Lien e Lunde (1974) *apud* Bastos, 1998.

CATEGORIAS DE REFORÇO

- | | |
|---|--|
| 1) Sem Suporte | 5) Concreto projetado com adição de fibras e tirantes, 5-9 cm, Sfr+B |
| 2) Tirantes localizados, sb | 6) Concreto projetado com adição de fibras e tirantes, 9-12 cm, Sfr+B |
| 3) Tirantes sistemáticos, B | 7) Concreto projetado com adição de fibras e tirantes, 12-15 cm, Sfr+B |
| 4) Tirantes sistemáticos e uma camada de concreto jateado, 4 – 10 cm), B(+S) | 8) Concreto projetado com adição de fibras e tirantes, >15 cm + armadura de aço + tirantes, Sfr+RRS+B |
| | 9) Concreto moldado no local, CCA |

Algumas vezes as intervenções de suporte não são suficientes e precisam de intervenções no terreno como, por exemplo, tratamentos especiais do maciço com o uso de enfilagens, tirantes, *grout* ou concreto moldado no local (*cast in place*).

3.2.1.2. *Drill and Blast*

Nas escavações em rocha, o NATM normalmente usa a técnica *drill and blast*, que se traduz em perfuração e detonação. Isto quer dizer que o maciço a ser escavado será perfurado e depois explodido. Esta é uma maneira de se avançar o túnel através de rochas desde baixa resistência (gesso, sedimentares) até as mais duras (granitos, gnaisse, basalto ou quartzito). (CHAPMAN, METJE E STARK, 2010).

No *drill and blast*, estabelece-se uma distribuição de furos na frente de escavação que serão preenchidos com explosivos a serem acionados pelos detonadores. Esta configuração define um plano de fogo para cada tipo de escavação e seção. Os furos com os explosivos são detonados em tempos diferentes. Isto direciona as pressões geradas pela explosão, como o objetivo de facilitar a escavação do material.

Utilizam-se equipamentos chamados “jumbos” (Figura 19, também chamados de “*boomer*”) para fazer a perfuração. Estas são máquinas possuem braços mecânicos que conseguem perfurar a rocha na frente de escavação nos locais pré-estabelecidos pela topografia. A mesma máquina também realiza o furo e inserção dos tirantes para o suporte definitivo.

Figura 19 - Perfuratrizes do tipo *jumbo*, usadas em túneis



Fonte: Kolymbas (2005)

Esta foi a técnica utilizada para a escavação de alguns túneis na BR-116 em São Paulo. Como o trecho desta rodovia era muito acidentado e cercado por mata atlântica nativa, acabou por ter algumas seções em túneis. A foto da Figura 20 foi realizada durante uma visita técnica do autor. Podem ser vistos o jumbo de perfuração e as marcações para perfuração e inserção dos explosivos.

O processo de detonação do maciço requer que a paralização de todas as atividades ao longo do túnel. Por conta da explosão há um grande barulho e pressão que obrigam a todos os trabalhadores a saírem do túnel. Nenhuma pessoa pode ficar exposta a esse evento por motivos de saúde e segurança. A explosão gera um grande volume de gases provenientes tanto dos explosivos quanto das próprias rochas. Parte dos gases são tóxicos, impossibilitando a presença de trabalhadores. Assim, o reinício dos trabalhos é impossibilitado até que estes gases sejam expelidos.

Após a explosão e a exaustão dos gases, é feita a retirada das pedras mais salientes com auxílio de um martelo hidráulico. Esta técnica, chamada de “bate-choco”, é usada nos arredores de onde foi realizada a explosão, com finalidade de soltar pedras que possivelmente se movimentariam posteriormente.

Figura 20 – Marcações dos furos para escavação e colocação de tirantes



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Como pontos negativos da técnica *drill and blast* destacam-se ruídos, pressões, gases, *overbreaking* (explosão exagerada) e riscos à segurança.

Quando ocorrem estes *overbreakings* (sobrescavações), a explosão pode afetar o maciço de forma exagerada. Isto pode ocorrer pelo de excesso de explosivos ou por conta de condições geológicas encontradas. Nestes casos pode ser necessárias correções como grouting, ou que tirantes adicionais tenham de ser instalados.

A Tabela 1 apresenta a produção de perfuração com outros equipamentos comumente utilizados para realizar os furos de um plano de fogo.

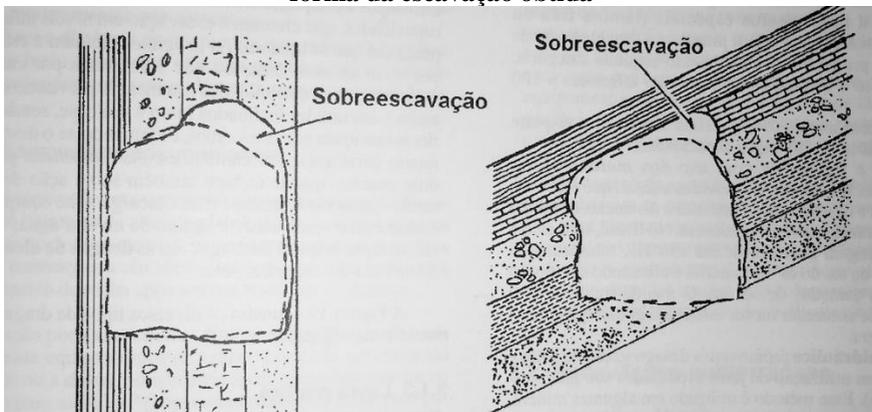
Tabela 1 -Tipos de equipamentos de furação para desmante

Tipos	Peso do Martelo (kg)	Diâmetro do furo (mm)	Produção de perfuração (m/h)	Produção de desmante (m ³ /h)
Marteletes manuais				
Leves	< 18	40 - 36	4	3
Médios	18 - 24	40 - 36	5	4
Pesados	24 - 34	40 - 36	6	5
Carretas de furação				
Leves (sobre pneus)	35 - 45	73 (3")	8	40
Médias	45 - 60	88 (3 1/2")	10	70
Pesadas	60 - 70	102 (4")	15	100
Super	> 70	> 102 (> 4")	20	150

Fonte: Redaelli e Cerello (1998)

A saúde e segurança é um fator que tem grande relevância neste tipo de escavação, por conta da grande quantidade de riscos a que os trabalhadores são expostos. Ressalta-se que no NATM operando com *drill and blast*, o número de trabalhadores costuma ser mais alto que nas escavações TBM, aumentando a probabilidade de acidentes.

Figura 21 - Influência de condicionantes geológicas na forma da escavação obtida

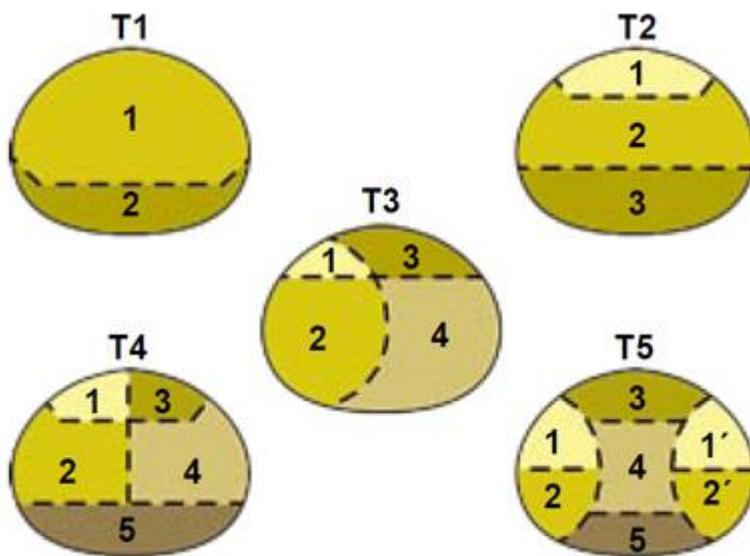


Fonte: Redaelli e Cerello (1998)

3.2.1.3. Parcialização da seção

No caso de a seção transversal escavada ser pequena, pode-se realizar em uma única etapa. Mas em caso de seções maiores (diâmetros acima de 6 metros, ou área acima de 60 m²), pode-se adotar uma escavação parcializada. Neste caso, uma ou mais áreas menores são escavadas com implantação simultânea de suportes (temporários e definitivos). Em sequência, uma nova parte da seção pode ser escavada com segurança.

Figura 22 - Parcialização da seção



Fonte: Pires, Alelvan, Assis (2016).

Isto permite o túnel possa ser parcialmente escavado, deixando um período para que possam ser adicionados suportes (temporários e/ou definitivos), facilitando a construção da seção desejada. Alguns destes sequenciamentos mais comuns podem ser vistos na Figura 22.

Um exemplo da parcialização de seção é o *sidedrift*, ilustrado na Figura 23. Primeiramente são escavadas as laterais, deixando dois túneis independentes. O concreto projetado é aplicado em todas as paredes. É notória a perda do material que faz o suporte temporário.

Neste caso específico, também é possível ver a preparação das enfilagens que estão sendo executadas na coroa da escavação.

Figura 23 - Sidedrift aplicado em um dos túneis da BR-116, serra do cafezal



Fonte: Arquivo pessoal do autor

3.2.2. Cut and Cover

A segunda metodologia de escavação discutida no presente trabalho é o método *cut and cover*. Este é um método mais simples e consiste na abertura de uma vala a partir da superfície que, após a retirada dos materiais, colocadas as estruturas de revestimento do túnel, é coberta novamente. A técnica é mais utilizada em túneis rasos (profundidades de 10-15 metros). Os elementos de suporte mais usados são paredes diafragma, pilares secantes, contíguos ou ainda outros métodos de suporte de paredes verticais (CHAPMAN, METJE E STARK, 2010). Muitos dos antigos túneis de Londres foram construídos desta forma (Figura 24).

Em termos de custos diretos, o *cut and cover* costuma ser um método mais barato de construção de túneis, reduzindo um pouco os custos de suporte. Por outro lado, este método gera um maior incômodo

por conta de interrupção de vias por onde passa, bem como interferências com vizinhos. Longas regiões podem ser cortadas por um longo período de tempo, trazendo um grande impacto para a cidade. Assim, quando computados os custos indiretos, o método *cut and cover* pode ser considerado economicamente mais desvantajoso. Chapman, Metje e Stark (2010) descrevem que mesmo a tentativa de ainda achar lugares para poços de ataque (*shafts*) ao meio de cidades pode parecer extremamente difícil e pode ditar o alinhamento de um túnel.

Figura 24 - Estação Canary Wharf em Londres, construída com o método *cut and cover*



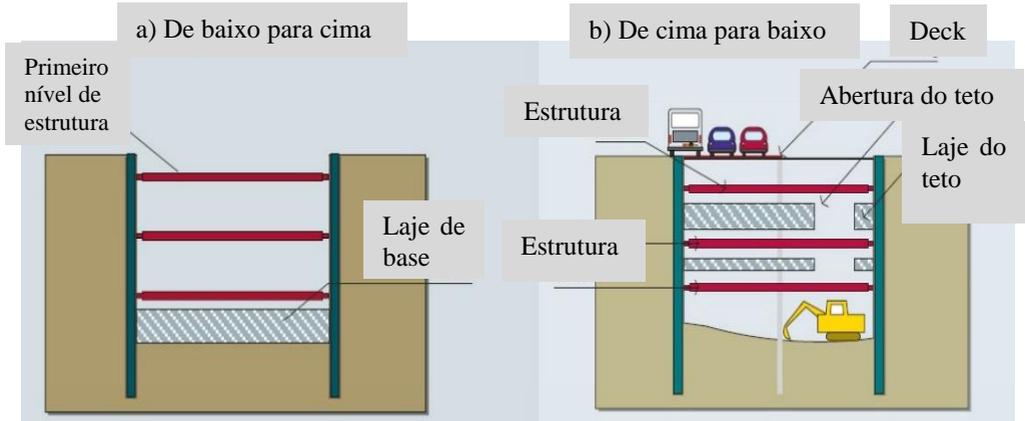
Fonte: Chapman, Metje e Stark (2010)

Na metodologia *cut and cover*, podem-se destacar duas alternativas: a execução “de cima para baixo” e “de baixo para cima” (Figura 25). No método “de baixo para cima” é realizada a escavação desde a elevação natural do terreno. São executadas paredes de servirão como suporte e limitação dos trabalhos dentro desta área. A escavação e infraestruturas são executados no local e recobertos ao final dos trabalhos.

Já o método “de cima para baixo” utiliza paredes e vigas como suportes. Um teto é construído para fechar a parte superior da

escavação. Isto serviria para devolver as condições de superfície, porém acaba por deixar as condições de trabalho mais restritas.

Figura 25 – Métodos *Cut and cover*



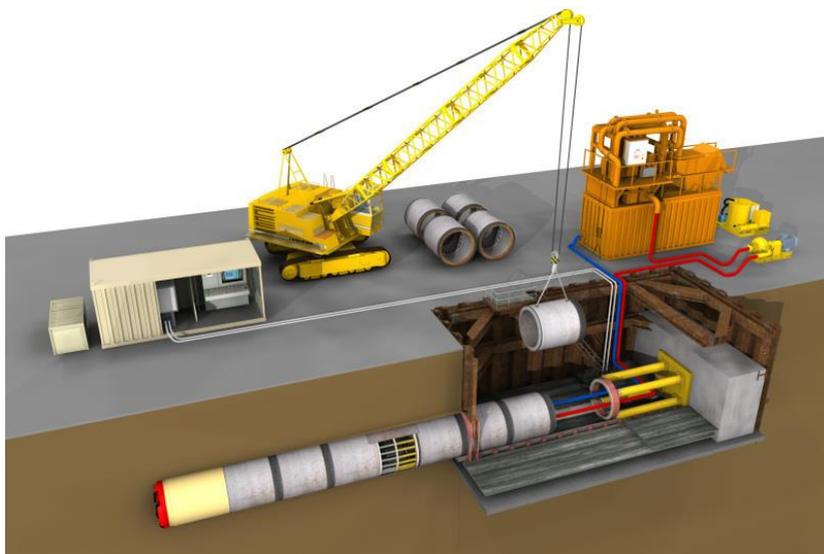
Fonte: Railsystem (2013).

3.2.3. Tubos cravados – *Pipejacking*

Outra metodologia importante de escavação de túneis é o *pipejacking* (ou tubos cravados), uma técnica boa para pequenos diâmetros de tubo e pequenas extensões. Nesta metodologia, um poço de visitas (ou de ataque) é utilizado como ponto de partida do túnel, e uma tuneladora de pequenas dimensões é usada para avançar a escavação.

O revestimento do túnel usado nesta técnica é formado por anéis pré-moldados justapostos. Cada segmento é colocado numa plataforma de lançamento, onde pistões irão empurrar o revestimento junto com todos os anéis a frente deste último (Figura 26).

Figura 26- Técnica de *pipejacking* (macaqueamento hidráulico)



Fonte: Emschergenossenschaft (2014)

Como será descrito adiante (3.4.2. *Cast in place*), pode-se achar difícil encontrar localizações dos poços de ataque (*shafts*) em zonas congestionadas de grandes cidades. Outra limitação é a fricção lateral das paredes que acaba por limitar as distâncias entre *shafts* a cerca de 500 metros (Royal *et al.*, 2010).

3.2.4. Escavação com uso da TBM

Por fim, será discutida a metodologia de escavação mecanizada com TBMs (*Tunnel Boring Machines*). Maidl *et al.* (2008) comentou sobre a evolução das escavações de túneis, citando que o setor ferroviário foi decisivo grande desenvolvimento tuneleiro a partir do século XIX. Devido à crescente demanda, as escavações manuais não eram mais pareis às necessidades de execução de projetos de túneis. Assim, começou-se a desenvolver métodos mecanizados para este trabalho.

Ao início, as máquinas tuneleiras não pareciam tanto com as TBM atuais. As primeiras máquinas tinham como objetivo maior quebrar (enfraquecer) o material a frente da escavação para posterior remoção. O trabalho era ainda semi-mecanizado, porém já apresentava vantagens em relação à escavação manual. Maidl *et al.* (2008) descreve que os primeiros pedidos de patente desta técnica foram requisitados em 1847.

Figura 27 - Imagens e fotografia da tuneladora do túnel St. Clair (1898)



Fonte: Lovat (2012)

O conceito do do *shield* começou a ser introduzido tendo como um dos objetivos a proteção dos trabalhadores na frente de escavação. A Figura 27 demonstra o túnel Saint Clair construído em 1898 em Michigan, fronteira dos Estados Unidos com o Canadá. Considerou-se como um avanço nos sistemas de escavações naquela época.

Pode-se perceber grande parte dos serviços sendo executados manualmente, inclusive com o uso de animais. A evolução de algumas técnicas favoreceu o aprimoramento do uso da TBM ao longo dos anos. Atualmente as TBMs realizam as atividades de escavação, remoção de resíduos e revestimento com grande uso de mecanização.

Os diâmetros escavados têm sido cada vez cada vez mais arrojados. Uma comparação dos diâmetros máximos utilizados foi feita por Lovat (2012), comparando os diâmetros de 6,0 m no metrô de Washington DC para 19 m em São Petesburgo, na Rússia (Figura 28).

Figura 28 - Evolução das escavadoras TBM



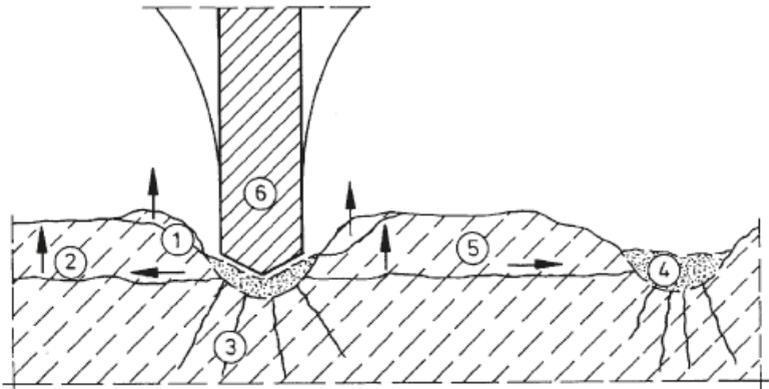
Fonte: Lovat (2012)

Outro grande avanço no mecanismo das TBMs foi a utilização de uma cabeça escavadora giratória, cujo torque acionador é obtido

através de motores elétricos, forçando uma engrenagem central para a rotação da cabeça de corte. O maciço a frente da cabeça de corte é ao mesmo tempo triturado, escavado e transportado para a parte posterior da TBM. A força que deve ser aplicada na cabeça de corte é muito grande, tanto para a rotação quanto para o empuxo de avanço. Lovat (2012) cita o exemplo do túnel de São Petesburgo, onde uma TBM de 3.600 KW de potência foi necessária.

Outra solução importante adotada nas TBMs foi a utilização de discos de corte para casos de rochas. Os discos são dispostos ao longo da cabeça e corte giratória, fazendo um efeito lasqueamento da rocha entre duas linhas de passagem dos discos de corte, proporcionando o processo de desmonte controlado do maciço. Isto é demonstrado pela Figura 29.

Figura 29 - Diagrama do processo de corte com uso de um disco de largura constante



1. Quebra por tensão da fratura
2. Esforço cortante ou tensão de separação da fratura
3. Formação de fissura radial abaixo do disco
4. Material fluindo para fora da trilha do disco
5. Tamanho típico de uma das maiores pedras
6. Disco de corte com seção quase que constante na área de corte

Fonte: Maidl *et al.* (2012)

Há diferentes tipos de TBM, sendo que o tipo adequado de máquina depende das características locais e de projeto que o cliente deseja. O fator preponderante desta escolha são o tipo do maciço a ser

atravessado, cuja qualidade e resistência são decisivos para a escavação e escolha do revestimento. Maidl *et al.* (2012) descrevem as principais alternativas de TBM, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Escopo da aplicação e princípio fundamental da TBM

TIPO DE ROCHA	ROCHA SOLTA	ROCHA DURA			
		médio	médio-duro	duro	muito duro
Propriedades da rocha	macio	médio	médio-duro	duro	muito duro
Resistência à compressão	baixa	até 60N/mm ²	60-120 N/mm ²	120-220 N/mm ²	> 220 N/mm ²
Perfil de escavação	circular / oval	circular / oval / ferradura / trapézio		circular	
Tipo de escavação	Total / Parcial / hydrojet	Total / Parcial		Total	
Sistema de corte	Oscilante / Rotativo	Rotativo / Engrenagens			Jato d'água / rotativa
Ferramentas de corte	Corte	Corte / Discos de corte	Esmagamento / Corte com jato / Discos / Rollers		Discos / Rollers
Movimento de avanço	Hidráulico / Esteira	Máquina de movimentação / Esteira		Máquina de movimentação	
Força para roda de corte	Elétrico / Hidráulico	Elétrico / Hidráulico / Eletromecânico			Elétrico / Eletromecânico

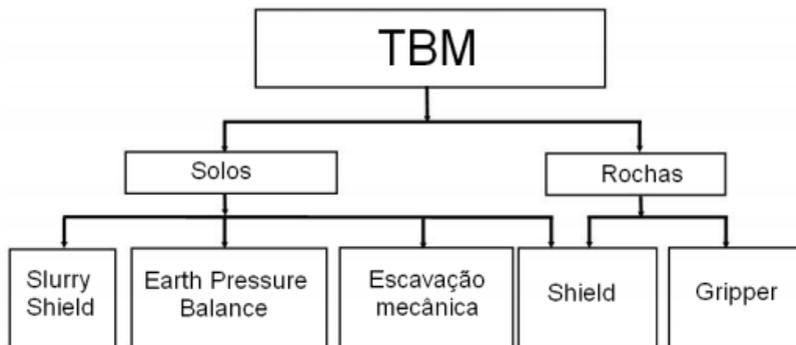
Fonte: Maidl *et al.* (2012)

Em seus estudos sobre tuneladoras, Celestino (1995) ressalta o risco de problemas que o contratante pode encontrar frente aos imprevistos geológicos que podem ocorrer. A própria recuperação de uma tuneladora tanto ao final da obra, quanto em situações de travamento durante a escavação são situações de risco elevado. Assim, Celestino (1995) recomenda que se observe bem as condições geológicas e que se discuta este tipo de situação em fase contratual.

Travagin (2012) é um autor brasileiro que descreveu subsídios para escolher as máquinas TBM. O autor tentou reunir os princípios

funcionais de cada uma das opções de escavadora, conforme ilustrado na Figura 30. A decisão costuma se dar pelo tipo de terreno enfrentado, notoriamente dividido em solos e rochas.

Figura 30 - Classificação das máquinas tuneladoras



Fonte: Travagin, 2012.

Para o caso de túneis em solos, os terrenos costumam ter menor coesão e resistência. Dependendo das condições, pode ser sugerido o uso de slurry shield ou EPB (Earth Pressure Balance). Nestes dois casos, a frente de escavação requer uma câmara pressurizada, balanceando os esforços do maciço e evitando um colapso. Travagin (2012) ainda descreve as opções de escavação mecanizada (roda escavadora ou *roadheader*) e de uso de shield. No caso de rochas, Travagin (2012) descreve as opções de uso de *shield* (aberto, parcial, fechado) ou de uma *gripper*.

Em geral, verifica-se que a escavação com máquinas tuneladoras traz um fator de segurança muito grande por conta da estabilização da frente de escavação. Isto minimiza a exposição de trabalhadores a áreas escavadas ainda sem suporte.

Na tuneladoras, as atividades de escavação são sucedidas pela execução simultânea do revestimento. Isto quer dizer que não há intervalos entre a escavação e revestimento, diminuindo o tempo total de execução (especialmente quando comparamos os tempos de preparo do NATM). A execução do revestimento com TBMs consiste da colocação das aduelas pré-moldadas, e de preenchimento de vazios com *grouting*. Com isto, passa-se somente uma vez (*single pass*, não há parcialização da seção) para realização de suporte e revestimento, favorecendo o progresso do túnel.

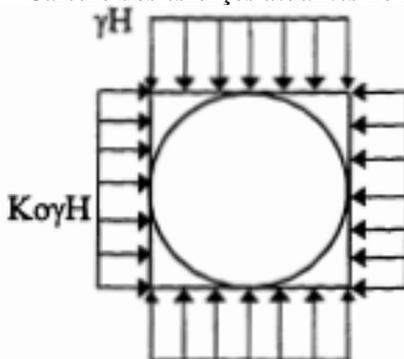
Os itens adicionais para auxiliar os sistemas de escavação, de remoção e de revestimento são incluídos no *backup*, um conjunto relativamente longo situado na parte traseira da TBM. Lovat (2012) descreve que são muitos os sistemas auxiliares envolvidos e assim se assemelha a uma fábrica andante, onde o túnel é o produto final.

O uso da TBM implica num custo inicial maior e num maior preparo na especificação da máquina e dos seus operadores. O tempo de aquisição, transporte e importação representa um prazo relevante na fase inicial da obra. De outro lado, Lovat (2012) também esclarece que a maior parte do problema da escavação fica “praticamente resolvida”.

3.3. Sistemas de suporte

Existem diversos métodos de cálculo de esforços no maciço e no revestimento de um túnel. Um dos métodos mais simples de determinação dos esforços atuantes no revestimento de túneis considera apenas o peso da camada acima do túnel, obtendo a pressão lateral como uma fração da pressão vertical (Figura 31). Ressalta-se que além das pressões do terreno as pressões por conta de nível de água devem ser consideradas. Cálculos mais precisos podem ser realizados em análises 2D (duas dimensões) de uma seção de túnel com softwares de elementos finitos (por exemplo, Plaxis 2D e Phase2).

Figura 31 - Cálculo dos esforços atuantes no revestimento



Fonte: Kim (1997).

Em túneis profundos, a cobertura do terreno pode superar em muitas vezes as dimensões da seção transversal. Kim (1997) e Vu,

Broere e Bosch (2017) destacaram os conhecimentos de Terzaghi (1962) sobre arqueamento, descrevendo que a zona de influência do arqueamento acima de um túnel é de 2 a 3 vezes as dimensões médias da seção transversal (B e H, Figura 32). Estes autores sugerem as seguintes fórmulas para cálculo de esforços e cargas:

$$P = (1/2) \gamma H \{ (1 + K_0) + (1 - K_0) \cos 2\Theta \} \quad \text{Equação 2}$$

$$T = P R \quad \text{Equação 3}$$

$$T_s = \gamma H R \quad \text{Equação 4}$$

$$T_{c,i} = \gamma H K_0 R \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

H – Altura da cobertura de rocha do túnel

K_0 – Coeficiente de pressão neutra do solo

P – Pressão radial

T – Carga do revestimento

T_s – Carga do revestimento nas laterais

$T_{c,i}$ – Carga do revestimento na coroa e no *invert*

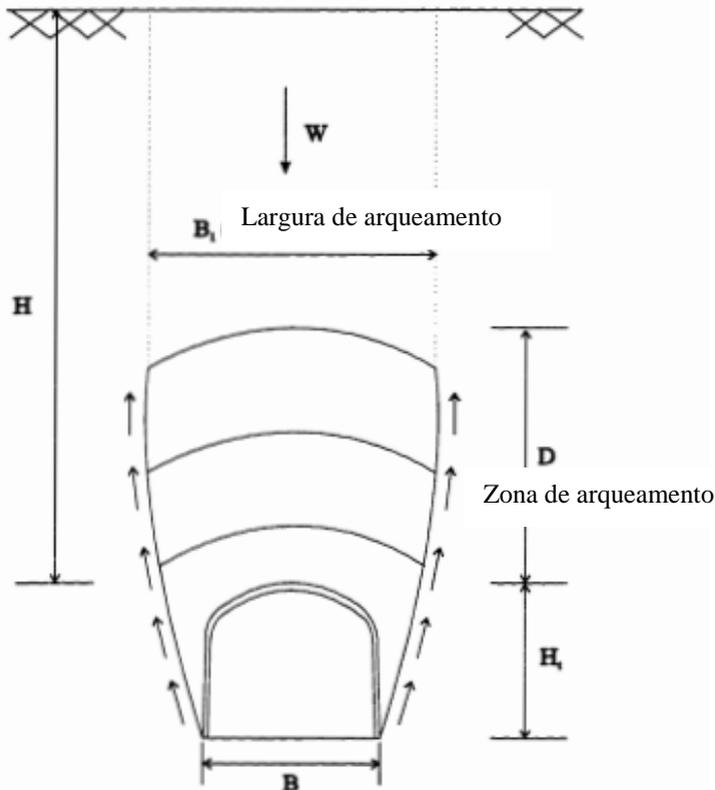
Θ – Ângulo do ponto de estudo com o eixo de cálculo

γ – Peso específico do solo

A cobertura do túnel pode superar em muitas vezes seu raio. Kim (1997) destacou dos conhecimentos de Terzaghi (1962) sobre arqueamento, descrevendo que a zona de influência do arqueamento acima é de poucas vezes o raio do túnel.

Observa-se, porém, que a problemática de redistribuição de tensões no entorno de um túnel não é um simples problema bidimensional. A análise tridimensional deve ser considerada principalmente em termos do avanço da escavação e da aplicação do revestimento. De fato, o método da convergência-confinamento, discutido no item 3.3.1. Método de Convergência x Confinamento, consegue incorporar o efeito tridimensional com bases em análises bidimensionais.

Figura 32 - Fatores de influência das solitação das cargas



Fonte: Terzaghi *in* Kim (1997)

Onde:

B – Largura da base do túnel

B_0 – Largura da área de arqueamento

D – Altura de influência do arqueamento

H – Altura da cobertura de rocha do túnel

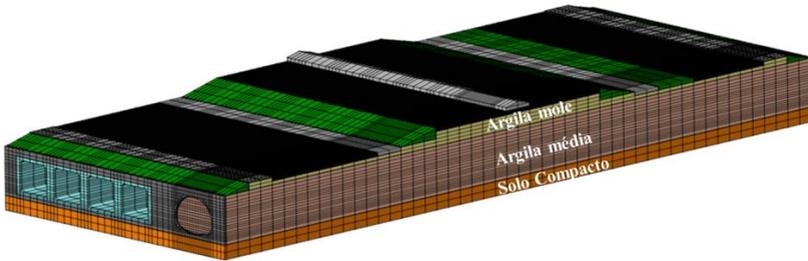
H_0 – Altura do túnel

W – Pressão exercida pelo peso do solo

Outra situação de interesse diz respeito a escavações em faixas de transição entre diferentes materiais (solos ou rochas), como descrito mais à frente no item 5.1. Túnel da Via Expressa Sul – Florianópolis, SC. Esta situação requer uma análise tridimensional mais refinada com

softwares de elementos finitos (por exemplo, Midas GTS, Figura 33), levando em conta o posicionamento de todo o maciço.

Figura 33 - Contribuição de consecutivas seções para o cálculo sequencial da escavação



Fonte: Pierre (2018).

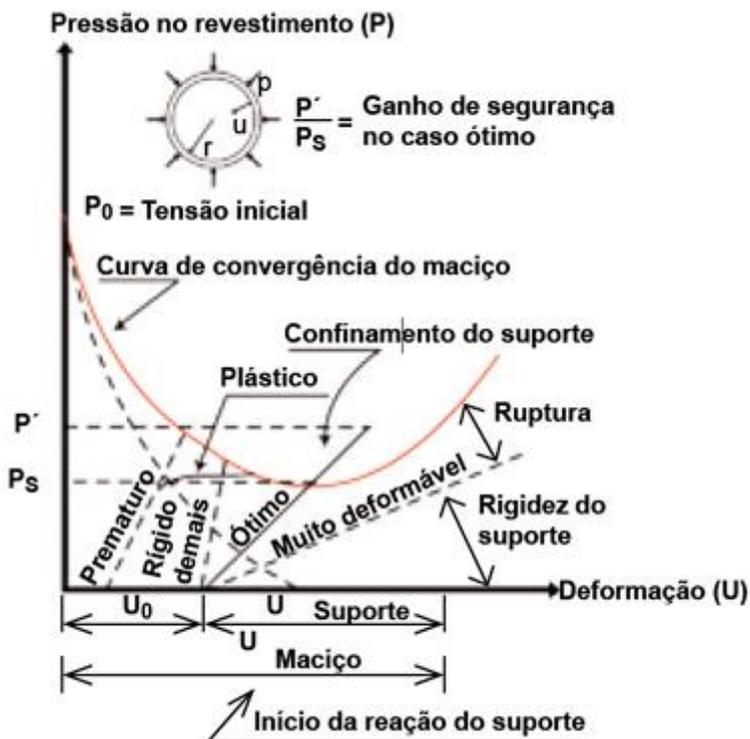
3.3.1. Método de Convergência x Confinamento

Uma das questões básicas durante a escavação de túneis diz respeito à determinação do momento de aplicação do revestimento no túnel escavado. Um artifício para obter melhores resistências do maciço que circunda a escavação é a técnica de convergência x confinamento (Figura 34), que permite definir o tempo até o revestimento seja aplicado após a escavação, economizando na estrutura que irá enfrentar menores esforços devido ao alívio das pressões internas ocasionadas pelo maciço.

Almog, Mangione e Cachia (2015) descrevem em seu artigo detalhes de como calcular estes relaxamentos de solos, utilizando a técnica de convergência x confinamento. O caso descrito foi a construção de um túnel na área central de Hong Kong utilizando uma TBM e revestimento de aduelas de concreto. Os autores ilustraram a aproximação obtida dos valores do ponto ideal de equilíbrio entre a pressão do revestimento e o respectivo efeito no maciço relaxado.

Em geral, devido ao alívio das tensões internas do maciço, com a técnica convergência x confinamento é possível considerar que o revestimento precisará de uma menor espessura para resistir ao terreno escavado.

Figura 34 - Gráfico Convergência x Confinamento



Fonte: Portal Metalica Construção Civil (2017)

Onde:

P' – Pressão no revestimento ótima

P_0 – Tensão inicial

P_S – Tensão no suporte

U_0 – Deformação inicial

U_{Suporte} – Deformação do suporte

$U_{\text{Maciço}}$ – Deformação total do maciço

3.3.2. Pregagem e ancoragem passiva

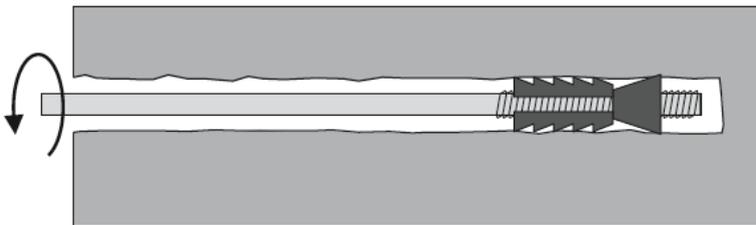
Estes métodos de suporte atuam passivamente conferindo ao maciço resistência ao cisalhamento evitando movimentações excessivas. Em geral, estes tipos de suporte são realizados em furos desde 4 até 12

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.

3.3.3. Tirantes

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 todo desses 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 travação do tirante aplicando uma pós-tensão. A Figura 35 demonstra um desenho de um destes elementos.

Figura 35 - Desenho esquemático de um tirante



Fonte: Kolymbas (2005).

Para melhorar as condições de manutenção do equipamento, aplica-se calda cimentícia por toda a extensão do furo. Como foi descrito no item 3.2.1.1.7. Indicação de suporte através da classificação do maciço, o atirantamento pode ser sugerido de forma sistemática ao longo de um trecho de seções transversais.

Com o uso desta técnica, além de proporcionar o efeito do arqueamento, pode-se redistribuir tensões superficiais para as partes mais internas do maciço envolvente. A Figura 36 mostra como as placas de fixação dos tirantes podem segurar telas de aço, ajudando a redistribuir os esforços.

Figura 36 - Placa de tirante servindo como suporte à telas de aço



Fonte: Kolymbas (2005).

3.3.4. Concreto Projetado

Figueiredo (1992) descreve esta técnica como um concreto que é projetado em alta velocidade se auto compactando sobre uma superfície. O concreto aplicado atinge resistências de 5 Mpa em cerca de 10 horas, oferecendo uma frente de trabalho segura. A versatilidade do material pode ser percebida pelo grande número de aplicações como revestimentos, contenção de taludes, reforços, impermeabilização, elementos autoportantes e ainda outras formas.

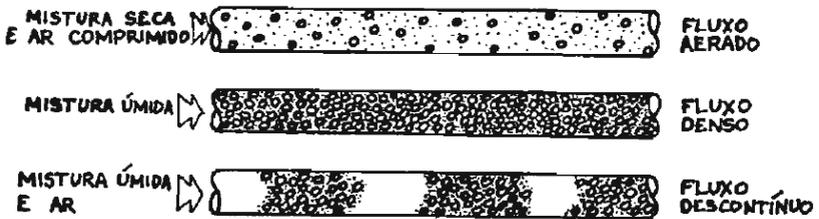
O concreto projetado é um elemento muito utilizado em escavações tuneleiras, como já descrito anteriormente. Esta técnica tem grande aplicação junto do método NATM, que usualmente requer a aplicação deste material como revestimento de suporte do túnel.

Conforme discutido no item 3.2.1.1. Princípios do NATM, as espessuras de concreto projetado variar de 5 a 25 cm de cobrimento, dependendo do projeto.

A facilidade e versatilidade do concreto projetado acaba por gerar economia em uma obra. A redução no uso de insumos é notória uma vez que as espessuras de paredes são de 15% - 50% menores que o revestimento em *cast in place* e aduelas pré-moldadas.

O fato de o concreto ser projetado influi na sua resistência final e a eventual dificuldade na compactação da massa pode reduzir seu módulo de Young e sua resistência final. Medidas alternativas podem ser tomadas para aumentar as resistências do revestimento, como o uso de microfibras e telas para melhorar a aderência e o desenvolvimento de fissuras. As fibras são misturadas no concreto segundo uma dosagem específica para aumentar a resistência. Existem também eretores de telas que as posicionam junto à face do suporte, auxiliando contra esforços radiais.

Figura 37 - Tipos de fluxo de concreto no mangote



Fonte: Figueiredo (1993).

Figueiredo (1992) e Nakamura (2013) descrevem que há duas vias de aplicação do concreto projetado, a via seca ou úmida. Na via seca, o concreto é levado à máquina de projeção ainda seco, misturando água somente no bico de projeção (salvo se não houver pré-umedificação). Na via úmida, o concreto já vem preparado com mistura de água anterior à projeção.

A Figura 37 faz uma representação de diferentes tipos de fluxo no mangote de projeção. O fluxo aerado só é realizado com a mistura seca, enquanto os fluxos densos e descontínuos são alcançados com a via úmida. Estas formas de aplicações têm diferentes características e resultados, como podem ser vistos na Tabela 3 - Comparativo de métodos de projeção de concreto.

Tabela 3 - Comparativo de métodos de projeção de concreto

Fator	Projeção via seca	Projeção via úmida
Equipamento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Menor investimento total. ■ Manutenção simples e pouco frequente. ■ Fácil operação. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Menos equipamentos no local de trabalho. ■ Menor desgaste de bico, mangueiras e bomba para a mesma produção. ■ Consumo de ar até 60% menor.
Mistura	<ul style="list-style-type: none"> ■ Na obra ou na usina. ■ Possibilidade de utilização de misturas pré-dosadas. ■ Desempenho alterado pela umidade da areia. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Na usina e apurada. ■ A umidade da areia não interfere no processo.
Produção e alcance	<ul style="list-style-type: none"> ■ Raramente ultrapassa os 5 m³/h no campo. ■ Pode transportar material a maiores distâncias. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 2 m³/h a 10 m³/h na projeção manual. ■ Até 20 m³/h na projeção mecanizada.
Reflexão	<ul style="list-style-type: none"> ■ 15% a 40% para paredes verticais. ■ 20% a 50 % para teto. ■ Ocorre formação de bolsões de material refletido. ■ Variação do traço na estrutura por perda intensa de agregado. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Baixa reflexão que pode ser menor que 10%. ■ Não ocorre formação de bolsões de material refletido. ■ Pequena perda de agregado.
Qualidade	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alta resistência devido ao baixo fator água/cimento. ■ Menor homogeneidade do material. ■ Depende da experiência da mão de obra. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Maiores dificuldades para obter grandes resistências (alto fator água-cimento). ■ Maior homogeneidade na qualidade.
Velocidades de impacto	<ul style="list-style-type: none"> ■ Maior com melhor adesão e facilidade de aplicação no teto. ■ Maior facilidade de compactação do material. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geralmente adequada para o emprego em túneis e minas. ■ Material menos compacto, geralmente.
Aditivos	<ul style="list-style-type: none"> ■ Em pó adicionado na betoneira, ou antes, na cuba de alimentação. ■ Líquidos adicionados no bico de projeção. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Utilizam-se apenas aditivos líquidos.
Poeira e névoa	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grande produção de poeira. ■ Dificuldade de visualização do trabalho. ■ Formação de ambiente insalubre em túneis (exige ventilação). 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pouca formação de poeira. ■ Melhor visibilidade. ■ Pode produzir névoa de aditivo líquido de alta alcalinidade e tóxica exigindo ventilação.
Versatilidade	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pode ser utilizada para jateamento de areia, projeção de argamassa e materiais refratários e recobrimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pode ser utilizada como sistema de bombeamento convencional de concreto.
Flexibilidade	<ul style="list-style-type: none"> ■ Facilidade de interrupção com pouca ou nenhuma perda de material. ■ Ajustável às condições da superfície (em presença de água). 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Exige planejamento cuidadoso para minimizar perdas por interrupção do trabalho. ■ Apresenta dificuldades de operação em superfície molhada (exige maiores teores de aditivos).

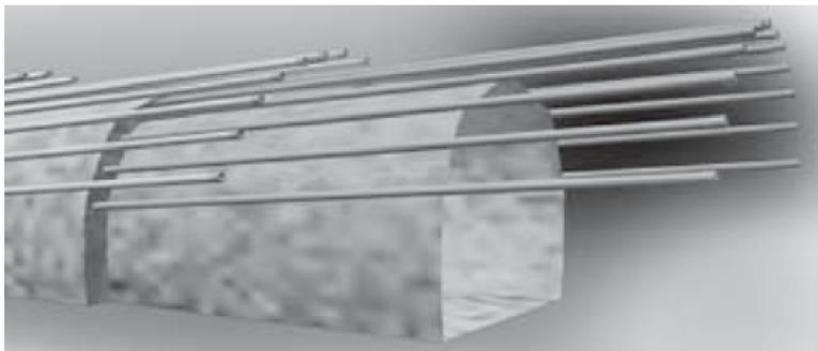
Fonte: Figueiredo (1992) *in* Nakamura (2013b)

3.3.5. Enfilagens

Caso o material a ser escavado tenha pouca consistência que não permita vãos sem suporte, podem ser executadas enfilagens. Usualmente, estas são realizadas em perfurações de 1,5 a 12 metros, distantes de 30 a 50 cm uma da outra (Fig. 38), onde barras de aço são inseridas e posteriormente recebem injeção de argamassa cimentícia sob

pressão. A união da argamassa entre as barras faz com que o conjunto funcione como uma laje (e não como vigas), permitindo a escavação imediata sob as enfilagens.

Figura 38 - Desenho do uso de enfilagens



Fonte: Kolymbas (2005).

3.4. Tipos de revestimentos tuneleiros

A escolha das técnicas aplicadas à construção de um túnel foi debatida no item 3.2. Escavações tuneleiras e, assim como outros fatores, a escolha do revestimento deve levar em conta as diversas diretrizes condicionantes do projeto. A Sociedade Britânica Tuneleira (BTS, 2004) apresenta uma síntese dos motivos para escolha da melhor solução do revestimento de um túnel, como extensão, qualidade do maciço, forças solicitantes, seção transversal, entre outros.

Na prática, a empresa contratada para executar o túnel normalmente subcontrata quem irá realizar o revestimento (BTS, 2004), transferindo o risco do projeto para a contratada. Uma outra abordagem seria de o cliente ter um contrato separado com o fornecedor do revestimento para se ter uma melhor negociação financeira, porém isto costuma aumentar o risco no projeto.

Neste estudo, foram apresentados alguns tipos de revestimento executados em túneis. A escolha pelo tipo de revestimento deve refletir no método executivo, custo, prazo e produto final (BTS, 2004). As técnicas que utilizam mais mão de obra (NATM) costumam ter progressos menores, enquanto o uso de máquinas TBM permitem taxas de avanços diários consideravelmente maiores.

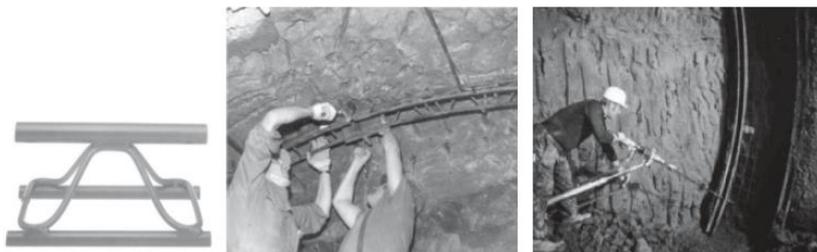
BTS (2004), Maidl *et al.* (2012) e Travagin (2012) ressaltam que os revestimentos mais comuns são concreto projetado, *cast in place* e placas pré-moldadas. Atualmente há uma forte tendência em evitar túneis urbanos que tenham usado concreto projetado como suporte primário sem um revestimento secundário aplicado sobre aquele. O concreto projetado e o *cast in place* são mais usados na escavação NATM, enquanto as placas pré-moldadas são mais usadas com as TBMs.

3.4.1. Cambotas

Cambotas são elementos formados por perfis metálicos longitudinais que têm a forma da seção superior do túnel e são aplicadas em sua periferia. Geraldi (2011) descreveu 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 metros. 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.

Geraldi (2011) também ressalta que esta técnica é usada com o NATM. Neste caso, utiliza-se a cambota com aço CA-50 soldado que funciona como uma longarina da seção escavada. Estas estruturas são colocadas a um espaçamento definido (novamente cerca de 0,60 a 0,80 metros) e recobertas por concreto projetado (Figura 39).

Figura 39 - Aplicação de cambotas



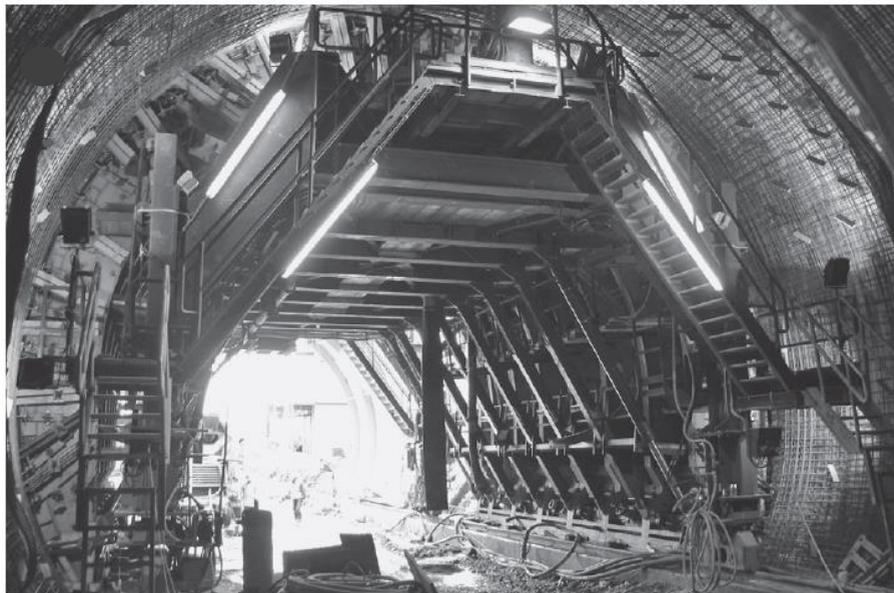
Fonte: Kolymbas (2007)

3.4.2. *Cast in place*

A concretagem no local, ou *cast in place*, é um elemento que pode ser tanto o suporte primário da escavação como um revestimento secundário para melhoria do acabamento. Chapman, Metje e Stark (2010) descrevem que a técnica costuma deixar o túnel mais impermeável, uma vez que tem menos juntas no revestimento. De outra forma, o *cast in place* costuma ser mais caro por conta de sua maior espessura.

Em geral, formas para concretagem com comprimentos de cerca de 10 metros são colocadas ao redor de seções anteriormente escavadas. Estas formas são montadas e desmontadas a cada ciclo de concretagem. Trilhos são instalados nas extremidades para servir de guias para o conjunto de forma (Figura 40).

Figura 40 - Utilização de formas para a concretagem *cast in place*



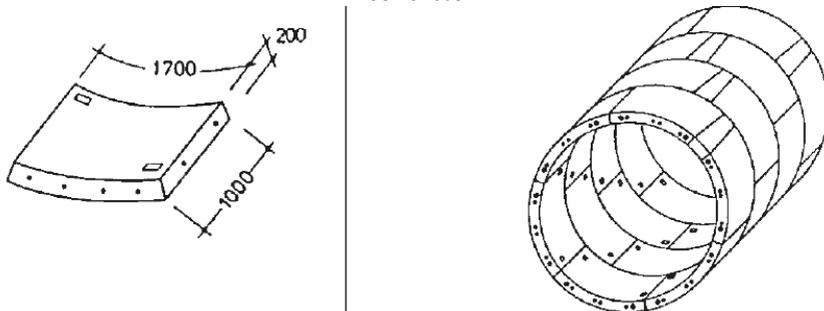
Fonte: Chapman, Metje e Stark (2010)

3.4.3. Aduelas de concreto

As aduelas (ou elementos pré-fabricados) são normalmente utilizadas nas TBMs, sendo feitas em geral de concreto e com reforço em aço estrutural ou fibras (Figura 41). O processo de produção de aduelas de concreto é bastante rigoroso, com formas, reologia de concreto e cura bem definidos e especializados.

Na confecção das aduelas são necessários moldes feitos sob medida para a seção “tipo” do anel. O concreto precisa ter um alto controle de qualidade e sua cura é auxiliada por uma câmara de vapor. Talhas e pontes rolantes são utilizadas para a movimentação no interior e no pátio da fábrica de aduelas, que costuma ser alocada fora das imediações do túnel na superfície. As peças são conduzidas até o emboque para estocagem. Conforme é realizado o avanço das escavações, as peças são transportadas até o backup da TBM, sendo feito um pequeno estoque próximo à frente de escavação na seção da cabeça de corte que cuida da montagem final do revestimento.

Figura 41 - Representação das aduelas pré-fabricadas de concreto



Fonte: Maidl *et al.* (2012)

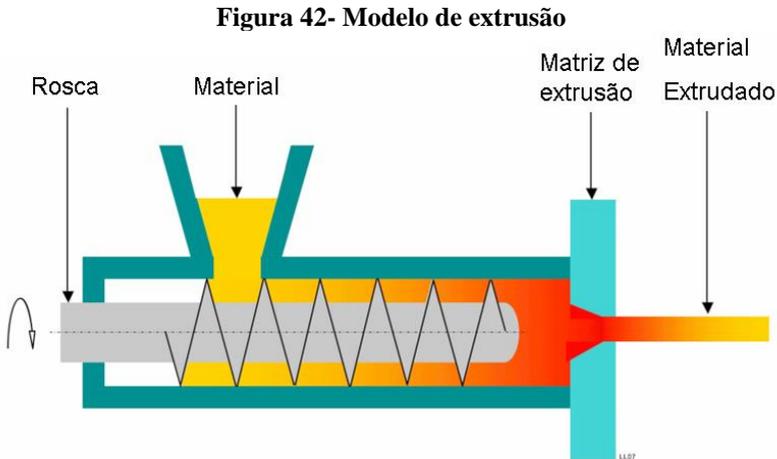
O sistema de montagem do revestimento possui um braço eretor que usa sucção à vácuo para manipular e posicionar cada aduela. Após a colocação de cada aduela, parafusos são utilizados para fixá-la às aduelas adjacentes, mantendo-as na posição correta até o fechamento da seção do túnel. A injeção de *grout* pelo lado externo do revestimento ajuda o terreno escavado a se consolidar e evita seu relaxamento tardio.

BTS (2004) destaca como vantagens do uso de aduelas em TBMs a montagem simples e precisa, economizando tempo na escavação. A padronização da escavação é atingida facilmente.

3.4.4. Extrusão de concreto

Um novo método de revestimento de túneis por extrusão foi desenvolvido desde o final dos anos 1960. Zinevich e Pogrebinskii (1971) apresentaram alguns dos primeiros esforços de desenvolvimento do revestimento extrudado para túneis, argumentando que os custos finais poderiam ser reduzidos em 50%. Foster-Miller Associates (1979) fez uma longa pesquisa sobre a viabilidade do método de extrusão em túneis, e apresentou uma importante revisão do estado da arte àquela época.

Em termos simplificados, a extrusão é um processo contínuo onde o material cimentício do revestimento é confinado e forçado através de uma matriz de extrusão que aplica o formato desejado, neste caso, a espessura da camada do revestimento do túnel. Conforme a Figura 42 ilustra, o processo de extrusão utiliza a velocidade de rotação de uma rosca para controlar o preenchimento da câmara de compactação.



Fonte: Noronha (2014)

A Tabela 4 apresenta a lista de alguns projetos de túnel que adotaram o concreto extrudado como revestimento, para túneis de transporte, esgoto e eletricidade.

Tabela 4 - Projetos que usaram o revestimento de concreto extrudado

Anos da construção	Localização / tipo de túnel	Tipo de revestimento	Tipo de solo
1967/68	Dreno de Nagoya	Concreto armado	Areia e cascalho
1976/77	Metrô de Praga	Concreto	Ardósia
1978/79	Esgoto de Hamburgo	Concreto com fibras	Areia
1980/82	Metrô de Frankfurt	Concreto com fibras de aço	Argila
1981	Esgoto de Tokyo	Concreto armado	Areia e aluvião
1984/87	Metrô de Lyon	Concreto com fibras e parcial do revestimento secundário	Areia e cascalho
1985/86	Túnel Freudenstein Pilot	Concreto	Gipsita
1988	Metrô de Essen	Concreto com fibras e parcial do revestimento secundário	Argila e calcário
1988/89	Túnel de água Shinanogawa	Concreto	Areia e argila
1992	Metrô de Milão	Concreto	?
1994	Okanami	Concreto com fibras	?
1998	Chukoku (perto de Hiroshima)	?	?
2004/10	Túnel Sanbonji Hara	Concreto	Areia solta e argila
2011	Túnel Tsugaru-Yomogita	?	Areia solta de chuvas

Fontes: Fukuchi (1991), Babendererde e Babendererde (2001) e Chishiro (2011) adaptados

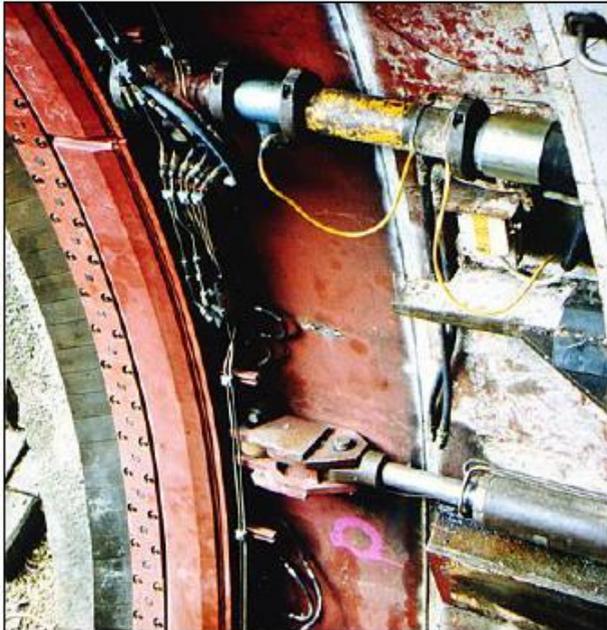
Mais recentemente, a técnica denominada revestimento de concreto extrudado (ECL – *Extruded Concrete Lining*) foi desenvolvida

para alcançar um avanço mais rápido no acabamento do túnel. Esta técnica foi citada por vários autores, como Fukuchi (1991), Royal *et al.* (2010), Ramoni (2010) e Maidl *et al.* (2012), tendo apresentado características de vantagem em termos de qualidade e de custos.

Um processo direto de extrusão aplicado a revestimento de túneis consiste no uso de uma forma (deslizante ou desmontável) que segue logo após a cabeça de corte de uma TBM, auxiliando a colocação do concreto em seu formato final. A escolha entre concreto armado, concreto não reforçado, concreto reforçado com fibras ou outros métodos é feita de acordo com as condições do solo.

A Figura 43 mostra o uso de concreto extrudado no esgoto de Hamburgo de 1978, citado por Babendererde e Babendererde (2001). Ao lado esquerdo podem ser vistos os pistões que deslocam a contra forma usando um sistema de vedação que melhora a compactação do concreto. A Figura 44 demonstra uma foto interior ao túnel já finalizado.

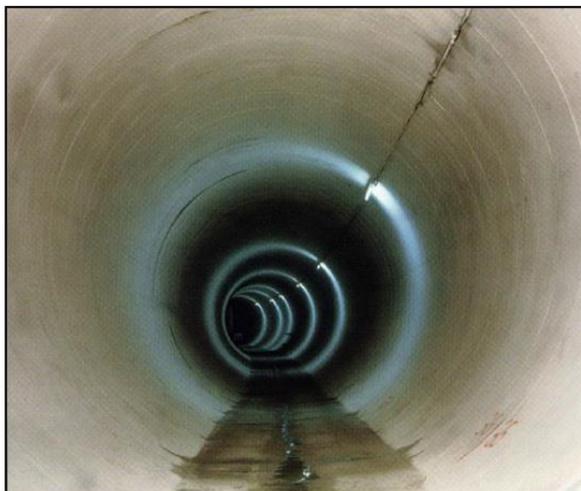
Figura 43 – Detalhe do sistema de compactação do concreto



Fonte: Babendererde e Babendererde (2001).

Alguns projetos de túnel adotaram o concreto extrudado como revestimento, utilizando-se para projetos de transporte, esgoto e eletricidade.

Figura 44 - Uso de concreto extrudado no esgoto de Hamburgo de 1978



Fonte: Babendererde e Babendererde (2001)

O comprimento total da forma depende do progresso da escavação, mas Maidl *et al.* (2012) considerou um comprimento médio de cerca de 15 m. Destaca-se que, comparado às aduelas de concreto, a ausência de juntas no concreto extrudado é, um fator altamente favorável para túneis de esgotos.

Fukuchi (1991) ressaltou algumas vantagens do concreto extrudado como melhor estanqueidade, eliminação da atividade de grotamento (preenchimento do vazio entre o revestimento e o solo com nata cimentícia) e até mesmo supressão do revestimento secundário. A possibilidade de se executar todo o suporte e revestimento também é citado por BTS (2004), considerando uma economia de tempo e insumos.

Konishi (2016) citou a comparação dos métodos NATM e de extrusão de concreto em TBMs, tendo como exemplo o túnel Sanbongi Hara no Japão, cuja execução iniciou com a técnica NATM para escavação em areia com baixa coesão. Após dois colapsos, a metodologia de escavação foi modificada para uma TBM com concreto

extrudado, e o projeto foi concluído com sucesso, qualidade e segurança.

Royal *et al.* (2010) também descrevem o revestimento extrudado como uma alternativa para o *microtunneling* em pequenos diâmetros ($d < 1m$) quando usa-se a técnica de tubo cravado (*pipejacking*). Esta técnica é útil, porém não consegue atingir a distâncias muito superiores a 500 metros sem um poço de visita. O atrito das paredes do túnel é tão grande que pode romper os anéis nestas situações. Além disto, não se consegue executar tubos de grandes diâmetros com esta técnica. A alternativa de revestimento com extrusão pode ser a solução mais adequada nestes casos.

3.5. Alternativas de custos de projetos tuneleiros

Os custos de grandes projetos de túneis costumam resultar em altas quantias monetárias. As decisões sobre os métodos executivos costumam fazer grande diferença de valor e tempo de execução. Toma (2005) descreve que estas decisões são difíceis pois costumam ser feitas numa fase inicial da obra, onde as incertezas são muito grandes e ainda não se tem um projeto detalhado.

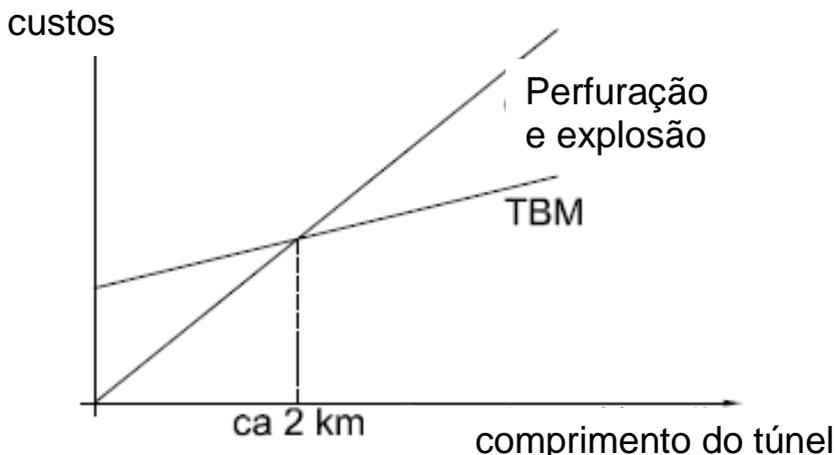
Os custos tuneleiros costumam ser difíceis de serem descritos. Há muita generalização de seus custos por metro. Alguns destes valores foram propostos por Szechy (1967), Celestino (1995), Mac-Donald (2006) e Pacheco (tentaram padronizar e identificar custos por metro de túnel. O estudo de Mac-Donald (2006) descreve 5.1. Túnel da Via Expressa Sul – Florianópolis, SC, comparando-o com outro túnel da região. O que pode ser percebido foi uma diferença no custo por metro de 30%. Isto sugere que cada projeto tem suas características de maciço, suporte, revestimento, instalações provisórias entre outros que compõem um custo final de cada projeto.

A valoração por metro de uma obra pode ter resultados bastante diferentes para cada projeto. O custo com alto grau de precisão só pode ser atingido após o projeto e orçamento executivo. De outra forma, outros autores citam tendências sobre o tema. A escavação NATM costuma ser mais econômica para túneis curtos, enquanto a TBM se justifica para túneis mais longos. A Figura 45 exemplifica qual a consideração de escolha de método pelo comprimento total escavado.

O sistema NATM costuma ser uma técnica mais barata de construção por ter mobilização e espessura de revestimento menores. O item 3.2.1.1.7. Indicação de suporte através da classificação do maciço

demonstrou como as espessuras do revestimento para esta técnica são pequenas. Isto acaba por resultar numa obra mais econômica.

Figura 45 - Comparativo de custos entre *drill and blast* e TBM



Fonte: Kolymbas (2005)

Quando o projeto tuneleiro tem uma grande extensão, principalmente do mesmo tipo de terreno, pode ser indicar a utilização de escavação mecanizada. Alguns autores como Francis e Rocha (1998), Kolymbas (2005) e Pacheco (2017) sugerem que a extensões maiores do que 1,5 quilômetros teriam melhores resultados econômicos com o uso de uma TBM.

A diferença de prazo entre os tipos de escavações pode ser muito custosa para um projeto de túneis. Lovat (2012) ressalta que é necessário manter um time de controle de um túnel e instalações provisórias para realizar a escavação. Estes custos mensais são caros e muitas vezes justificariam a escolha de uma perfuração mais rápida.

4. METODOLOGIAS DE CONCRETO EXTRUDADO

Dentre os tipos de revestimento de túneis conhecidos, resolveu-se destacar o concreto extrudado. Dois diferentes métodos de extrusão são apresentados. Primeiro descreve-se a tecnologia desenvolvida por um grupo de estudos nacional. Em seguida, descreve-se a metodologia de extrusão aplicada em túneis no Japão.

4.1. Forma deslizante

A BraBo (*Brazilian Borer*) é uma iniciativa que atua na área de inovações tecnológicas em túneis, com base em Palhoça, SC, Brasil. Nos últimos 8 anos, a BraBo tem proposto diversas inovações, das quais podem se destacar as três seguintes: corte por jato d'água, corte por *smart power* e a extrusão de concreto (Figura 46).

Figura 46 - Inovações propostas pela BraBo



Fonte: BraBo (2017)

A escolha pela BraBo de um material diferente do concreto convencional para a extrusão do revestimento se deu por dois motivos, maior velocidade e economia na execução do revestimento e também

para obter uma maior resistência e melhor desempenho mecânico em obras de túneis.

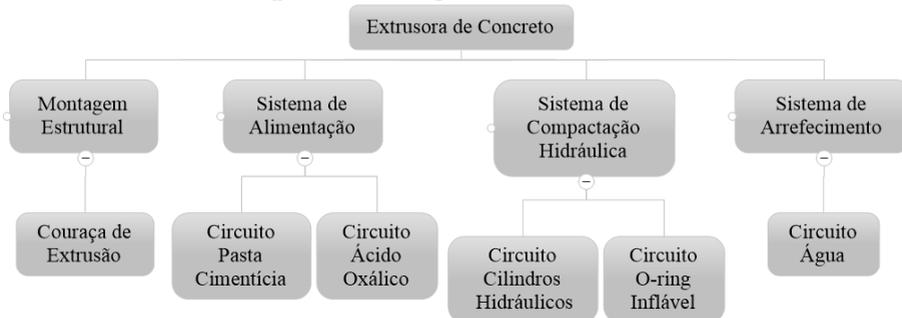
O material é extrudado com auxílio de uma forma deslizante que, ao final de sua passagem, deixa o segmento do túnel revestido. O processo de extrusão é pouco utilizado na engenharia civil, quando comparado com os processos de *cast in place* e de pré-moldados. Nestes dois últimos casos a mistura do concreto tem uma reologia bem mais simples, em geral com um baixo controle dos insumos utilizados.

A extrusão é um processo que requer um controle muito mais refinado dos materiais. Algumas inovações tecnológicas vêm facilitando este fino balanço reológico. A adição de dispersores, fibras hidrofílicas, agentes modificadores de reologia, unidos com um controle mais rebuscado do tamanho das partículas e um lubrificante de baixo peso molecular proporcionaram a aplicabilidade do processo de extrusão para materiais cimentícios. Estes componentes, aliados a aceleradores de pega, permitem o endurecimento precoce do produto final, mantendo uma alta resistência à compressão, podendo chegar a médias entre 70 – 90 MPa.

Para facilitar o entendimento do processo da extrusora de concreto proposta pela BraBo, apresentam-se quatro grandes etapas necessárias à extrusão, conforme ilustradas na Figura 47.

A extrusão requer que o material aplicado se comporte como um fluido para o preenchimento da cavidade. Porém os componentes da pasta cimentícia fazem com que a mistura se comporte de uma forma não-newtoniana, ou seja, sem uma taxa de viscosidade constante ao longo do tempo.

Figura 47 - Componentes da extrusão



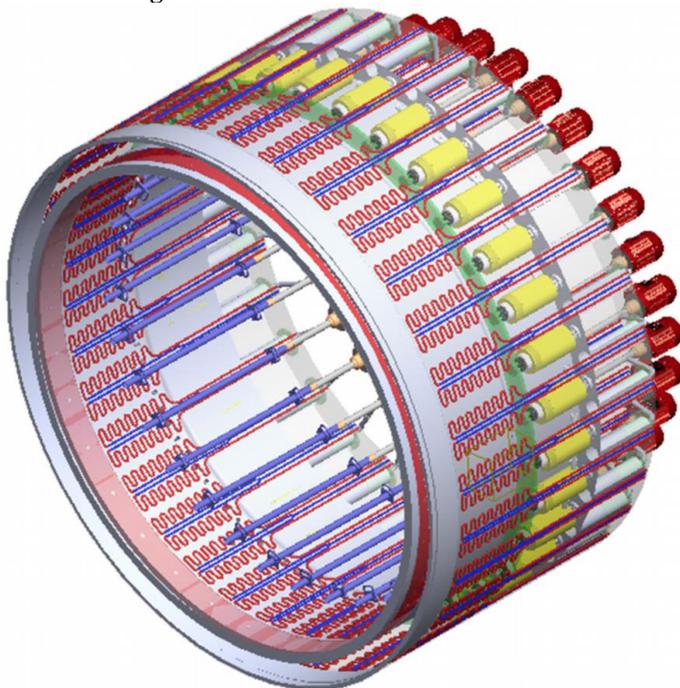
Fonte: Noronha (2014)

As misturas utilizadas para extrusão de túneis têm mais a característica pseudoplástica, reduzindo a viscosidade com o aumento da tensão aplicada.

Alguns dos desafios deste método refletem o comportamento não-newtoniano do fluido. A mistura deve ser trabalhável o suficiente para escoar numa seção transversal e ainda assim rígida para resistir às deformações advindas do peso e manuseio. A mistura não pode aderir às paredes da extrusora, proporcionando superfícies lisas aos materiais extrudados. Não pode haver a separação de fases quando é aplicada a pressão à mistura.

A Figura 48 ilustra todo o bocal de extrusão ao redor de um túnel de seção circular. A pasta cimentícia é bombeada por motores (em vermelho) até a couraça de extrusão. O sistema de arrefecimento é representado pelas linhas azuis (líquido refrigerado) e vermelhas (líquido aquecido). Os pistões em amarelo irão pressionar a mistura para atingir o grau de compactação desejados.

Figura 48 – Circunferência de extrusão



Fonte: Noronha (2014)

O processo de extrusão é alimentado pelos dois insumos: a pasta cimentícia e o ácido oxálico. Estes materiais serão inseridos dentro da câmara da couraça de extrusão até que tenha o total preenchimento dela.

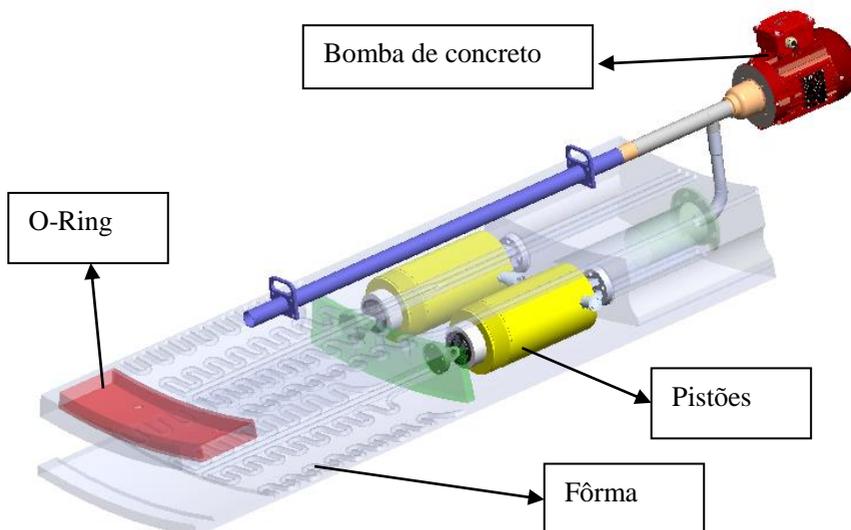
A aplicação do ácido oxálico gera uma reação exotérmica com a pasta cimentícia. Os cilindros hidráulicos são acionados para comprimir a mistura. Este é o momento em que é necessário o controle de temperatura. Um sistema de arrefecimento é usado para manter a temperatura a 40 oC. A água é utilizada num circuito fechado de troca de calor com serpentinhas, otimizando a temperatura à projetada. O circuito O-ring é utilizado para manter a pasta cimentícia no interior da couraça de extrusão. Assim, infla-se com uma pressão suficiente para o confinamento. Quando se finaliza a cura da pasta, o sistema é desinflado e preparado para a sessão seguinte.

4.1.1. Bocal de concreto e forma

A escavação deixa um vazio que será parcialmente coberto pelo revestimento. Uma forma justaposta segue a cabeça de corte, conforme descrito por Noronha (2008). O sistema é dividido em câmaras onde o concreto é bombeado (Figura 49). Um par de pistões irá empurrar a mistura concretada para obter melhores taxas de compressão e eliminar vazios.

Este processo será seguido por uma forma para garantir a convergência do revestimento durante o seu endurecimento. A extensão desta forma será variável, devendo atender às expectativas do confinamento e da resistência do concreto.

O tamanho do conjunto da couraça será dependente do diâmetro e avanço projetado do túnel. Noronha (2008) sugeriu um sistema de extrusão com medidas apresentadas, auxiliando no cálculo do tamanho e produtividade. Foi proposto um túnel de 3000 mm de diâmetro, resultando num conjunto de 32 módulos de extrusão no diâmetro da escavação. O comprimento extrudado é de 500 mm, tendo um tempo de ciclo (completação, compactação, cura e desmoldura) de 10 minutos. Este tempo é suficiente para realizar 6 ciclos de extrusão em 3 horas, ritmo proposto para o revestimento. Ao final, o avanço seria de 24 metros por dia.

Figura 49 – Forma para extrusão do concreto

Fonte: Noronha (2014)

4.1.2. Sistema de alimentação

O sistema de alimentação tem dois insumos: a pasta cimentícia e o ácido oxálico. Estes materiais serão inseridos dentro da câmara da couraça de extrusão até que tenha o total preenchimento dela.

A aplicação do ácido oxálico gera uma reação exotérmica com a pasta cimentícia. Os cilindros hidráulicos são acionados para comprimir a mistura. Este é o momento em que é necessário o controle de temperatura. Um sistema de arrefecimento é usado para manter a temperatura a 40 °C. A água é utilizada num circuito fechado de troca de calor com serpentinas, otimizando a temperatura à projetada. O circuito O-ring é utilizado para manter a pasta cimentícia no interior da couraça de extrusão. Assim, infla-se com uma pressão suficiente para o confinamento. Quando se finaliza a cura da pasta, o sistema é desinflado e preparado para a sessão seguinte.

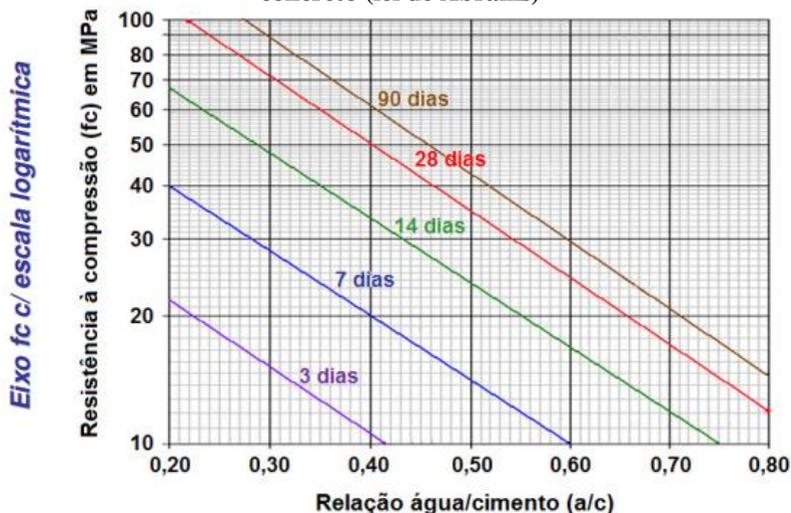
4.2.2.1. Pasta Cimentícia

O concreto é o ingrediente principal para o revestimento extrudado. Este tem de ser resistente às forças solicitantes e ainda ser uma escolha econômica. Suas características irão determinar a trabalhabilidade na hora da concretagem e manutenção durante a operação.

O conceito proposto pela BraBo utiliza um concreto de alta resistência inicial a fim conseguir um processo de revestimento mais rápido. Isso permite que a escavação prossiga em uma taxa mais curta quando comparado ao concreto projetado e cast-in-place. Assim que o concreto é endurecido a um nível médio de resistência com poucos minutos, tem-se uma condição de trabalho segura para a escavação e outros serviços.

A resistência projetada para este tipo de concreto é maior do que às de misturas convencionais. O traço do concreto considerado utiliza um fator de água muito baixo (0,35, contra o comum de 0,50), permitindo que a mistura tenha uma resistência muito alta. Este comportamento pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 - Relação água x cimento com a resistência do concreto (lei de Abrams)



Fonte: Freitas (2013)

O gráfico mostra que as resistências compressivas são maiores quanto menor o fator água cimento. Outra característica importante de se ter pouca água é de que o concreto fica pouco permeável, uma característica desejável para túneis.

A solução tem uma taxa de progresso mais rápida, o tempo definido para o endurecimento do concreto é muito curto, uma vez que metade da sua resistência final é alcançada em pouco tempo (cerca de 15 min) após a aplicação. Em termos comparativos, verifica-se que o caso utilizado no túnel Sanbongi Hara, no Japão, a resistência atingida pelo concreto em um dia foi de 15 MPa (IIDA *et al.*, 2005).

A característica de extrusão exige que a mistura aplicada seja bastante homogênea. Para isto, é utilizado um misturador de zona fluidizada que alcança uma mistura rápida, eficiente e precisa. O desenvolvimento proposto considerou o modelo B-350XN da Dynamic Air (Figura 51). Ele é eficiente na mistura de líquidos e sólidos de diferentes granulometrias. São utilizados dois eixos de baixa rotação para misturar, evitando zonas de movimentação morta.

Figura 51- Misturador de zona fluidizada



Fonte: Dynamic Air (2008)

A preparação da mistura a ser aplicada é feita no backup da tuneladora. Os insumos da reação são guardados em reservatórios, esperando o início da operação. Ao início, serão adicionados o aglomerante, água, dispersante, plastificante, espessante e um lubrificante. O concreto é colocado em um misturador que tem uma alta taxa de homogeneização, obtendo uma textura similar a de uma pasta de dente.

Bombas irão levar o concreto para as câmaras, onde o aditivo acelerador é adicionado. A reação obtém temperaturas em torno de 60 °C, liberando quantidades de calor. É necessário controlar a temperatura misturada para evitar o aparecimento fissuras.

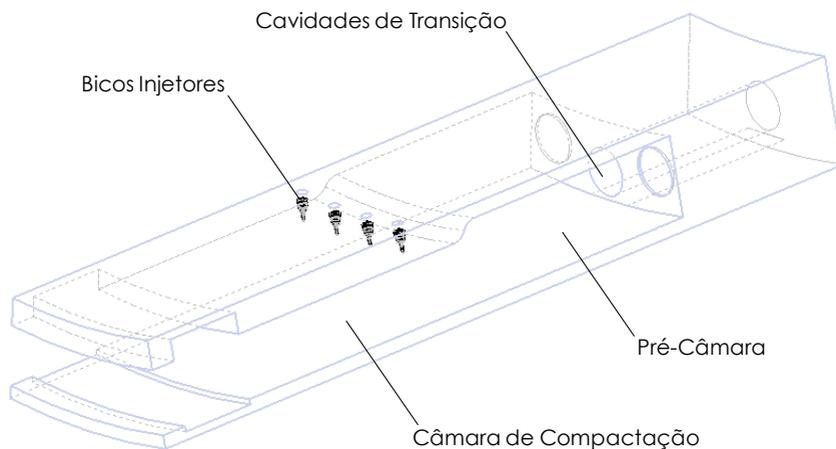
4.2.2.2. Ácido oxálico

O ácido oxálico é o componente acelerador da pega da pasta cimentícia. Este é um ácido, na forma líquida que é injetado na couraça de extrusão. Ele irá desidratar a pasta, dando-lhe uma cura de cerca de 5 minutos. Após este tempo pode ser realizado o desmolde do revestimento.

O circuito do ácido oxálico conta com um tanque reservatório, filtro, bomba de engrenagens, válvula de pressão, bomba de alta pressão, galeria de distribuição, bicos injetores e uma central de comando.

O circuito trabalha com um sistema de injeção eletrônica do ácido (Figura 52). Desta forma, é possível adaptar a quantidade e pressão aplicados na câmara de compactação. Isto terá uma diferença de acordo com a posição da câmara no bocal de extrusão.

O ácido fica conservado num tanque reservatório. Uma central de comando é utilizada para controlar a colocação do ácido. Uma bomba de alta pressão é utilizada para aumentar a pressão na galeria de distribuição, permitindo a injeção do ácido a cerca de 1300 a 2000 bar. Os bicos de injeção utilizados são do tipo *common rail*, um tipo bem utilizado de bico de injeção.

Figura 52- Sistema de injeção de ácido

Fonte: Noronha (2014)

4.1.3. Compactação hidráulica

O sistema de compactação hidráulica é responsável por confinar a mistura extrudada. Para isto são utilizados os pistões hidráulicos e o sistema de O-ring. Uma representação gráfica foi demonstrada na Figura 49 – Forma para extrusão do concreto.

O sistema de pistões é constituído de um par para cada câmara de compactação, utilizando-se de molas para o retorno ao seu ponto inicial. Este sistema utiliza válvulas de controle e sensores de curso para que se consiga determinar a velocidade e a posição de cada pistão. Uma vez aplicada a pasta, os pistões serão acionados para aumentar a pressão de compactação, atingindo cerca de 20 MPa, preenchendo de todos os espaços da câmara.

O sistema de O-ring é utilizado como vedação em indústrias para sistemas de energia nuclear e de foguetes. O aparelho funciona como um inflador de pneus, inflando quando há a necessidade de vedar um espaço. A solução a ser adotada deve ser customizada a atender as necessidades da extrusão por conta de sua forma, pressão interna, resistência à compressão e fadiga.

A escolha do material vedante deve levar em consideração os materiais usados na mistura. Deve haver uma compatibilidade com o ácido oxálico e a água utilizados na mistura. Uma proposta do fabricante

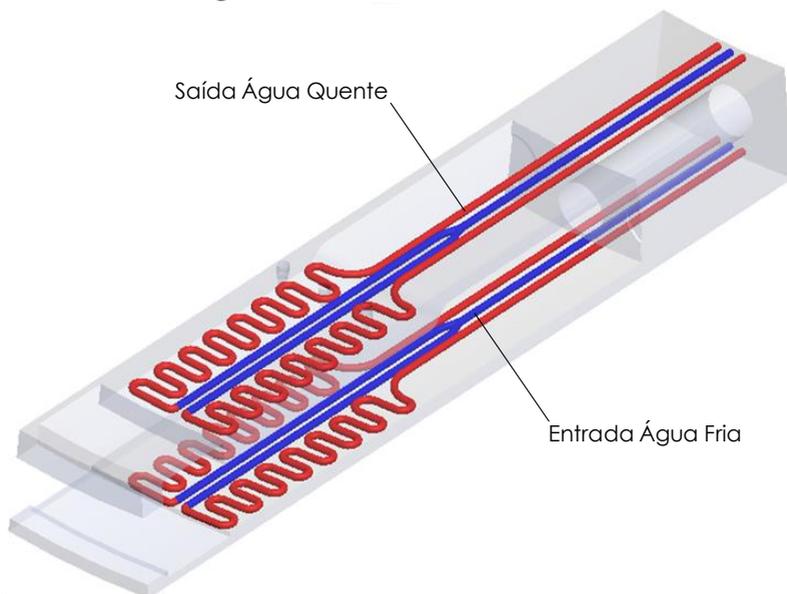
Parker de vedações é a utilização de um composto etileno propileno. Este possui uma boa aceitação com ácidos, resistente a desgastes e excelente aceitação de calor, água e vapor.

Antes do início da aplicação da pasta cimentícia, o circuito de O-ring é inflado para garantir a estanqueidade da câmara de compactação. Após a cura do concreto, o sistema é desinflado para que se possa avançar o processo de revestimento.

4.1.4. Sistema de arrefecimento

Um sistema de arrefecimento (Figura 53) é necessário para manter as temperaturas no momento da extrusão. Para isto, foi desenvolvido um sistema de troca de calor que usa água como líquido refrigerante. É utilizado um tubo único de ½” que irá passar pelas serpentinas adjacentes à couraça de extrusão, sendo dispensada a água num tanque. Uma bomba hidráulica é usada para movimentar o líquido pelo tubo de resfriamento. A velocidade do bombeamento irá determinar a quantidade de calor extraída da reação.

Figura 53 - Sistema de arrefecimento

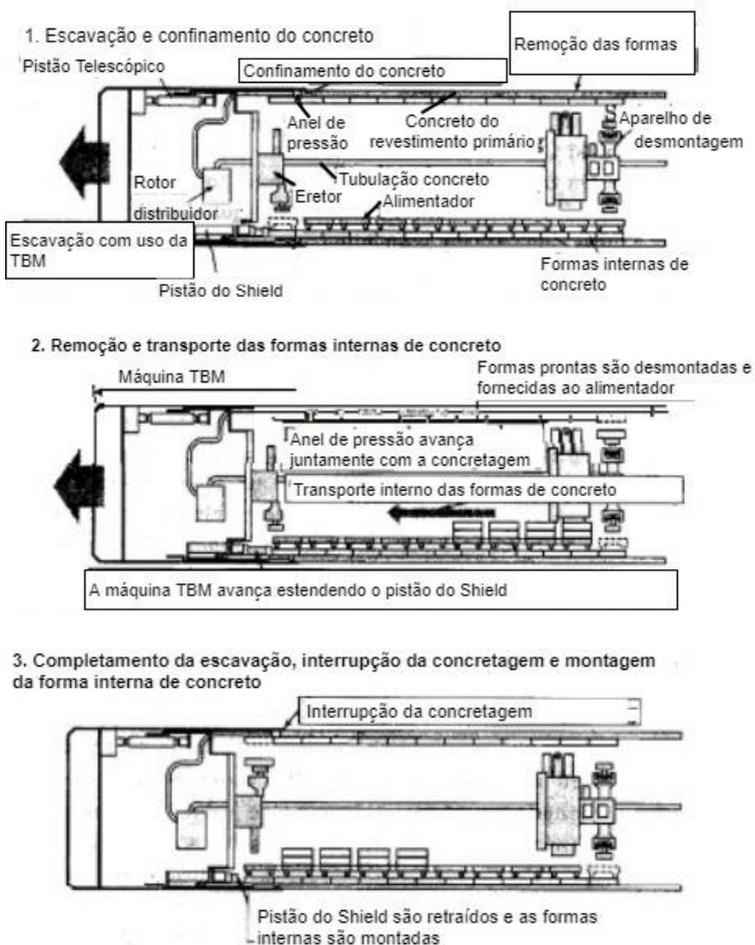


Fonte: Noronha (2014)

4.2. Forma desmontável

Recentemente o conceito de extrusão foi incorporado como uma alternativa de revestimento de túneis quando usada a perfuratriz TBM, resultando na metodologia SENS (*Shield Extruded NATM System*), que combina conceitos de TBM, NATM e extrusão conforme a proposta apresentada por JIMT (2016) e ilustrada na Figura 54.

Figura 54 - Etapas do processo de extrusão da metodologia SENS



Fonte: Kawaguchi *et al.* (2000), traduzido

Várias escavações utilizaram a tecnologia de forma desmontável, chamada de SENS no Japão. Existem algumas publicações sobre o tema na língua original (japonês), das publicações em inglês (mesmo que parcialmente) destacam-se cronologicamente:

- Hiromi Iida (2008): Diretor da Agência Japonesa de construção ferroviária – publicação de tese de doutorado
- Mitsutaka Sugimoto (2010): professor da Universidade Técnica de Nagoaka – aula sobre túneis;
- Sakata *et al.* (2015) – artigo no WTC (World Tunnelling Congress) de 2015, na Croácia;
- Dr. Shinji Konishi (2016): Metrô de Tóquio e professor da Universidade Waseda de Tóquio – Aula sobre NATM (inclui SENS).

A metodologia de forma desmontável SENS foi inicialmente sugerida por Iida *et al.* (2005) que publicaram em um congresso de escavações em solos de baixa coesão sobre as vantagens de se unir as técnicas TBM, NATM e extrusão de concreto (Figura 55 e Figura 56). Para isto foi proposto um sistema de concreto extrudado, com base na técnica *cast in place* (concretagem no local) com diferenciais adaptados ao processo de extrusão. A técnica promete manter a produtividade do revestimento de aduelas a um custo menor.

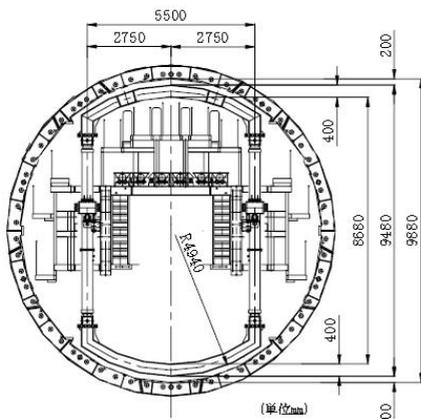
Na SENS o revestimento consiste em concreto que é pressionado (ou extrudado) continuamente contra uma forma desmontável que segue o escudo do TBM. Este é um concreto de resistência inicial rápida que dá o suporte à escavação em questão de horas, permitindo um avanço condizente com a velocidade de escavação.

Uma das vantagens da extrusão com forma desmontáveis descrita por Babendererde e Babendererde (2001) seria de que pode-se utilizar um concreto de simples reologia e a distribuição uniforme do material aplicado. O controle de materiais não precisa ser tão refinado e pode-se conseguir uma parede de concreto de resistência compressiva de 15 MPa em 24 horas.

Algumas outras vantagens foram percebidas quando comparadas com o sistema de extrusão por forma deslizante (proposta do item 4.1.1. Bocal de concreto e forma), como a menor complexidade de aplicação, uma vez que não são necessários o uso do acelerador de

pega, controles de temperatura ou sistemas de O-ring. Isto diminuiria a quantidade de controles, acabando por facilitar o processo construtivo.

Figura 55 - Seção transversal da máquina de forma SENS



Fonte: Iida (2008)

Figura 56 - Foto da seção superior da máquina de forma SENS



Fonte: Iida (2008)

Por outro lado, um segmento de quase 25 metros seria adicionado à TBM, logo atrás da cabeça de escavação. Este equipamento usa braços eretores para realizar as atividades de forma e desforma. Apresenta-se como uma etapa complicada e quase que crítica do projeto. Adicionando a isto, esta metodologia seria complicada ou inviável para o caso de *microtunnelling* (técnica que usa diâmetros menores que 2 metros).

Hasegawa *et al.* (2011) sugeriu que a geologia ideal para a utilização de SENS seria em solos de baixa coesão ou outras rochas brandas, pelo fato de se conseguir taxas de escavações mais rápidas que o NATM. Ainda sim, ele destaca que o SENS tem um custo significativamente menor do que o uso da TBM associada ao revestimento com placas de concreto.

5. ESTUDOS DE CASOS

O presente capítulo apresenta a comparação de custos entre diferentes métodos de execução de revestimentos de túneis em obras reais. Assim, três exemplos de túneis serão descritos, de forma a melhor entender pontos positivos e de melhorias de cada um. Para se chegar numa aproximação sobre o tema estudado, foi sugerida uma comparação de métodos de um caso de NATM com drill and blast, de um caso de uma TBM usando aduelas de concreto como revestimento e de um caso de uma TBM com revestimento de concreto extrudado.

5.1. Túnel da Via Expressa Sul – Florianópolis, SC

Dentre as obras investigadas pelo autor no presente trabalho, o túnel da Via Expressa Sul em Florianópolis/SC (Túnel Antonieta de Barros, Figura 57), destaca-se como um bom exemplo de escavação pelo NATM com *drill and blast*.

Figura 57 - Emboque Sul do Túnel da Via Expressa Sul



Fonte: CJC, 2017.

apenas em meia seção e rebaixo. As regiões dos emboques eram compostas por matações e pedras soltas, sendo utilizados túneis falsos em suas partes finais para a proteção desta região dos túneis.

O sistema de escavação escolhido foi o NATM com *drill and blast* e revestimento com concreto projetado e tirantes sistemáticos. Em algumas regiões com material escavado de qualidade inferior foram aplicadas telas metálicas para conferir maior suporte. Um revestimento de concreto cast in place foi aplicado por toda a extensão dos dois túneis.

Tendo em vista o que foi descrito no item 3.5. Alternativas de custos de projetos tuneleiros, esta obra não se enquadraria na metodologia TBM (comprimento total 1460 m < 2000 m). Além disto, o diâmetro de 14,65 m está no limite das maiores máquinas disponíveis, o que refletiria num grande preço de aquisição da tuneladora. Contudo, foi realizada uma consulta à empresa Herrenknecht sobre quais seriam os custos de uma TBM deste porte. O autor consultou um dos Engenheiros da empresa Herrenknecht que disse que a tuneladora para este caso deveria ter um custo de € 35 milhões (quase R\$ 160 milhões)³, fora impostos, transportes e importação da Alemanha para o Brasil.

Ressalta-se que o valor estimado da máquina ainda é apenas uma fração do custo final do túnel. A operação de uma TBM também acaba por envolver custos elevados de operação, já que tem de ser considerados sistemas de transportes, revestimentos com aduelas de concreto, suportes, sistemas auxiliares entre muitos outros (LOVAT, 2012). De fato, como será detalhado adiante, verificou-se que o valor da obra feita com NATM seria menor que somente o preço de aquisição da TBM (sem o custo da importação).

Como esperado, adotou-se corretamente para a obra o método NATM. Porém, a construção destes túneis foi razoavelmente demorada e contestada financeiramente. O período total do empreendimento foi de 6 anos (1996 a 2001), em consequência das baixas taxas de avanços de escavação, que ainda viriam a ser revestidas. Com a insatisfação da comunidade, a obra foi questionada pelo TCE-SC sobre o prazo e custos e a imagem do governo (contratante da obra através do DER) ficou bastante desgastada na época. Mesmo assim, não foram apontados sobrepreços. Um de seus relatórios ajudou a demonstrar o custo desta obra, conforme pode ser visualizado na

Tabela 5.

³ 1 € = R\$ 4,55, Julho / 2018.

Portanto, verifica-se que o custo total é praticamente a metade do custo de aquisição da TBM da Herrenknecht, isto sem considerar a aplicação dos custos de impostos, transporte e importação.

Tabela 5 - Custos dos insumos críticos do Túnel da Via Expressa Sul

Elemento	Unidades	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)	
			(2003)	(2018) (x 234%) ⁴
Concreto projetado (m3)	6.447	528	3.400.977	7.960.192
Atirantamento	10.693	339	3.625.348	8.485.346
Concreto	25.678	132	3.389.350	7.932.980
Ventiladores	20	30.622	612.449	1.433.473
SUB-TOTAL			11.028.123	25.811.991
Outros custos			26.872.742	62.897.283
Custo Total		21.355	37.900.865	88.709.274

Fonte: MacDonald (2006), adaptado.

5.2. Túnel GASTAU – São Paulo, SP

A segunda obra analisada no presente trabalho, consiste do Túnel GASTAU (Gasoduto Caraguatatuba/Taubaté), em Caraguatatuba, SP, um empreendimento da Petrobras executado para receber uma linha de gasoduto que escoo o gás dos campos de Mexilhão, Uruguá-Tambau e de Tupi. A linha do gasoduto possui um total de 96 km de extensão, usando tubulações de 28 polegadas.

Uma parte crítica deste empreendimento foi a travessia sob a serra do mar, o que exigiu a implantação de um túnel de 5,2 km de extensão, segundo Araújo *et al.* (2012). Este túnel tem um diâmetro de 6,19 metros, perfazendo uma seção transversal com área de 30 m². O método escolhido foi o TBM, com o equipamento ilustrado na Figura 61. O orçamento inicial desta obra foi de R\$ 220 milhões em 2013 (CBT, 2016) (cerca de R\$ 290 milhões em 2018)⁵.

Araújo *et al.* (2012) registrou que o avanço para esta obra foi de 11,2 m por dia, muito superior aos avanços da técnica NATM. De fato,

⁴ Correção do IPCA entre 2003 e 2017.

⁵ Correção de 32,57% do IPCA de 2013 a 2017.

o extenso comprimento do túnel acarretaria numa obra muito demorada caso fosse a escolha por NATM. Isto justifica a proposição de Maidl *et al.* (2012), de que a partir de cerca de 2 km seria indicado o uso de um método mais mecanizado (Figura 45).

Kochen (2013) destacou que houveram benefícios com a escolha da TBM na obra do túnel GASTAU, como a redução no tempo total de construção. O autor destacou a obtenção de uma seção escavada mais uniforme, a aplicação de revestimento de forma mecanizada, a menor quantidade de trabalhadores e as melhores condições de segurança no trabalho.

Figura 59 - A TBM sendo preparada para escavação



Fonte: Kochen (2013)

5.3. Túnel Sanbongi Hara - Japão

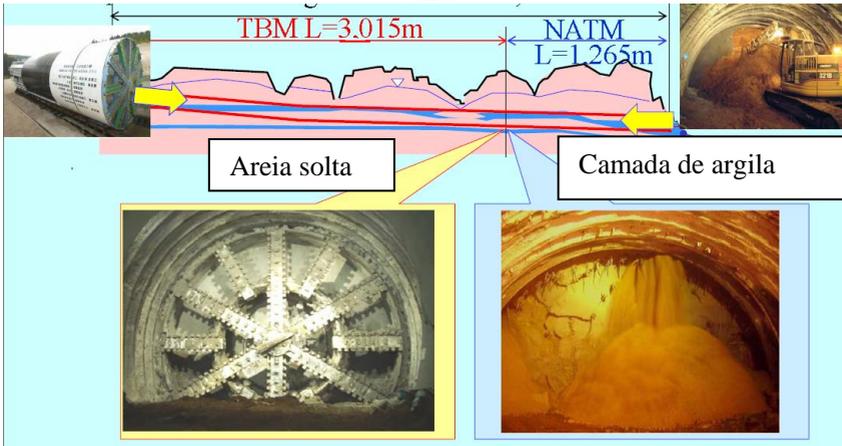
O Japão é um país que investe de maneira expressiva no setor ferroviário, estendendo e melhorando seus traçados. O país desenvolveu o *Shinkansen*, sistema de trens japonês que cobre grande parte de seu

território com trens de alta velocidade. Muitos túneis foram construídos para proporcionar traçados ferroviários adequados a esses trens.

O presente trabalho destaca a linha Tohoku *do Shinkansen*, que possui um túnel que considerou o método de concreto extrudado em seu revestimento. O trecho em questão consiste do túnel Sanbonogi Hara que sai de Hachinohe e vai até Shin-Aomori, província Aomori no norte do Japão.

Iida (2008) estudou o túnel Sanbonogi Hara, descrevendo o método de escavação SENS em sua tese de doutorado. Este túnel tem uma extensão de 4.280 m e diâmetro de 11,4 m, perfazendo uma seção transversal de 102 m², profundidade relativamente rasa, atravessando uma geologia composta por areia de rios solta e camadas de argila (Figura 60). O orçamento desta obra estimado pelo autor foi de R\$ 310 milhões.

Figura 60 - Esquema de escavação e fotos de frentes de obra



Fonte: SUGIMOTO, 2010.

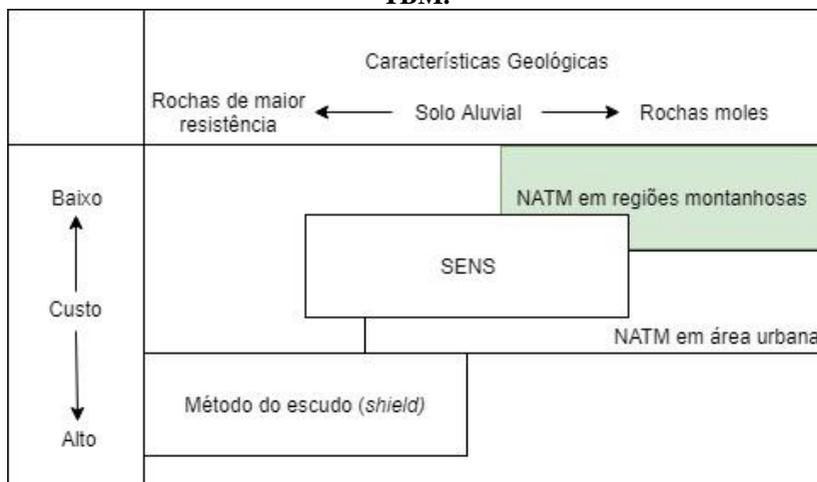
Inicialmente o túnel Sanbonogi Hara foi projetado para a escavação NATM. Porém durante as escavações houveram dois grandes colapsos que fizeram os projetistas reconsiderar o método executivo, proporcionando a segurança adequada ao empreendimento. Assim, as escavações tiveram de ser interrompidas para interpretar as causas dos acidentes e os impactos tanto de questões técnicas quanto de prazo da obra.

As condições do solo e as diretrizes de prazo e segurança do projeto levaram à escolha de uma escavação mais segura e rápida. Assim, foi escolhida uma máquina do tipo TBM com escudo, à qual adaptou-se uma forma de extrusão para a execução do revestimento. A segurança aumentou devido ao uso do balanço da pressão (EPB – *Earth Pressure Balance*) na TBM e o tempo de execução diminuiu devido ao progresso com o revestimento extrudado.

A Figura 60 ilustra, o esquema de escavação onde pode-se perceber a utilização da TBM nos 3.015 m do trecho com areia solta, e a utilização do método NATM, nos 1.265 m do trecho que atravessa a camada de argila. Na foto da parte inferior esquerda da Figura 60 pode-se ver a máquina TBM, enquanto que a foto da parte inferior direita apresenta a escavação com o NATM e uma situação de colapso na frente de escavação.

A nova configuração obtida pela combinação da TBM com a forma de concreto extrudado foi denominada SENS, *Shield machine/Extruded concrete lining /NATM /System*. De acordo com Iida (2008), a metodologia SENS representa uma solução que preenche uma lacuna entre o NATM e o TBM (*Shield System*) oferecendo segurança eficiente, com custo moderado, para solos com baixa coesão (solos aluviais ou silto-arenosos). A Figura 61 ilustra uma comparação qualitativa entre os métodos SENS, NATM e TBM.

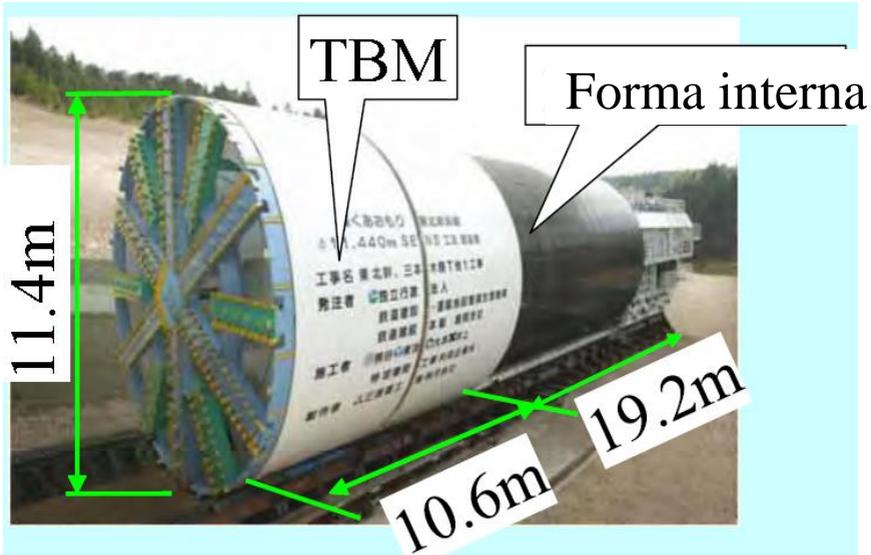
Figura 61 - Comparação de custos entre SENS, NATM e TBM.



Fonte: Autor, adaptado de Iida, 2008.

A Figura 62 ilustra o equipamento TBM que foi adaptado na metodologia SENS do túnel em questão. Como pode ser verificado, a frente da máquina é formada por duas partes: uma cabeça de escavação com 10,6 m de comprimento e uma forma para extrusão de concreto com 19,2 m de comprimento.

Figura 62 - Medidas da TBM usada no túnel Sangongi Hara



Fonte: JIMT (2016) traduzido.

Na parte do equipamento onde é realizada a extrusão de concreto (nos 19,2 m após a cabeça de escavação) são acoplados segmentos para completar o anel da forma de extrusão. A Figura 65 apresenta um dos 16 anéis de 1,20 m de largura como formas para o concreto, que juntas cobrem o total de 19,2 m. Este comprimento de forma seria suficiente para cerca de um dia de escavação, quando se deve atingir uma resistência mínima do concreto de 15 MPa, conferindo a devida segurança ao projeto.

Figura 63 - Forma do SENS

Fonte: Iida, 2008.

Como o projeto do túnel envolve tanto o NATM quanto o método SENS, foi possível comparar as taxas de produtividade entre esses dois métodos. Assim, observou-se que o método SENS ofereceu o dobro da produtividade em relação ao NATM, já que os avanços mensais médios foram de 110 m e 45 m, respectivamente. A mesma relação foi verificada com os avanços mensais máximos, que foram de 172 m e 79 m para o SENS e o NATM, respectivamente. Além do menor tempo, o SENS ofereceu como vantagem a redução dos custos de manutenção e de despesas nos canteiros da obra.

5.4 Comparação entre as diferentes metodologias

Foram citados três diferentes projetos tuneleiros, com a finalidade de poder comparar situações diferentes de escavações. Isto auxilia a visualizar quais alternativas seriam sugeridas para diferentes tipos de projetos.

A partir da Tabela 6, percebe-se que o método NATM tem um custo menor por m^3 escavado. Também pode-se perceber que a metodologia SENS aplicada no túnel Sanbongi Hara teve custos por m^3 mais baixos quando comparados com o túnel Gastau.

**Tabela 6- Comparação da aplicação das metodologias
NATM, TBM e SENS.**

Obra	Metodo	Extensão (m)	Seção (m ²)	Custo (milhões R\$)	Custo por m (mil R\$/m)	Custo Vol (R\$/m ³)
Via Expressa Sul, SC	NATM	1.460	132	88,7	60.753,42	460,25
GASTAU, SP	TBM	5.200	30	290	55.769,23	1858,97
Sanbonogi Hara, Japão	SENS	3.015	102	310	102,819,24	1008,03

6. ANÁLISE DE RESULTADOS – COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO

Neste capítulo serão discutidas e analisadas as aplicações de métodos de escavação e revestimentos tuneleiros, bem como suas principais características, vantagens e desvantagens. Foram compiladas as opiniões de importantes autores sobre o assunto, destacando os pontos positivos e negativos. Espera-se que o presente estudo sirva como base para auxiliar na discussão e na escolha de métodos de escavação e revestimento de túneis.

Em princípio o tipo do maciço e o método de escavação escolhido para uma obra de um túnel irá guiar o tipo de revestimento a ser aplicado. No presente estudo, escolheu-se alguns pontos para que fossem individualmente discutidos, elucidando com maior detalhe as características de cada técnica em discussão. Mais especificamente, nesta seção foram compilados as vantagens e desvantagens dos métodos NATM, TBM com aduelas e TBM com concreto extrudado.

O embasamento do estudo apresentada foi retirado de comentários e descrições de renomados autores de engenharia de túneis em publicações do setor, principalmente da revista *Tunnelling and Underground Space and Technology*.

6.1. NATM

Inicialmente são destacadas as vantagens do método NATM. Costuma-se dizer que este método oferece uma solução muito adaptável para túneis, dando maior liberdade para formas geométricas e abordagem de suporte junto ao maciço. Independentemente do tipo de método utilizado, o NATM costuma sempre ser utilizado no início da maioria das obras de túneis, permitindo uma maior rapidez para a continuidade das obras com outros tipos de escavação.

Toma (2005) descreve o método NATM como uma das soluções mais econômicas e eficientes para a execução, uma vez que minimiza e adapta a necessidade de suporte do revestimento de acordo com o maciço encontrado. A Tabela 6 apresenta um resumo geral das vantagens do NATM conforme a opinião dos autores Kolymbas (2005) e Chapman, Metje e Stark (2010), Jodl e Resch (2011) e Maidl *et al.* (2012).

Tabela 6 - Vantagens do uso do método NATM

NATM – VANTAGENS	Kolymbas (2005)	Chapman, Metje e Stark (2010)	Jodl e Resch (2011)	Maidl <i>et al.</i> (2012)
Boa performance de escavação		X	X	X
Alta adaptabilidade à geologia do túnel		X	X	X
Alta flexibilidade para raios de curvas menores			X	
Seção transversal adaptável		X	X	
Formato da seção pode favorecer os suportes	X	X	X	
Conceito "convergência x confinamento"	X	X	X	X
Rapidez para especificação dos serviços			X	
Tempo de mobilização menor			X	
Baixo custo inicial de investimentos		X	X	
Baixo consumo de revestimento	X	X		X

Por outro lado, Toma (2005) também descreve como um dos pontos fracos do NATM a velocidade de avanço. Por exemplo, segundo a classificação e método de Bieniawski (1989), os avanços diários máximo sem suporte são de apenas 3 m mesmo em ótimas condições de rocha, para uma dimensão média de 10 m para a seção do túnel.

De acordo com os mesmos autores mencionados anteriormente, o NATM tem como desvantagem a baixa mecanização, e o ciclo de atividades para o avanço da escavação (explosão, bate choco, retirada de materiais, execução de revestimento) acaba limitando o progresso diário a poucos metros. Em geral, verifica-se que o baixo grau de automação do NATM acaba por gerar a necessidade de maior mão de obra. A Tabela 7 apresenta um resumo geral das desvantagens do NATM conforme a

opinião dos Kolymbas (2005) e Chapman, Metje e Stark (2010), Jodl e Resch (2011) e Maidl *et al.* (2012).

Tabela 7 - Desvantagens do uso do método NATM

NATM – DESVANTAGENS	Kolymbas (2005)	Chapman, Metje e Stark (2010)	Jodl e Resch (2011)	Maidl <i>et al.</i> (2012)
Avanço de escavação limitados a até 5 m / dia	X		X	X
Sub ou sobrescavação			X	
Processo ainda com muitos processos manuais	X		X	
Uso intensivo de mão de obra			X	
Revestimento final realizado muito depois da escavação			X	
Aumentos de custos de mão de obra e canteiros			X	
Maiores riscos de segurança do trabalho	X	X	X	X
Revestimento realizado em loco			X	
Piores condições de qualidade do ar		X	X	X

A análise de vantagens e desvantagens das características está de acordo com a discussão prévia realizada no item 5.1. Túnel da Via Expressa Sul – Florianópolis, SC. De fato, a escolha do método NATM agilizou o início da obra. Porém, um dos aspectos negativos foi o período de escavação, muito longo para a extensão da obra (CBT, 2006).

6.2. TBM revestido com aduelas de concreto

Uma das grandes evoluções no setor tuneleiro foi a mecanização da escavação. Como descrito no item 3.2.4. Escavação com uso da TBM, pode-se perceber muitas vantagens do uso deste equipamento.

Tabela 8 - Vantagens do uso do método TBM

TBM – VANTAGENS	Kolymbas (2005)	Chapman, Metje e Stark (2010)	Jodl e Resch (2011)	Maidl <i>et al.</i> (2012)
Maior produtividade nas escavações	X	X		X
Produtividades de avanço muito mais altas	X	X		X
Escavação exata do perfil (sem sobrescavação)		X		X
Processo automático e contínuo do trabalho		X	X	X
Avanço da escavadora e do revestimento acabado	X	X		X
Pouca mão de obra e manutenção de canteiro			X	X
Melhores condições de trabalho e segurança		X	X	X
Mecanização e automação da escavação		X		X
Melhor leitura de performance				X
Revestimento industrializado		X	X	X
Melhoria da qualidade do ar do túnel na construção			X	

Por exemplo, destacam-se a alta produtividade das escavações e da melhoria nas condições de trabalho com este método. A Tabela 8 reúne as descrições de diferentes autores sobre as vantagens do uso de TBMs em escavações.

Verifica-se que a análise de vantagens das TBMs está de acordo com a discussão prévia realizada no item 5.2. Túnel GASTAU – São Paulo, SP, que descreveu um caso de uso de TBM com revestimento de aduelas. De fato, a longa extensão (5,2 km) e o pequeno diâmetro (6,19 m) do túnel justificaram este tipo de escavação.

Algumas das desvantagens foram reunidas na Tabela 9.

Tabela 9 - Desvantagens do uso do método TBM

TBM – DESVANTAGENS	Kolymbas (2005)	Chapman, Metje e Stark (2010)	Jodl e Resch (2011)
Baixa flexibilidade para variações geológicas		X	
Alto grau de automação e mecanização		X	X
Custo inicial de investimento mais alto		X	X
Custo mais alto do projeto	X	X	
Dificuldade de mudanças nas máquinas			X
Moderada flexibilidade de raios de curvas	X		
Dificuldades de implantar medidas de suporte			X
Seção do túnel quase que constante circular		X	X
Longo tempo para ordem de serviço			X
Longo tempo de mobilização			X
Seções circulares desfavorecem os suportes			X
Custo elevado para pequenas extensões	X	X	

O uso da TBM também tem algumas desvantagens, como o custo inicial mais alto, por conta da aquisição da máquina tuneladora, e a preparação para o início da execução que é mais demorada por conta das instalações necessárias. Como foi descrito no item 3.6. Custos de projetos tuneleiros, o projeto de um túnel com TBM deve ter uma extensão razoável (acima de 1,5 km) para ser viável economicamente.

Como foi discutido anteriormente, o revestimento de aduelas representa um custo excessivo na técnica TBM. Esta observação então se destacou como um ponto interessante para a pesquisa de alternativas de revestimento considerada na presente dissertação, como o revestimento de concreto extrudado (a ser descrito no item 6.3. TBM revestido com concreto extrudado).

Fukuchi (1991) advertiu que o custo do revestimento de túneis com placas pré-fabricadas não é apenas definida pelo preço unitário das aduelas, mas é necessário considerar os custos da construção e operação da fábrica de aduelas, do transporte dos segmentos dentro do perímetro urbano até o local de trabalho e, posteriormente, do transporte e movimentação das aduelas até a frente de escavação.

Alguns dos pontos negativos foram discutidos em maior profundidade para realizar uma diferenciação com o revestimento de concreto extrudado (a ser descrito a seguir).

6.2.1. Fabricação e estocagem de aduelas

As aduelas são elementos de concretos pré-fabricados que compõem um anel de espessura fixa usado para revestir um túnel à medida que a TBM avança a escavação. Para alimentar a demanda da esvacação de uma TBM, normalmente é necessária uma fábrica de grandes proporções para a confecção e armazenamento das aduelas. A área de produção pode ocupar uma área equivalente a um campo de futebol. Já a área de estoque pode ser ainda maior do que a da fábrica. Para dar uma ordem de grandea média, tem-se que conjunto todo de produção e armazenamento pode chegar a cerca de 30.000 m². Tem-se assim custos de produção relativamente altos devido ao tamanho excessivo e complexidade da fábrica e logística de armazenamento e transporte das aduelas. A Figura 64 ilustra um caso representativo destas instalações.

Figura 64- Fábrica de aduelas da linha 4 de metrô do Rio de Janeiro



Fonte: Santos (2011)

Outras áreas auxiliares de estocagem das aduelas também são necessárias. Uma área para estoque equivalente ao consumo de de 1 ou 2 dias de aduelas é normalmente reservada no emboque do túnel. Outras áreas de estoque intermediárias também podem ser utilizadas. Porém, em áreas densamente povoadas, reservar grandes áreas para estoques de aduelas pode ser inviável economicamente.

Por vezes estas áreas são cedidas por prefeituras ou estados para auxiliar nos trabalhos, diminuindo os custos de mobilização e manutenção. Porém em alguns casos é necessário alugar ou mesmo desapropriar terrenos para fazer estoques ou áreas de serviço, onerando consideravelmente o projeto.

Por exemplo, a falta de área de estoque demonstrou-se um problema no túnel Filder, na Alemanha, citada por Smith (2016). O transporte de aduelas da fábrica até a entrada do túnel era realizado por modal ferroviário. Neste caso foi registrado um baixo desempenho na operação da TBM pois não se tinha local para armazenar mais segmentos fabricados. O estoque de peças para colocação se limitava a 40 segmentos, o que representou uma limitação do processo. Smith (2016) ainda descreveu casos que a TBM parou enquanto a locomotiva com aduelas estava a caminho, ficando sem lugar para descarregar. Em

outra oportunidade, a TBM foi tão rápida que os carregamentos de trens não conseguiam suprir sua demanda. Assim, chegou-se a utilizar um depósito intermediário para balancear esta logística.

6.2.2. Transporte de aduelas

Um aspecto importante em termos logísticos e econômicos refere-se ao transporte das aduelas até a entrada do túnel, e um dos grandes desafios durante a execução é o equacionamento da quantidade de viagens de caminhão da fábrica até a entrada do túnel. Isto pode ser visto na Figura 65.

Figura 65 - Transporte rodoviário de aduelas na linha 4 no metrô do Rio



Fonte: Montano (2011)

Como exemplo, temos o caso da linha 4 de metrô do Rio de Janeiro descrito por Montano (2011). O projeto do túnel foi concebido com a utilização de aduelas de concreto distribuídas ao longo do comprimento aproximado de 5 km do túnel.

A fabricação das aduelas foi realizada no bairro de Leopoldina e o transporte até Ipanema percorria a distância de 15 km. Neste projeto, foi previsto que seriam necessárias 218 viagens de caminhão diárias num período de dois anos somente para o transporte das aduelas. Isto representou cerca de 55 caminhões fazendo quatro viagens por dia exclusivamente para este transporte.

Porém, além da distância elevada, o transporte sofria com trajeto entre a fábrica e a entrada do túnel com congestionamentos elevados, pois era realizado em uma área densamente povoada e com trânsito pesado, especialmente nas horas de rush. O estudo de Montano (2011) chegou a recomendar o transporte noturno para evitar entaves no trânsito, mas nem sempre foi possível realizar o trabalho neste horário, e o transporte acabou atrapalhando e intensificando os congestionamentos de trânsito ao longo do dia durante a construção do túnel.

6.2.3. Transporte de aduelas dentro do túnel

O transporte de insumos é uma das atividades críticas para a execução do túnel. A escolha de como será o revestimento irá determinar o trânsito interno. Para o caso de pré-fabricados, as aduelas de concreto podem ser transportadas com o auxílio de veículos plataforma ou pequenas locomotivas, que também podem ser utilizados para o transporte do material escavado para fora do túnel (Figura 66). Estas pequenas locomotivas usam sistemas de trilhos temporários para se locomover durante a construção. Por muitas vezes só é possível utilizar uma linha de trilhos (por conta do diâmetro do túnel ou porque ainda não se fez o *invert*), limitando o transporte desde o emboque até a frente de escavação.

Por outro lado, a colocação dos trilhos é uma atividade onerosa e demorada, assim como a limpeza dos mesmos ao longo da construção, representando um ponto negativo desta opção.

Há também uma limitação de rampas de 4% para as locomotivas (PEEV e SELLMER, 2017), inviabilizando seu uso em

túneis muito inclinados, como túneis adutores de águas para PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas).

Outra opção de transporte de material é o transporte das aduelas com MSVs (*Multi-Service Vehicles*, ou veículos multi-serviço, Figura 67) que usam cabines de direção em ambas extremidades da composição.

Figura 66 - Transporte de insumos com auxílio de locomotivas



Fonte: Schöma, 2017.

Isto representa uma melhoria pelo fato de não ser necessária a manobra de reversão dentro do túnel. Este tipo de veículo consegue lidar com inclinações de até 25%, bem maiores do que as de locomotivas. Seu revés é que não se consegue formar uma composição muito comprida, podendo levar poucos compartimentos de carga. Em alguns projetos, utiliza-se um anel de pré-moldados por viagem com velocidades médias de 10 km/h (quando carregado).

Como será justificado adiante, ambas as opções de transporte se demonstram lentas e custosas quando comparadas com o método de extrusão. Neste caso, a pasta cimentícia é levada do emboque à frente de escavação com MSVs adaptados como caminhões betoneira, obtendo uma melhor produtividade no transporte. Para cada viagem, pode-se levar 6 m³ de concreto até a frente de revestimento.

Figura 67 - Veículo de transporte de aduelas



Fonte: TMS, 2017

A Figura 68 ilustra uma alternativa de transporte com pequenos caminhões betoneira, facilitando manobras em locais com restrições de movimentos como túneis. A velocidade é maior com este tipo de equipamento, chegando a 25 km/h carregado, economizando o tempo de transporte do revestimento dentro do túnel. Isto representa mais que o dobro da velocidade quando comparado ao MSV de transporte de aduelas.

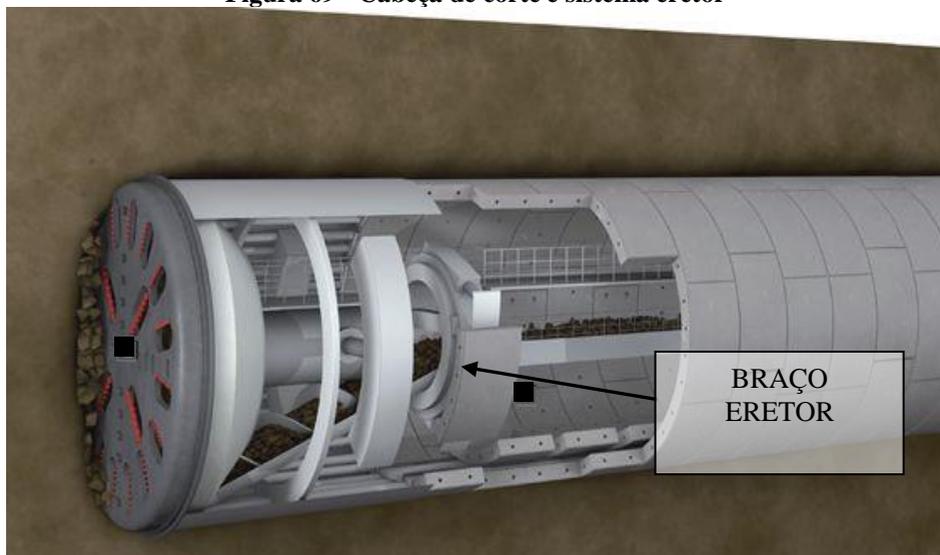
Figura 68 - Caminhão betoneira para túneis

Fonte: Jacon (2017)

6.2.4. Método executivo de montagem no túnel

A colocação das aduelas de concreto para a montagem de um anel de revestimento do túnel exige um alto esforço. Cada peça chega pode pesar mais de uma tonelada e deve ser colocada em diferentes posições ao longo da seção do túnel. Para isto é utilizado um eretor que posiciona cada um dos segmentos em sua devida posição.

Esta máquina é composta por um braço rotor e um sistema de ventosas que erguem as peças à vácuo. Este é um tipo de equipamento robusto, sofisticado e caro (Figura 69), sendo um dos elementos fundamentais do processo de escavação e que precisa trabalhar praticamente na mesma velocidade da cabeça de corte. Finalizado o posicionamento das aduelas, são colocados parafusos para prender as aduelas adjacentes.

Figura 69 - Cabeça de corte e sistema eretor

Fonte: Nakamura (2013)

6.3. TBM revestido com concreto extrudado

Autores como Fukushi (1991) e Babendererde e Babendererde (2001) apontam que a extrusão pode ser mais econômica que outros métodos de revestimentos de túneis. Há 6 anos, a técnica chegou até a ser premiada pela JSCE (Japanese Society of Civil Engineers, 2012) como uma realização de engenharia excepcional por conta de suas inovações e melhorias.

O item 5.3. Túnel Sanbongi Hara - Japão descreveu o uso desta técnica em um caso prático de um túnel de 3.015 m com 10,78 m de diâmetro escavado em argila e solos aluviais, onde muitas das vantagens descritas na Tabela 9 foram verificadas.

A Tabela 9 reúne as descrições de diferentes autores sobre as vantagens do uso de concreto extrudado no revestimento de túneis.

Tabela 9 - Vantagens do método de extrusão

TBM com revestimento de concreto extrudado – Vantagens	Fukuchi (1991)	Iida (2008)	Royal <i>et al.</i> (2010)
Redução do momento fletor	X	X	X
Menor complexidade de maquinário	X		
Menor espessura de revestimento	X	X	X
Menor tempo de auto suporte	X	X	X
Maiores taxas de progresso	X	X	X
Há soluções que permite implantar em solos, rochas ou combinações	X		
Material mais barato para revestimento	X	X	
Melhoria das condições de transporte	X		X
Produtividade equivalente à escavação da TBM	X	X	X
Melhor vedação de água			X
Eliminação do grouting			X

Há algumas desvantagens do uso de revestimento extrudado. Por exemplo, Maidl *et al.* (2012) descreveram que a técnica ainda é recente e não está bem consolidada. Também é citado que a técnica deve evoluir considerando condições mais modernas de reologia, cura e sistema de formas mais complexos.

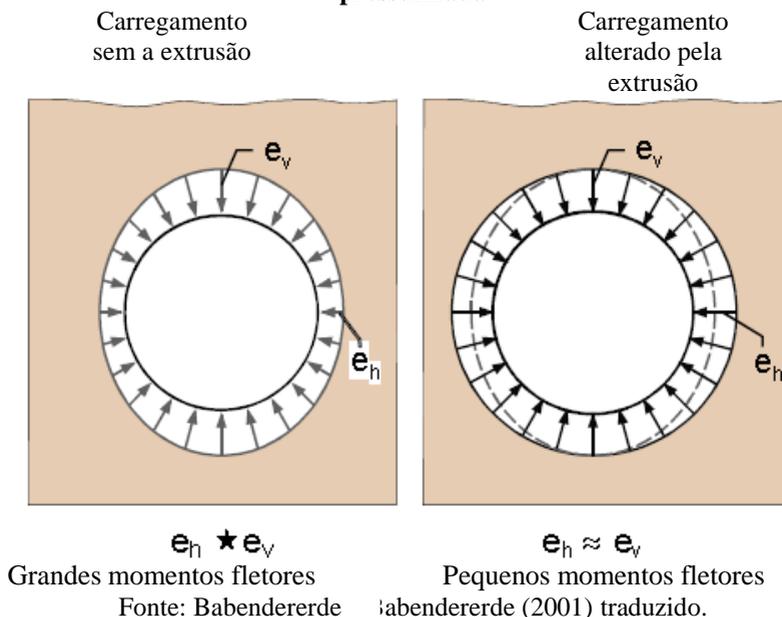
Algumas das vantagens do concreto extrudado no revestimento de túneis são melhor descritas nos quatro itens a seguir.

6.3.1. Redução do momento fletor

No procedimento de extrusão para revestimento de túneis, uma pasta de concreto (ou de outro polímero especial) é pressionada contra a forma e o terreno escavado. Nesta atividade são preenchidos os vazios que possam existir, na maior parte das vezes, sem a necessidade de fazer grouting (como é o caso das aduelas de concreto). Isto proporciona uma distribuição quase que uniforme das pressões no revestimento.

Assim, conforme citado por Babendererde e Babendererde (2001), Iida (2008), Royal *et al.* (2010) e Maidl *et al.* (2012), os momentos fletores acabam por ser menores por conta da pressão acumulada durante o endurecimento do concreto extrudado. A Figura 70 demonstra os momentos fletores exercidos com e sem o uso da técnica de extrusão.

Figura 70 - Pré-estresse do solo pelo processo de extrusão pressurizada



Onde:

e_h – Momento fletor horizontal

e_v – Momento fletor vertical

6.3.2. Espessura do revestimento – custos dos insumos

Em geral, a espessura do revestimento de concreto de túneis depende dos esforços a serem suportados. No caso da TBM com aduelas, a espessura das aduelas tem de ser dimensionada para a pior situação e para suportar integralmente o carregamento. Isto acaba diminuindo a consideração de auto suporte do terreno, uma vez que foi aumentado do arqueamento de tensões. Além disto, utiliza-se apenas um molde durante toda a execução, não permitindo assim aplicar diferentes espessuras no revestimento ao longo da extensão do túnel.

A diferença de espessura da parede de suporte pode ser percebida nas diferentes metodologias de execução. Por exemplo, considerando-se a recomendação de Bieniawski (1989), tem-se espessuras de até 20 cm para casos de terrenos com baixa capacidade. Por outro lado, para os segmentos de concreto a espessura média é de pelo menos 30 cm mesmo em terrenos com boa capacidade. Isto pode representar desperdícios de mais 50% no volume de concreto para o revestimento, o que representa uma diferença muito grande em termos de custo final de construção.

Para exemplificar esta questão, será feita uma breve comparação de volumes de revestimento para um túnel de 6 km de extensão e 10 m de diâmetro para uma obra destinada a trens de alta velocidade em Florença, Itália. A solução adotada para a execução foi com TBM e aduelas pré-moldadas. Porém, para fins de comparação, o estudo aqui apresentado irá considerar a execução do revestimento pelos métodos NATM com concreto projetado e TBM com aduelas pré-moldadas.

Raschilla e Severi (2012) descreveram as características básicas da geologia deste túnel, que atravessa maciços de solos aluviáres e argilosos. Na solução adotada considerou-se um revestimento com aduelas pré-moldadas de 40 cm de espessura. Por outro lado, para o mesmo túnel, caso fosse adotado a solução de NATM com concreto projetado, poderia-se utilizar uma espessura apenas 15 cm de espessura para o revestimento, segundo as classificações de Barton e Bieniawski (1989). Assim, a solução do NATM com concreto projetado proporcionaria uma redução de 62,5% no volume total do concreto utilizado na solução com as aduelas pré-moldadas.

Quando se aplica o NATM ao invés do TBM para executar o revestimento em toda extensão deste túnel, pode-se perceber o tamanho da economia. O revestimento com anéis formados pelas aduelas de

concreto na largura de 1 metro, utilizaria cerca de 12,57 m³. Assim, ao longo dos 6.000 metros de túnel, seriam utilizados 76.400 m³ de concreto, uma quantidade bastante elevada. Por outro lado, de fosse escolhida alternativa de NATM com concreto jateado (ou concreto extrudado) o volume total reduziria para apenas 28.275 m³.

Assim como no NATM com concreto projetado, os custos de construção com a metodologia SENS também seriam fortemente reduzidos em relação ao método TBM com aduelas de concreto pré-moldado. Akagi (2017) descreveu que esta metodologia foi usada em alguns túneis no Japão, obtendo resultados de custos de revestimento que se assemelham aos de concreto projetado com o NATM, ou seja, custos bem menores que os da solução com concreto pré-moldado.

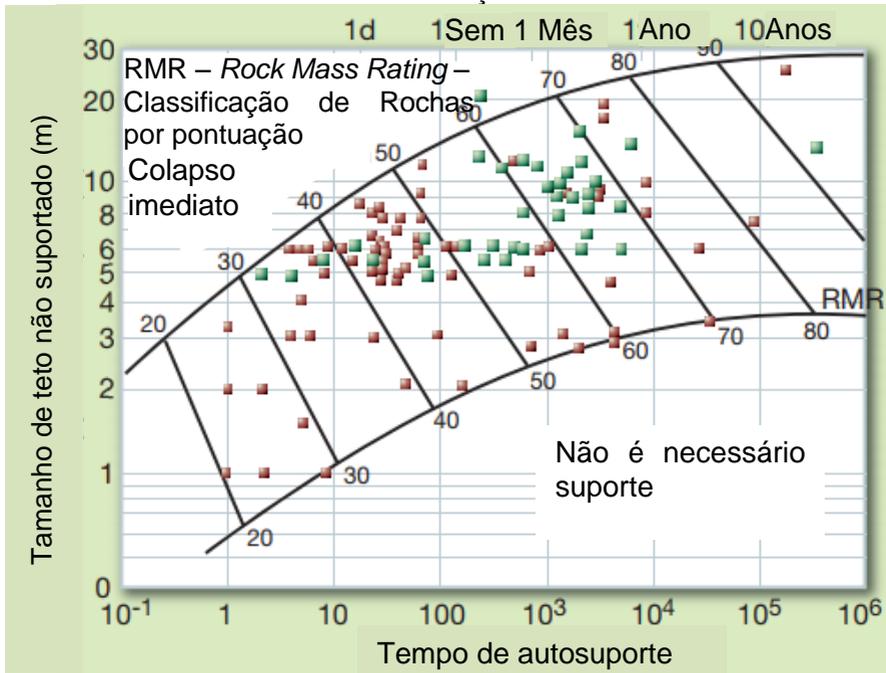
6.3.3. Segurança – Tempo de auto suporte

No NATM, o tempo de auto suporte é uma das questões chave para a escavação de um túnel, pois fornece uma medida da janela de tempo em que a escavação pode permanecer sem nenhuma intervenção de suporte. A aproximação foi proposta por Bieniawski (1989) seguindo a classificação RMR, conforme a Figura 71 ilustra.

Dependendo da qualificação RMR, Bieniawski propõe algumas soluções no sentido de construir o suporte quando o maciço estivesse um pouco menos confinado, como resultado da redistribuição de tensões ao redor da escavação pelo efeito do arqueamento. Assim, os esforços atuantes sobre o revestimento seriam menores, sendo também menor a necessidade de rigidez e espessura do revestimento.

Já na metodologia TBM, o escudo (*shield*) na frente de escavação funciona como um elemento de prevenção de colapsos e soltura de pedras, tornando o processo de escavação muito mais seguro, pois nunca deixa o maciço sem revestimento, diminuindo a o risco da exposição dos trabalhadores (KOCHEN, 2013). Kimura e Saito (1994) também descrevem sobre as melhorias no ambiente de trabalho e de segurança dos trabalhadores. Como está sempre sujeito a um elemento de suporte (*shield* ou revestimento com aduelas pré-moldadas), o conceito de tempo de auto-suporte não é relevante nos projetos de TBM. Por outro lado, acaba-se utilizando um maior volume de concreto no revestimento, pois o mesmo estará sujeito a maiores esforços.

Figura 71 - Recomendação de tempo sem suporte por classificação RMR



Fonte: Bieniawski (1989), traduzido.

Por fim, para o processo extrusão, tem-se uma situação intermediária entre a solução com concreto projetado e com aduelas pré-moldadas, admitindo-se que a execução do revestimento extrudado pode alcançar uma boa resistência até 12 horas após a escavação. No Japão, foram utilizadas concretos de resistência que alcançavam mais de 15 MPa de resistência em um dia. Além disto, assim como no NATM, também podem ser adotadas medidas para auxiliar o suporte da escavação, como a aplicação de tirantes, telas metálicas, cambotas, etc., aproveitando melhor a resistência do maciço escavado. Por fim, destaca-se que a espessura mais reduzida do revestimento também resulta em diâmetros úteis maiores para o túnel.

6.3.4. Taxa de avanço

Quando comparamos a taxa média de avanço de 3 m do NATM contra os 30 m do TBM, percebe-se uma grande desvantagem do NATM em termos do tempo de escavação. Por exemplo, Ehrbar (2008), engenheiro chefe do túnel Saint Gotthard descreve esta grande diferença no caso recente do projeto de travessia dos Alpes Suíços pelo Novo Túnel de São Gotardo (mais de 57 km em túnel duplo) onde foram executados os dois tipos de escavações, obtendo avanços muito diferentes. A solução NATM apresentou avanços diários médios de apenas 1 m por dia, enquanto atingia-se avanço médio de 11,3 m com a TBM, que por sua vez apresentou um desempenho máximo de 56 m de avanço em um só dia (HERRENKNECHT, 2012).

A grande diferença de avanço se dá pelo fato que no NATM não se consegue ter uma frente de escavação sem suporte numa extensão longa. Outra desvantagem descrita por Toma (2005) foi a dificuldade de automatizar o processo NATM, uma vez que o processo é muito particularizado para as diferentes situações geológicas que ocorriam ao longo da escavação.

Por outro lado, ressalta-se que o revestimento de concreto extrudado tem uma taxa de execução alta, compatível com o avanço das TBMs e a um custo menor comparado com as aduelas pré-moldadas.

6.4. Resultados do estudo comparativo

Após uma extensa consulta bibliográfica, foi elaborada uma tabela com aspectos mais característicos para os três tipos de revestimento considerados no presente estudo: NATM com concreto projetado, TBM com aduelas pré-moldadas e TBM com concreto extrudado. A Tabela 10 apresenta a síntese do estudo comparativo que poderá auxiliar os tomadores de decisão de próximos projetos na escolha de metodologias executivas dos revestimentos de túneis.

Tabela 10 - Comparativo das técnicas de revestimento estudadas

Características	NATM (concreto projetado)	TBM (aduelas de concreto)	Concreto extrudado
Forma do túnel	Bastante maleável	Circular	Circular
Revestimento para a Geologia do Terreno	Consegue atuar bem com rochas, mas tem dificuldades com solos	Há soluções que permitem solos, rocha e a combinação destes	Há soluções que permitem solos, rocha e a combinação destes
Confeção do revestimento	Dentro do túnel com mangueiras de projeção de concreto	Fábrica de aduelas	Dentro do túnel com auxílio de formas
Estocagem dos insumos do revestimento	Silos e tanques (pouca área)	Em pátios e nos emboques de túneis (grandes áreas)	Silos e tanques (pouca área)
Transporte rodoviário	Apenas dos insumos do revestimento	Gera um alto trânsito de aduelas	Apenas dos insumos do revestimento
Transporte intratúnel	Com caminhões ou dutos	Um anel por vez em vagão sobre trilhos	Com caminhões ou dutos
Método de montagem	Projeção de concreto	Braço eretor	Formas de concretagem
Espessura do revestimento	Menor (até 15 cm)	Grande (30 a 80 cm,)	Média (15 a 30 cm)
Custo	Baixo	Alto	Médio
Produtividade (m/dia)	< 3	20-35	20-35

Segurança	Frente de escavação tem maior risco de desmoronamentos e desprendimentos de rochas	Frente de escavação é sempre coberta pelo escudo, nunca ficando exposta	Frente de escavação é sempre coberta pelo escudo, revestimento adequado em poucas horas
-----------	--	---	---

Fonte: Silva, 2017.

6.5. Publicação de pôster em congresso mundial

O trabalho também gerou artigos de divulgação, permitindo obter opiniões não viciadas de revisores externos. Isto serviu tanto para o aprimoramento deste estudo quanto para a preparação de futuras publicações em revistas de alto fator de impacto.

Figura 72 - Publicação de poster no WTC 2018



Extruded Concrete Lining

SILVA G T1, NORONHA M A M2 and KOCHEN R3

1 FAPESC / UFSC researcher, Florianópolis, Brazil, guilherme@gfils.com.br

2 UFSC professor, Florianópolis, Brazil, marques.noronha@gmail.com

3 GeoCompany President, São Paulo, Brazil, kochen@geocompany.com.br

ABSTRACT

The most commonly used methods for tunnel construction are the NATM (New Austrian Tunneling Method) and the TBMs (Tunnel Boring Machines). These techniques typically use sprayed concrete and precast segments, respectively.

Extruded Concrete Lining (ECL) has recently been used as an innovative alternative to tunnel lining. This technique was developed in the last century by European and Japanese entities. Its use was in transportation tunnels, energy and sanitation. Two methodologies for the execution of this lining will be demonstrated. The first is an initiative of BraBo (Brazilian Borer), still in a conceptual character. It was proposed to use a sliding shape and differentiated rheologies for the cementitious paste. Another alternative was the description of the SENS (Shield Extruded NATM System), which was used in the Sanbongi Hara tunnel in Japan. In this case, a collapsible form was realized to aid in the concreting activity.

Studies have been compiled that show some improvements when compared to current solutions during construction and operation. The advantages of production, logistic, watertightness, lower bending moment, construction performance and costs are discussed. For this, a comparison will be made between the different excavation methods, in terms of both the performance of the lining and the logistics (transport and storage) and the executive process.

A table was presented compiling the characteristics of three types of execution: the NATM with use of projected concrete, the TBM with use of concrete segments and the TBM with the use of extruded concrete. Some advantages may be realized when the extrusion is chosen as the lining and support material of a tunnel.

Key Words: tunnel lining; extruded concrete; ECL; SENS; TBM.

Fonte: Silva, Noronha e Kochen (2018)

Foram enviados dois artigos, o primeiro no Simpósio 2018 FMGM (*Field Measurements in Geomechanics*), realizado no Rio de Janeiro e o segundo no WTC 2018 (*World Tunneling Congress*, Figura 72) realizado em Dubai. O artigo foi aceito neste congresso WTC 2018. Em ambos os casos, as críticas recebidas auxiliaram a melhorar a dissertação final.

7. CONCLUSÃO

7.1. Perspectivas

Esta dissertação trabalho tem por objetivo apresentar estudos sobre métodos de execução de revestimento de túneis com uso de concreto extrudado. Para demonstrar que seria possível sua utilização, elaborou-se uma comparação de três métodos de revestimento de túneis: NATM com concreto projetado, TBM com aduelas de concreto pré-moldado e o método inovador de TBMs com concreto extrudado (SENS). Tem-se assim uma avaliação tanto dos métodos mais tradicionais quanto de um método novo ainda com poucos casos de aplicação realizados. Explorou-se as experiências mais recentes com o concreto extrudado, principalmente no Japão.

Foi feita uma explanação sobre a classificação de rochas, escavações tuneleiras e sistemas de suporte para melhor embasar o estudo comparativo realizado. Assim conseguiu-se verificar algumas características dos sistemas de revestimentos, permitindo apresentar um resumo comparativos entre os três métodos considerados.

Como principal conclusão, destaca-se que a extrusão de concreto é ainda considerada um método inovador de revestimento de túneis. Apesar de ter sido inicialmente proposta em meados dos anos 60, apenas recentemente esta técnica pôde ser utilizada graças às modernas tecnologias de controle da reologia e da resistência para materiais cimentícios.

Nas aplicações recentes onde foi utilizado, observou-se que o concreto extrudado apresentou um desempenho mais rápido e econômico em relação às técnicas tradicionais. As taxas de execução de revestimento foram suficientes para acompanhar uma escavação TBM (mecanizada), ainda obtendo um custo menor deste produto.

A metodologia de extrusão é hoje uma realidade viável em projetos onde não se há uma preferência bem definida para o NATM com concreto projetado ou o TBM com aduelas pré-moldadas, como nos casos de escavação em solos siltosos ou argilosos.

Além disto, há também bastante espaço para a evolução do método de extrusão no sentido de obter uma operação mais simples. Neste sentido, a alternativa de extrusão apresentada pelo grupo BraBo de Santa Catarina pode fornecer resultados mais favoráveis, embora ainda necessitem aprimoramentos e testes em escavações reais.

A metodologia de revestimento com concreto extrudado em túneis tem grande potencial para alcançar maiores níveis de segurança, melhores taxas de avanço e maior economia (monetária e de tempo) nos empreendimentos de escavação. Alguns estudos validaram suas resistências e desempenhos de alguns projetos executados.

Dois máquinas para o revestimento extrudado foram apresentadas, descrevendo seus componentes e características. A primeira, desenvolvida pela iniciativa BraBo de Santa Catarina, utiliza um modelo de forma contínua e deslizante com uma tecnologia inovadora que oferece um processo muito rápido de endurecimento da pasta cimentícia, que ocorre de forma simultânea em relação à movimentação da frente de escavação. O segundo modelo, tecnologia japonesa denominada SENS, consiste de um sistema de formas desmontáveis que são posicionadas dentro da couraça de escavação (*shield*) permitindo executar a extensão de revestimento equivalente a cerca de um dia de avanço da escavação.

Aspectos produtivos, logísticos, facilidade na construção e custos foram apresentados e discutidos individualmente. As comparações foram compiladas na Tabela 10, com o intuito de fazer perceber quais são os pontos positivos e os que ensejam melhorias.

O resultado deste trabalho foi publicado no WTC 2018 (*World Tunnelling Congress*), o que pode favorecer que outras publicações surjam por conta desta divulgação. Por fim, destaca-se que o presente estudo pode ser descritos como um trabalho pioneiro na discussão da técnica de concreto extrudado para túneis no Brasil e também na divulgação da técnica inovadora da iniciativa da BraBo.

7.2. Recomendações para trabalhos futuros

Os desenvolvimentos sobre a aplicação de concreto extrudado em túneis estão ainda em fase inicial, e há várias frentes de continuidade de trabalho para explorar este assunto. O tema ainda se demonstra inovador no setor tuneleiro e a presente dissertação é uma das primeiras citações no mercado brasileiro.

No que diz respeito à pesquisa básica, a simulação numérica do processo de extrusão e da mecânica da distribuição de tensões destaca-se como um dos importantes objetos para futuras pesquisas. O autor registrou apenas um trabalho desenvolvido por Royal *et al.* (2012) que trata deste assunto específico. De forma análoga, pode-se fazer simulações comparando quantidades de materiais, performance e custos, quando aplicados os diferentes métodos (NATM, TBM e ECL).

A pesquisa básica com simulação numérica também pode ser resultar em novo métodos de cálculo para este tipo específico de revestimento do túnel. Há diferentes autores com formulações diversas sobre este tema. A verificação numérica de revestimentos tuneleiros se demonstra como um desafio relevante e que pode sugerir economia de grandes somas em projetos.

No que diz respeito a escolha da solução mais adequada para um projeto de revestimento de túneis, destaca-se a sugestão de Toma (2005) sobre o uso da técnica *balanced score card* para auxiliar a escolha de métodos executivos. Por exemplo, pode-se utilizar esta metodologia de escolha para avaliar um eventual futuro túnel comparando as três técnicas aqui apresentadas.

No que diz respeito às questões de projeto executivo, um melhor detalhamento sobre um sistema de extrusão deve ser realizado para se ter um orçamento mais preciso do equipamento. Isto facilitaria a geração de um comparativo de custos entre os diferentes métodos de revestimento. Este tipo de comparação costuma ter muito peso nas decisões de técnicas.

No que diz respeito à tecnologia de materiais, estudos mais avançados sobre a reologia da pasta cimentícia serão determinantes para a viabilidade da solução. Um bom estudo sobre reologia iria contribuir para a aplicação desta técnica em um maior número de projetos de túneis.

A reologia demonstrou-se como um desafio em si metodologia de formas deslizantes (item 4.1). Será necessário descrever em maiores detalhes os componentes deste produto como da mistura e o controle de qualidade de insumos e produtos.

Para se atingir as resistências e características propostas pela extrusão de forma deslizante (item 4.1), seriam necessárias introduzir novos componentes como fibras. O desafio é que a introdução das fibras pode aumentar a viscosidade. Este equilíbrio entre resistência, viscosidade e fator água x cimento se destacam como desafiadores.

Por fim, a aplicação de partes ou de um projeto completo de extrusão seriam fundamentais para a continuidade neste ramo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

AKAGI, Hirokazu. *Amazing Underground Construction Technology in Japan – Second Fujita Lecture*. 9th International Symposium on Geotechnical aspects of Underground Excavations in Soft Ground. São Paulo, 2017. Disponível em < <http://www.acquacon.com.br/4cbt/ppt/dia4/09h00-hirokazu-akagi-04-04-plenaria.pdf> > e <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781351583305> >. Acesso em Abril de 2017.

ALMOG, E.; MANGIONE, M; CASHIA, G. *Ground relaxation in segmental lining design using the Convergence-Confinement Method*. *Underground Design and Construction Conference*, 2015. Disponível em: < <http://mobile.hkieged.org/download/groundrelaxation.pdf> >. Acesso em março de 2018.

AMBONI, Giovanni. Estudo para um planejamento ambiental da Costeira do Pirajubaé. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC. Florianópolis, 2001. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/81602/181423.pdf?sequence=1> >. Acesso em setembro de 2017.

ARAÚJO, Renato; YANES, Diego Gazolli; BASTOS, Isabel Gomes; KOCHEN, Roberto. Túnel em Rocha executado com Double-Shielded TBM no Brasil. COBRAMSEG (Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica), 2012.

BABENDERERDE Engineers. *The tunnels expert*. Disponível em: < <http://www.babeng.com/company/history> >. Acesso em Janeiro de 2018.

BABENDERERDE, Siegmund; BABENDERERDE, Jan O. *Extruded Concrete Lining- The future lining technology for industrialized tunnelling. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*. P. 679 – 685. 2001, San Diego, Estados Unidos.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics*. 6: 4: 189-236. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support/ >. Acesso em Janeiro de 2018. (A2)

BARTON, Nick; BIENIAWKSI, Z. T. *RMR and Q – Setting records. Tunnels and Tunneling International*. Londres, Fevereiro de 2008. Disponível em: < http://www.geocontrol.es/geocontrol/images/pdf/12EB-rmr_and_q-setting.pdf >, Acesso em setembro de 2017.

BASTOS, Mário José Nascimento. *A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica. Lisboa, 1998.

BIENIAWSKI, Z.T. *Engineering rock mass classifications*. Nova York: Wiley. 1989.

BRABO. *Brazilian Borer*. Serviços de projeto e consultoria em túneis. Disponível em: < www.brabotech.com >. Acesso em Novembro de 2017.

BTS. *British Tunnelling Society. Tunnel Lining Design Guide*. Londres, Inglaterra. Editora Thomas Belfort. Março de 2004.

CAPES. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Brasília, Brasil. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br/acessoainformacao/perguntas-frequentes/sobre-a-capes/7473-sobre-a-capes> >. Acesso em Abril de 2018.

CBT. Comitê Brasileiro de Túneis. Túneis do Brasil. DBA Editora. São Paulo, Sp. 2006.

CBT. Túnel escavado chega a 540 metros de profundidade. Notícias de imprensa do CBT. Julho de 2016. Disponível em: < <https://braziliantunnelling.com.br/2016-04-27-12-48-30/noticias/item/658-conheca-o-tunel-em-rocha-de-540m-de-profundidade> >. Acesso em Julho de 2018.

CELESTINO, Tarcísio. Aspectos contratuais da construção de túneis. *In* TURB. Simpósio sobre túneis urbanos. ABGE / CBT. São Paulo, março de 1995.

CHAPMAN, David; METJE, Nicole; STARK, Alfred. *Introduction to tunnel construction*. Nova Iorque, Taylor & Francis e-Library, 2010. ISBN 0203895150.

CHISHIRO, Keizo. Estudo sobre o comportamento mecânico durante a escavação de um túnel utilizando a técnica de revestimento de concreto produzido no local (cast in place) (traduzido). 2011. Tese de doutorado em Engenharia Civil na cidade de Kyoto, Japão. 229 p. Disponível em: < http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/142192/2/D_Chishiro_Keizo.pdf >. Acesso em abril de 2017.

CJC, Engenharia e Projetos. Projetos rodoviários: Via expressa Sul. São Paulo, 2017. Disponível em: < <http://www.cjeng.com.br/br/projetos/rodovias/todos-rodovias/item/398-via-expressa-sul-florianopolis-brasil#!prettyPhoto> >. Acesso em setembro de 2017.

COSTA, Teresa; LOPES, Sílvia; LLIMÓS, Fernando Fernandez; AMANTE, Maria João; LOPES, Pedro Faria. A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas. 11º

Congresso nacional de bibliotecários, arquivistas e documentalistas. Lisboa, Portugal, 2012. Disponível em: < <https://www.bad.pt/publicacoes/index.php/congressosbad/article/view/429/pdf> >. Acesso em abril de 2018.

DYNAMIC AIR. Bella misturador de zona fluidizada – Catálogo. 2008. Disponível em: < www.dynamicair.com.br >. Acesso em Abril de 2017.

EHRBAR, Heinz. *Gotthard Base Tunnel, Switzerland: Experiences with different tunnelling methods in difficult ground*. 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. São Paulo, 2008. Disponível em: < <http://www.acquacon.com.br/2cbt/apresentacoes/2506/10h00heinzehrbar.zip> >. Acesso em Setembro de 2017.

EMSCHERGENOSSENSCHAFT. Operador público de empresa de águas. *Pipe Jacking for the Emscher Interceptor attains Section Lengths in Excess of 1100 m*. Revista *Tunnel on line*. Gütersloh, Alemanha. Maio de 2014. Disponível em: < http://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_Pipe_Jacking_for_the_Emscher_Interceptor_attains_Section_Lengths_in_Excess_of_1100m.html >. Acesso em Maio de 2017.

FONTOURA, Sérgio A. B. Tendências internacionais no projeto de escavações subterrâneas em zonas urbanas. In TURB. Simpósio sobre túneis urbanos. ABGE / CBT. São Paulo, março de 1995.

FOSTER-MILLER Associates Inc. *Extruded Tunnel Lining System. Phase I – Conceptual design and feasibility testing*. US Department of transportation, 1979. Disponível em : < <http://ntl.bts.gov/lib/57000/57600/57622/extrudedtunnelli00dohe.pdf> >. Acesso em Dezembro de 2016.

FRANÇA, P. Estudo do Comportamento de Túneis. Dissertação de Mestrado em Engenharia na Escola Politécnica. São Paulo, 2006. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-08122006-151549/publico/DissertacaoPedro.pdf> >. Acesso em Março de 2018.

FRANCIS, Fernando Olavo; ROCHA, Hugo Cássio. In: ABGE. Geologia da engenharia. São Paulo, 1998.

FREITAS, José de A. Materiais de construção: propriedades do concreto endurecido. Notas de aula. Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, UFPR. 2013. Disponível em: < http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/3/35/TC031_Propriedades_en_durecido_2014.pdf >. Acesso em Julho de 2018.

FUKUCHI, G. *The Present and Future of Mechanized Tunnel Works in Soft Ground*. Tunneling and Underground Space Technology, 1991, vol 6, p. 169 – 174. (A2)

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

GIESE, Thomas Guinter. Estimativa e comparação de custos entre tuneladoras inovadora e convencionais. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil. Florianópolis, UFSC, 2016.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: Atlas, 1999.

HASEGAWA, M.; NOGUCHI, M.; TAMAI, T. *Development of High Performance Concrete for New Tunneling Method 'SENS'*. *Concrete Journal, J_Stage*. Vol. 49, 2011. No. 1 P. 106-109. Disponível em: < www.jstage.jst.go.jp/article/coj/49/1/49_1_1_106/article >. Acesso em Dezembro de 2016.

HERRENKNECHT. *Challenges in mechanized tunneling technology*. 3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. São Paulo, Brasil, 2012. Disponível em: < <http://www.acquacon.com.br/3cbt/download/22-03/17h00.pdf> >. Acesso em Setembro de 2017.

HERRENKNECHT. *Herrenknecht EPB Shield*. Alemanha, 2015. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=-EGipAuWOHQ> >. Acesso em Setembro de 2017.

IIDA, Hiroomi. *Study on casting support tunneling system using TBM in unconsolidated soil with high groundwater level*. 2008. Tese de doutorado em Engenharia Civil na Waseda University, Tokyo, Japão. P.

218. Disponível em < dspace.wul.waseda.ac.jp/dspace/bitstream/2065/28707/3/Honbun-4716.pdf > em Dezembro de 2016.

IIDA, Hiroomi; ISOGAI, Atsumi; CHISHIRO, Keizo; ONO, Takatoshi; KOYAMA, Yukinori; KOIZUMI, Atsushi. *Work and design of a new tunneling method "SENS" to unconsolidated ground*. Geotechnical aspects of underground construction in soft ground. Proceedings of the 5th international conference of TC28 of the ISSMGE. Londres, p. 231-237. 2005.

ITA, AITES. *Why go underground? Contribution of the use of underground space to sustainable development*. International Tunneling and Underground Space Association. 2014. Disponível em: < <http://tunnel.ita-aites.org/en/why-go-underground> > em julho de 2017.

JACON. Equipamentos para construção de túneis. Silverwater, Austrália, 2017. Disponível em: < www.jacon.co.au >. Acesso em Maio de 2017.

JIMT. *SENS Method*. JIM Technology Corporation. Kawasaki, Japão, 2016. Disponível em: < <http://www.jimt.co.jp/en/technology/01.html> >. Acesso em Dezembro de 2017.

JODL, Hans Georg; RESCH, Daniel. *NATM and TBM – Comparison with regard to construction operation*. Geomechanics and Tunneling vol 4. Berlim, Alemanha, 2011.

JSCE. *High speed excavating of SENS. Outstanding Civil Engineering Achievement Award.of 2012.* Japan Society of Civil Engineers. Disponível em: < <http://www.jsce-int.org/node/428> >. Acesso em junho de 2016.

KAWAGUCHI, Hiroyuki; NAGASAWA, Yasunori; KURITA, Morlo; WATANABE, Maho, *Steel fiber reinforced concrete for extruded concrete lining method, vol. 22. Transactions of the Japan Concrete Institute Shimizu Corp.* Japão, 2000. Disponível em: < <http://imcyc.com/biblioteca/ArquivosPDF/Fibras%20de%20Acero/4%20Steel%20Fiber%20Reinforced%20Concrete%20for%20Extruded%20Concrete%20Lining%20Method.pdf> >. Acesso em março de 2018.

KELLEY, Gail. *Concrete lining system for continuous Tunnel Boring Machine.* Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. MIT – Instituto de Tecnologia de Massachussets. 1995. Disponível em: < <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/11811/32824978-MIT.pdf?sequence=2> >. Acesso em Março de 2018.

KIM, Hak Joon. *Estimation for Tunnel Lining Loads.* Tese de doutorado em Engenharia Geotécnica. Universidade de Alberta. Edmont, Canada, 1997. Disponível em: < <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/ftp04/nq23005.pdf> >. Acesso em Março de 2018.

KIMURA Y.; SAITO T. *Small-diameter automatic shield tunnel cast-in-place lining method realizes long-distance tunnel construction - development of ACE MOLE 1200-M2 construction method," Tunnelling and ground conditions. Proc. Congress. p. 377-384. Cairo, 1994.*

KOLIMBAS, Dimitrios. *Tunnelling and Tunnel Mechanics. A rational approach to Tunneling.* Universidade Innsbruck. Editora Springer. Nova York, 2005.

KONISHI, Shinji. *NATM lecture at Waseda University.* Maio de 2016. Disponível em: < www.f.waseda.jp/akagi/natm.pdf >. Acesso em Dezembro de 2016..

KOCHEN, Roberto. *Tuneladoras em rocha: uma nova fronteira para a engenharia de túneis brasileira. Apresentação da Construction Expo 2013.* São Paulo, SP. Disponível em: < <http://www.geocompany.com.br/ftp/tuneladorasrocha.pdf> >. Acesso em Julho de 2018.

LEITE, Maria Silene Alexandre. *Proposta de uma modelagem de referência para representar sistemas complexos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2004.* Disponível em: < <http://www.tede.ufsc.br/teses/PEPS4541.pdf> >

LOVAT. Rick P. *Tunnel Boring Machine Optimization.* Seminário Internacional “*South American Tunnelling*”. São Paulo, 2012.

Disponível em: < <http://www.acquacon.com.br/3cbt/download/21-03/12h00.pdf> >. Acesso em Setembro de 2017.

MAC-DONALD, Ricardo Caruso. Auditoria do TCU em obras de construção da Via Expressa Sul. TCE-SC. Florianópolis, 2006. Disponível em: < <http://consulta.tce.sc.gov.br/RelatoriosDecisao/RelatorioTecnico/2767176.PDF> >. Acesso em junho de 2017.

MAIDL, Bernhard; SCHIMIDT, Leonhard; RITZ, Willy; HERRENKNECHT, Martin. *Hardrock Tunnel Boring Machines*. Berlin: Editora Ernst & Sohn,. 2008. ISBN 3433016763. Disponível em: < http://www.wiley-vch.de/books/sample/3433016763_c01.pdf > Acesso em Janeiro de 2018.

MAIDL, Bernhard; HERRENKNECHT, Martin; MAIDL, Ulrich; WEHRMEYER, Gerhard. *Mechanised Shield Tunneling*. 2a edição. Wiley Blackwell. Berlim, Alemanha, 2012.

MEZGER, F.; RAMONI, M.; ANAGNOSTOU, G.; DIMITRAKOPOULOS, A.; MEYSTRE, N. Evaluation of higher capacity segmental lining systems when tunnelling in squeezing rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Ed. 65, 2017. Páginas 200–214.

MONTANO, Carlos Fernando. Estudo de Impacto Ambiental. Interligação da linha 4 com a linha 1 e sistema metroviário. AGRAR

Consultoria e Estudos Técnicos Ltda. Rio de Janeiro, Dezembro, 2011. Disponível em: < http://p-web01.mp.rj.gov.br/Arquivos/RAP/EIA_linha4.pdf >. Acesso em março de 2017.

MOSER, Stefano Rabello. Inovações tecnológicas na escavação mecanizada de túneis. Dissertação (bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. 146 p.

NAKAMURA, Juliana. Aduelas para túneis: Elementos pré-fabricados servem como revestimento final e apoio à escavação em túneis executados pelo método TBM. Revista Infraestrutura urbana PINI. 2013a. São Paulo, SP. Disponível em < <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/24/artigo277866-3.aspx> >. Acesso em Maio de 2017.

NAKAMURA, Juliana. Concreto projetado para túneis. PINI. 2013b. São Paulo, SP. Disponível em < <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/32/artigo300033-3.aspx> >. Acesso em Maio de 2018.

NORONHA, M.; FARIA, P. Modernização na Construção de Túneis Rodoviários Através do Uso de uma Nova Máquina Tuneladora. p. 1–12, 2008.

NORONHA, M.; FARIA, P. *A Soil TBM Based on Hydro-Excavation and Extruded Lining*. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014. Foz do Iguaçu - Brasil.

PAULO, Isabela. Análise de produtividade de máquinas tuneladoras em rochas duras. 2014. 93 p. Dissertação (bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

PEEV, E.; SELLMER, F. R. Uso de TBM em túneis de adução de PCHs nos rios Vermelho e Natal, SC. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Túneis e estruturas subterrâneas. São Paulo, 2017.

PEREIRA, Samuel Agostinho Carvalho. Estudo estatístico de levantamentos sistemáticos de parâmetros geotécnicos de diferentes classificações geomecânicas na escavação de túneis e a sua aplicação no pré-dimensionamento de sistemas de construção. Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013

PIERRI, Lidiani Cristina, Desenvolvimento conceitual de uma técnica para escavação de microtúneis em solo. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

PIRES, Ana Carolina Gonzaga; ALELVAN, Giovanna Monique; ASSIS, André Pacheco. Influência do método construtivo de túneis convencionais em seus aspectos contratuais. 10o Simpósio Internacional de qualidade ambiental. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <
<http://www.abes->

rs.org.br/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160905195310000000995.pdf >. Acesso em outubro de 2017.

PORTAL METALICA. Portal de construção civil. Brasil, 2017. Disponível em: < <http://www.metalica.com.br> >. Acesso em dezembro de 2017.

PUTZMEISTER. *Underground technology. The New Austrian Tunneling Method (NATM) & shotcrete: growing side by side*. Madri, Espanha, 2017. Disponível em: < <http://bestsupportunderground.com/natm-shotcrete/?lang=en> >. Acesso em setembro de 2017.

RAILSYSTEM. *Cut and cover: construction methodology*. 2013. Disponível em: < <http://www.railsystem.net/cut-and-cover/> >. Acesso em julho de 2018.

RAMONI, Marco. *On the feasibility of TBM drives in squeezing ground and the risk of shield jamming*. Tese de doutorado na ETH Zurich. Zurique, Suíça, 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006080779> >. Acesso em Janeiro de 2018.

RASCHILLA, A.; SEVERI, M. *The High Speed Railway Hub Of Florence: Construction Methodology And Project Management*. ITA-ITES World Tunnel Congress, 2012. Bangkok, Tailândia. Disponível

em: < http://www.selitunnel.com/pdf_articoli/WTC2012-Florence_FINAL.pdf >. Acesso em maio de 2017.

REDAELLI, Leandro Lorenzo; CERELLO, Luiz. In: ABGE. Geologia da engenharia. São Paulo, 1998.

ROBBINS. *Tunnelling cost reduction study*. Batavia, Illinois, Estados Unidos. Julho de 1999. Disponível em: < <http://lss.fnal.gov/archive/misc/fermilab-misc-1999-02.pdf> >. Acesso em Dezembro 2017.

ROYAL, A.C.D. HUNT, D.V.L. ROGERS, C.D.F. CHAPMAN, D.N. *Numerical simulation of the creation and performance of extruded concrete linings in microtunnelling*. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, vol 25, p. 745 – 753. (A2)

SAKATA, A.,;MATSUO, T.; NAKANISHI, K.; WADA, Y.. *The adoption of the SENS in an urban railway tunnel*, ITA WTC. Croacia, 2015.

SALLES, Colombo Machado. Estudo de Impactos Ambientais: Aterro Saco dos Limões. UFSC. Florianópolis, 1992.

SANO, Makoto. Construção do túnel Tsugaru Hota – Hokkaido Shinkansen. Revista JCMA (*Japan Construction Machinery and Construction Association*). Tóquio, Japão. Inverno de 2011.

SANTOS, Altair. Linha 4 do metrô do Rio não economiza em inovações. 2011. Disponível em: < <http://www.cimentoitambe.com.br/linha-4-do-metro-do-rio-nao-economiza-em-inovacoes/> >. Acesso em março de 2017.

SCHÖMA. Locomotivas Catálogo. 2017. Disponível em: < www.schoma.de > em Abril de 2017.

SCHUBERT, Wulf. *Development and Background of NATM*. Universidade de Tecnologia de Graz. *Austrian Tunnelling Seminar*. Ankara, 2015. Disponível em: < http://www.ytmk.org.tr/files/files/01_TUG_NATM.pdf >. Acesso em Setembro de 2015.

SILVA, Guilherme; NORONHA, Marcos; KOCHEN, Roberto. *Extruded Concrete Lining*. Proceedings do ITA – AITES World Tunnel Congress. Dubai, 2018. Disponível em: < <http://www.wtc2018.ae/download/poster/DXB-POSTER-767-Guilherme%20Silva.pdf> >. Acesso em Junho de 2018.

SOUZA, Jean Carlo Trevizolo. Propostas de diretrizes gerais para projeto de túneis rodoviários. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2012. Disponível em: < http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10912/1/2012_JeanCarloTrevizolodeSouza.pdf >. Acesso em outubro de 2017.

SMITH, Kristina. *Lining up for a real change*. Tunneling Journal. Julho de 2016. Essex, Inglaterra. Disponível em: http://www.herrenknecht-formwork.com/fileadmin/user_upload/herrenknecht-formwork.com/Seiteninhalte/Medien/Ver%C3%B6ffentlichungen/June_July_2016_Tunnelling_Journal_Linings_opt.pdf >. Acesso em Maio de 2017.

STAJ. Akima Tunnel Construction on Hokuriku Shinkansen Railway Line. Shield Tunneling Association of Japan. 2006. Disponível em: < http://english.shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/ecl_02.pdf >. Acesso em Setembro de 2017.

STERLING, Raymond L. *Developments in Excavation Technology: a Comparison of Japan, the U.S. and Europe. Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 7, No. 3, p. 221-235, 1992. (A2)

STUVA. *Tunnelling in Germany: Statistics, Analysis and Outlook*. Berlim, 2016. Disponível em: < https://www.stuva.de/fileadmin/media/stuva/stat/2016_08_TUNNEL_TUNNELBAUSTATISTIK.pdf >. Acesso em outubro de 2017.

SUGIMOTO, M. *Overview of Shield Tunnelling Technology. Case studies on shield tunnelling – SENS*. Universidade de Tecnologia de Nagaoka. 2010.

TERZAGHI, Karl. *Mecanica dos solos na pratica da engenharia*.. Rio de Janeiro: Ao Livro Tecnico, 1962. 659 p.

TRAVAGIN, Vinícius Bernardino. Subsídios para escolha do método construtivo de túneis. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012. Disponível em: < http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/347/1/CT_PPGE_C_M_T_ravagin%2C%20Vin%C3%ADcius%20Bernardino_2012.pdf >. Acesso em outubro de 2017.

TMS. Especialista multiserviço de logística. Catálogo. 2017. Paris, França. Disponível em: < <http://www.tms-company.com/vehicles/msv-underground/> >. Acesso em Abril de 2017.

TOMA, Hossam. *A Computer Model for Selecting Efficient Tunnelling Systems*. Tese de doutorado. Universidade de Viena, Áustria. 2005. 379 p.

VU, Minh Ngan; BROERE, Wout; BOSCH, Johan. *Structural Analysis for Shallow Tunnels in Soft Soils. International Journal of Geomechanics*. Vol. 17, Edição 8. Agosto de 2017. (B2). Disponível em < <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0000866> >. Acesso em Dezembro de 2017.

WALLYYS, Shani. *Obituary. Tunneltalk*, 2012. Disponível em: < <https://www.tunneltalk.com/Obituary-Jan13-Siegmund-Babendererde.php> >. Acesso em Abril de 2018.

WALLYYS, Shani. *Hydroshield and extruded lining usage in Lyon*. *Tunneltalk*, Janeiro de 2013. Disponível em: < <https://www.tunneltalk.com/Discussion-Forum-Jan13-Hydroshield-and-extruded-lining.php> >. Acesso em Abril de 2018.

ZINEVICH, N. I.; POGREBINSKII, A. A. Ways of perfecting the production of economical types of tunnel linings. *Hydrotechnical Construction*, 1971, vol 5, p. 46-49.