



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JOSÉ GUSTAVO DA SILVA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO NATM EM ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS – ESTUDO DE
CASO TÚNEIS NO TRECHO SERRA DA RODOVIA DOS TAMOIOS (SP-099)**

Recife
2019

JOSÉ GUSTAVO DA SILVA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO NATM EM ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS – ESTUDO DE
CASO TÚNEIS NO TRECHO SERRA DA RODOVIA DOS TAMOIOS (SP-099)**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^a Dr^a Rachel Perez Palha

Recife

2019

Catálogo na fonte

Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- L732e Silva, José Gustavo da.
Aplicação do método natm em escavação de túneis – estudo de caso túneis no trecho serra da Rodovia dos Tamoios (SP-099) / José Gustavo da Silva – Recife, 2019.
79 f., figs., tabs.
- Orientadora: Prof^a Dr^a Rachel Perez Palha
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2019.
Inclui referências e anexos.
1. Engenharia Civil. 2. Túnel. 3. NATM. 4. Processo construtivo. I. Palha, Rachel Perez (Orientadora). II. Título.
- UFPE
- 624 CDD (22. ed.) BCTG/2019–325



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: JOSÉ GUSTAVO DA SILVA

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora: RACHEL PEREZ PALHA

Examinador 1: FERNANDO JORDÃO DE VASCONCELOS

Examinador 2: ADOLPHO GUIDO DE ARAÚJO

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: APLICAÇÃO DO MÉTODO NATM EM ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS – ESTUDO DE CASO TÚNEIS NO TRECHO SERRA DA RODOVIA DOS TAMOIOS (SP-099).

LOCAL: CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS (CTG) – UFPE.

DATA: 12/07/2019. **HORÁRIO DE INÍCIO:** 15:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o candidato foi arguido oralmente pelos membros da banca com **NOTA: 10,0** (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) (**X**) **aprovado (nota > = 7,0)**, pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito. As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões). O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () **reprovado. (nota <3,0)**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo candidato.

Recife, 12 de julho de 2019.

Orientadora:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato:

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por toda resiliência dada para enfrentar os desafios da vida e atingir os meus objetivos.

Aos meus pais, por serem meus exemplos de força, determinação e superação para vencer as batalhas da vida, por todo amor e por toda ajuda a manter o foco, pelo incentivo e todo apoio ao longo de minha trajetória.

À Prof^a Dr^a Rachel Perez Palha, orientadora deste projeto de graduação, pelo seu empenho e dedicação no trabalho procurando sempre promover o melhor aos alunos de Engenharia Civil da UFPE.

Aos amigos que ao longo do curso pude cultivar, advindos de monitorias, pesquisas de iniciação científica, empresa júnior e sala de aula, por terem feito parte do cotidiano desta conquista, dentro e fora da universidade.

Aos grandes amigos, Ana Beatriz Gomes, Mariana Barbosa, Sawana Torres e Vinícius Souto por me inspirarem, me incentivarem e ensinarem que vale a pena o cultivo de verdadeiras amizades por toda a vida.

Aos colaboradores da Construtora Queiroz Galvão, em especial aos estagiários do programa de férias de 2019 por toda amizade e dedicação, aos Engenheiros Pedro Paulo dos Anjos e Vitor Borges, ao Geólogo Tiago Borges e à consultora de Gestão de Pessoas Luciana Rolim, por toda disponibilidade, dúvidas esclarecidas e materiais fornecidos, sem os quais não poderia ter concluído este trabalho.

A todos os professores do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, em especial à Prof^a Dr^a Leidjane Oliveira, pela importância e responsabilidade que tiveram em minha vida acadêmica e formação profissional.

A todos vocês, obrigado.

RESUMO

Com a crescente necessidade de integrar as regiões vencendo obstáculos ambientais e artificiais, bem como melhorar tráfego urbano favorecendo a inclusão dos modais de transporte, métodos de escavação de túneis foram desenvolvidos ao longo do tempo. Neste cenário, o método NATM (*New Austrian Tunneling Method*) está ganhando cada vez mais espaço entre as metodologias construtivas. O presente trabalho tem como objetivo geral descrever a aplicação do método NATM para construção de túneis em obras de infraestrutura, uma análise a partir da evolução dos principais métodos construtivos de túneis. Mais especificamente será explanado o método *Drill and Blast* para desmonte de rocha a fogo, a partir da análise do processo de perfuração da rocha, de carregamento da frente no maciço com o uso de explosivos, de controle de vibrações, além do uso de sistemas de ventilação e drenagem para promoção de um ambiente seguro de trabalho. Para a melhor compreensão do método em estudo foi abordado o caso da obra de duplicação da Rodovia dos Tamoios (SP-099), em seu trecho ascendente, no litoral norte de São Paulo, na cidade de Caraguatatuba, que contempla a execução de cinco túneis e tem por objetivo a melhoria da mobilidade na região, com impactos positivos ao escoamento de produtos do Porto de São Sebastião. A partir da análise construtiva, entende-se que o método NATM só garante o sucesso do projeto de túnel quando aliado a uma boa investigação geológica e técnicas bem estruturadas.

Palavras-chave: Túnel. NATM. Processo Construtivo.

ABSTRACT

With the increasing need to integrate regions overcoming environmental and artificial obstacles, as well as improving urban traffic by favoring the inclusion of transport modes, tunnel excavation methods have been developed over time. In this scenario, the New Austrian Tunneling Method (NATM) is gaining more space between constructive methodologies. The present paper aims to describe the application of the method NATM for the construction of tunnels in infrastructure works, an analysis from the evolution of the main constructive methods of tunnels. More specifically, the Drill and Blast method for rock will be explained, based on the analysis of the rock drilling process, the loading of the front in the mass with the use of explosives, vibration control, and the use of ventilation and drainage to promote a safe working environment. For the better understanding of the method under study, the case of the duplication project of the Tamoios Highway (SP-099), in its ascending stretch, on the north coast of São Paulo, in the city of Caraguatatuba, was addressed, which contemplates the execution of five tunnels and aims to improve mobility in the region, with positive impacts on the disposal of products from the Port of São Sebastião. From the constructive analysis, it is understood that the NATM method only guarantees the success of the tunnel project when combined with a good geological investigation and well-structured techniques.

Keywords: Tunnel. NATM. Construction Process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interior da <i>Coacla Massima</i> em Roma.....	15
Figura 2 - Antigo método com escoramento de madeira.....	16
Figura 3 - Sequência construtiva de túnel pelo Método VCA Direto.....	17
Figura 4 - Sequência construtiva de túnel pelo Método VCA Invertido.....	18
Figura 5 - Ilustração de um TBM.....	19
Figura 6 - Classificação das máquinas tuneladoras.....	19
Figura 7 - Corte longitudinal esquemático de TBM de frente aberta.....	20
Figura 8 - Corte longitudinal esquemático de TBM de frente fechada.....	20
Figura 9 - Inovação comparativa entre os métodos de escavação.....	22
Figura 10 - Carga sobre o revestimento.....	22
Figura 11 - Exemplos de parcialização de seção.....	23
Figura 12 - Aplicação de enfilagens.....	28
Figura 13 - Tubo de aço e válvula manchete.....	29
Figura 14 - Esquema da metodologia <i>Drill and Blast</i>	30
Figura 15 - Plano de fogo.....	31
Figura 16 - Jumbo em operação com plano de fogo em tela.....	32
Figura 17 - Perfuração em rocha com o jumbo.....	33
Figura 18 - Carregamento da frente de escavação.....	34
Figura 19 - Ventilação após detonação.....	35
Figura 20 - Limpeza da frente de escavação.....	36
Figura 21 - Utilização de <i>drainpack</i> nas obras do Rodoanel em São Paulo.....	37
Figura 22 - Projeção do concreto pelo método NATM.....	38
Figura 23 - Exemplo de robô de projeção de concreto.....	39
Figura 24 - Cambota metálica treliçada.....	40
Figura 25 - Arco invertido definitivo.....	41
Figura 26 - Tela de aço com cambotas.....	42
Figura 27 - Fibras metálicas e de polipropileno.....	43
Figura 28 - Linha de tirantes em seção plena.....	44
Figura 29 - Esquema geral de instrumentação.....	46
Figura 30 - Trechos da Nova Rodovia dos Tamoios.....	48
Figura 31 - Região de duplicação da Rodovia dos Tamoios.....	49

Figura 32 - Visão geral do traçado.....	50
Figura 33 - Região de Emboque do T1-CAR na Reserva da Serra do Mar.....	51
Figura 34 - Estoque de tubos de aço destinados a enfilagens.....	52
Figura 35 - Execução de enfilagens tubulares injetadas no T1-CAR.....	53
Figura 36 - Frente de serviço marcada com o plano de fogo.....	54
Figura 37 - Perfuração em rocha pelo jumbo em túnel auxiliar.....	55
Figura 38 - Parcialização da seção em <i>side drift</i>	55
Figura 39 - Caminhão para injeção de material explosivo.....	56
Figura 40 - Carregamento da frente com uso de explosivos.....	57
Figura 41 - Pilão carregado.....	57
Figura 42 - Evacuação do túnel.....	58
Figura 43 - Sistema de ventilação.....	59
Figura 44 - Retirada do material rochoso.....	59
Figura 45 - Atividade de <i>underbreak</i>	60
Figura 46 - Gabaritos para projeção de cimento.....	60
Figura 47 - Aplicação de <i>drainpack</i>	61
Figura 48 - Robô de projeção de concreto.....	62
Figura 49 - Aplicação de cambotas em trecho do túnel.....	63
Figura 50 - Furação dos tirantes pelo jumbo.....	64
Figura 51 - Instalação de tirantes.....	64
Figura 52 - Seções de convergência do túnel.....	65
Figura 53 - Realização de leitura dos pinos pela equipe de topografia.....	66
Figura 54 - Projeto de locação dos instrumentos no T5-SJC.....	66
Figura 55 - Análise de métodos.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conceitos do NATM.....	23
Tabela 2 - Classificação das rochas.....	26
Tabela 3 - Extensão dos túneis.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa e motivação.....	13
1.2	Objetivos gerais e específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Evolução dos Métodos de Escavações de Túneis.....	15
2.2	Método Vala a Céu Aberto (VCA).....	17
2.3	Método Mecanizado TBM (<i>TUNNELING BORING MACHINE</i>).....	18
2.4	NATM – <i>NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD</i>.....	21
2.4.1	Evolução Histórica.....	21
2.4.2	Conceitos do NATM.....	22
2.4.3	Investigações Geológicas e Geotécnicas.....	24
2.4.4	Classificação dos Maciços.....	25
2.4.5	Tratamentos Preliminares à Escavação.....	28
2.4.5.1	<i>Enfilagem Injetada</i>	28
2.4.6	Metodologia <i>Drill and Blast</i>	29
2.4.6.1	<i>Plano de Fogo</i>	30
2.4.6.2	<i>Perfuração da Rocha</i>	32
2.4.6.3	<i>Carregamento dos Explosivos</i>	34
2.4.6.4	<i>Sistema de Ventilação</i>	35
2.4.6.6	<i>Drenagem do Maciço</i>	36
2.4.7	Elementos de Suporte e Revestimento do Túnel.....	37
2.4.7.1	<i>Concreto Projetado</i>	37
2.4.7.2	<i>Cambotas Metálicas</i>	39
2.4.7.3	<i>Arco Invertido Definitivo (AID)</i>	40
2.4.7.4	<i>Malha de Aço</i>	41
2.4.7.5	<i>Fibras para Concreto Projetado</i>	42
2.4.7.6	<i>Tirantes</i>	43
2.4.8	Sismografia.....	44
2.4.9	Instrumentação.....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47

4	ESTUDO DE CASO.....	48
4.1	Contextualização do Problema.....	48
4.2	Geologia da Região.....	50
4.3	Tratamentos Preliminares à Escavação.....	52
4.4	Método de Execução em Rocha.....	53
4.4.1	Plano de Fogo.....	53
4.4.2	Perfuração da Rocha.....	54
4.4.3	Parcialização da Seção.....	55
4.4.4	Carregamento/Detonação.....	56
4.4.5	Limpeza/Choco.....	58
4.4.6	Drenagem do Maciço.....	60
4.4.7	Execução dos Elementos de Suporte.....	61
4.4.7.1	<i>Concreto Projetado.....</i>	61
4.4.7.2	<i>Cambotas Metálicas.....</i>	62
4.4.7.2	<i>Tirantes.....</i>	63
4.5	Sismografia.....	64
4.6	Instrumentação.....	65
4.7	Análise do Método NATM.....	67
5	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	ANEXO I: PERFIL GEOLÓGICO – TÚNEL 5 PRINCIPAL.....	73
	ANEXO II: FICHA DE CLASSIFICAÇÃO RMR.....	74
	ANEXO III: PROJETO DE ENFILAGENS.....	75
	ANEXO IV: PLANO DE FOGO.....	76
	ANEXO V: PROJETO DE CMBOTAS.....	77
	ANEXO VI: PROJETO DE TIRANTES.....	78
	ANEXO VII: RELATÓRIO DE SISMOGRAFIA.....	79
	ANEXO VIII: RELATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO.....	80

1 INTRODUÇÃO

Os túneis são exemplos de construções que acompanharam o desenvolvimento da humanidade, conforme Mascarenhas (2014) um dos mais antigos tipos de obra de estruturas exercidas pelo homem, são passagens abertas por meio de métodos construtivos em formações rochosas ou sob o solo, que tem o intuito de oferecer entre tantas soluções a melhoria da malha de transporte rodoviária e ferroviária, do sistema de escoamento de água, da indústria de minas e outros, a predominar em zonas variadas a função de interligação mais ágil diante do relevo topográfico disponível.

Segundo Travagin (2012) muito antes da explosão demográfica observada com o advento da Revolução Industrial, os túneis já eram obras de engenharia capazes de solucionar problemas e atender necessidades humanas. Moreira (2006) cita a existência de indícios ao longo das civilizações que demonstram o uso de obras subterrâneas em tumbas, canais de irrigação e minas já a partir do período Neolítico, além de obras da Roma Antiga em túneis para condução de esgoto e de abastecimento de água, o que soma às marcas de desenvolvimento dos povos em soluções de engenharia.

Soares et al. (2015) relata que em obras subterrâneas, tanto em meios urbanos quanto em meios não urbanos, os túneis são projetados e construídos de forma que seja possível controlar e manter em níveis aceitáveis o impacto ambiental que possa ser provocado no transcorrer da execução da obra.

Com a relação indissociável entre aspectos técnicos e econômicos, aos quais se somam as questões de segurança e meio ambiente, veio a necessidade de se tratar as obras subterrâneas com maior rigor científico. Isto significou uma mudança na filosofia de construção de túneis, que deixou de ter um caráter puramente empírico para assumir contornos mais analíticos (TRAVAGIN, 2012).

Nesse sentido, a pesquisa sobre o método de construção de túneis NATM foi realizada a partir do estudo de caso da Duplicação da Rodovia dos Tamoios em São Paulo, considerando as técnicas e procedimentos adotados, as variáveis geológicas, topográficas e geotécnicas, como forma de contribuição ao desenvolvimento de tecnologias da construção mais seguras, utilizando técnicas de planejamento e de monitoramento da execução.

1.1 Justificativa e motivação

Com a necessidade crescente de integrar as regiões vencendo obstáculos ambientais e artificiais, bem como melhorar tráfego urbano favorecendo a inclusão dos modais de transporte, métodos de escavação de túneis foram desenvolvidos ao longo do tempo. Nessa perspectiva, o estudo referente aos métodos construtivos faz-se necessário.

O potencial crescimento de métodos construtivos subterrâneos em túneis incentiva a ampliação do conhecimento de variados métodos e aplicações, como forma de promover melhores soluções em engenharia ao projeto, uma vez que o Brasil possui obras de túneis em andamento, com traçados que percorrem o subsolo de grandes cidades e de reservas ambientais. Assim, a ideia de promover soluções que contornem topografias desfavoráveis, caos de trânsito e que realizem integração entre modos de transporte como incentivo ao comércio é uma pauta imprescindível ao país.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O presente trabalho tem como objetivo geral descrever a aplicação do método NATM para construção de túneis em obras de infraestrutura e realizar uma análise a partir da evolução dos principais métodos construtivos de túneis.

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- Apresentar conceitos técnicos do método NATM para execução de túneis utilizados em obras de infraestrutura, bem como avanços tecnológicos no processo construtivo;
- Abordar os elementos estruturais de suporte, as etapas construtivas e, por conseguinte, os mecanismos de controle e verificações durante a execução do método NATM;
- Explicar o método *Drill and Blast* para desmonte de rocha a fogo, a partir da análise do processo de perfuração da rocha, de carregamento da frente no maciço com o uso de explosivos, além do uso de sistemas de ventilação e drenagem para promoção de um ambiente seguro de trabalho;
- Demonstrar a importância de estudos geológicos e geotécnicos para estudos preliminares à implantação do método NATM, além de estudos contínuos do maciço para realização de eventuais mudanças de projetos a favor da segurança;
- Apresentar os benefícios da execução de uma obra, utilizando o método NATM, a partir do estudo de caso da obra de “Duplicação da Rodovia dos Tamoios (SP-099), em seu trecho ascendente”, no litoral norte de São Paulo, na cidade de Caraguatatuba.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão citados os métodos VCA, o método TBM, e mais a fundo será abordado o método NATM, especificamente seus principais conceitos, seus elementos de suporte, os tratamentos preliminares no maciço, a sequência executiva e os mecanismos de controle necessários para garantir a eficácia do método.

2.1 Evolução dos Métodos de Escavações de Túneis

A escavação de túneis, nos primórdios da civilização e antes do advento dos explosivos e das máquinas escavadoras, era desenvolvida por operários que esculpam os maciços utilizando basicamente ferramentas manuais (MOREIRA, 2006).

Moreira (2006) cita que os primeiros indícios de escavações de túneis datam da Antiguidade até à Idade Medieval, em que vestígios mostram um desenvolvimento de redes de túneis para o abastecimento de água e esgoto. O túnel mais famoso do Império Romano foi a *Cloaca Massima*, ilustrado na Figura 1, um esgoto urbano com 3,2m de largura por 4,2m de altura, um grandioso feito para o período.

Figura 1 – Interior da Cloaca Massima em Roma



Fonte: Youtube (2019)

O grande estímulo na construção de túneis, nos tempos atuais, aconteceu ao longo do século XIX, segundo Moreira (2006) devido ao crescimento dos caminhos-de-ferro tanto na

Europa como na América do Norte. Conforme Moreira (2006), essa mudança implicou nas alterações da filosofia acerca da segurança, de parceria com os aspectos técnicos e econômicos, a decretar os maiores desafios da engenharia de túneis. Dessa forma, a instalação de suportes e os métodos de escavação foram os alvos do desenvolvimento na construção de túneis.

De acordo com Mascarenhas (2014), o avanço das escavações de túneis era feito por meio de pequenas galerias, que eram unidas na fase de alargamento. O processo era trabalhoso, complicado e perigoso, com grande utilização de madeira para o escoramento, como ilustrado na Figura 2, o que impossibilitava o emprego de grandes equipamentos em meio a pouco espaço. O revestimento era feito por etapas, com posterior remoção do escoramento e utilizando alvenaria de pedras ou tijolos, chegando a ter até dois metros de espessura.

Figura 2 – Antigo método com escoramento de madeira



Fonte: <https://elembrujodegaia.blogspot.com> (2019)

Na Modernidade, houve uma crescente procura por estruturas subterrâneas em geral. A melhoria das condições de vida das populações e a minimização dos impactos ambientais são dois fatores que orientam a concepção de infraestruturas subterrâneas, podendo-se dizer que se está diante da “Era Ambiental” dos túneis e que a doutrina principal é da otimização dos procedimentos. (MOREIRA, 2006)

Segundo Lima (2016), atualmente, existem diversos métodos para a execução de túneis sendo aplicados ao redor do mundo como, por exemplo, o método da Vala a Céu Aberto (método destrutivo), o método TBM – *Tunneling Boring Machine* (método mecanizado), e o método NATM. Os métodos de execução sofreram adaptações e evoluções ao decorrer do

tempo, e hoje, cada um possui vantagens e desvantagens que influenciam na escolha da metodologia ideal para cada caso.

2.2 Método Vala a Céu Aberto (VCA)

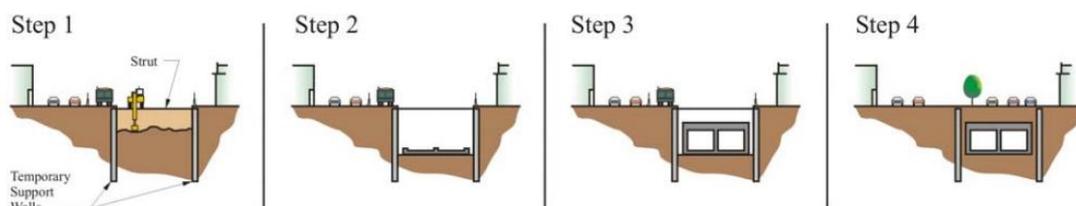
Método conhecido como destrutivo devido às interferências na superfície, este método possui variações, podendo ser executado de forma direta ou invertido. A aplicação do método permite a execução das escavações em condições geotécnicas e geológicas variadas, incluso solos moles. O recobrimento costuma ser baixo, de até 20 m de profundidade, sendo aplicado onde não há interferência com o sistema viário, ou onde seja possível desviar o tráfego sem grandes transtornos.

Conforme Travagin (2012) a construção de um túnel por recobrimento de vala pelo método direto consiste em escavar uma vala ao longo do traçado do túnel a ser implantado, construir o túnel e, após executar a cobertura do túnel, cobrir com solo, recuperando a situação de superfície existente antes da implantação da obra. Dessa forma, o processo ficou conhecido internacionalmente como *Cut and Cover*, em sua tradução, escavar e cobrir.

Na construção de túneis, no método de valas a céu aberto, são utilizados elementos estruturais, como tirantes, pregagens do solo e estroncas, para possibilitar às contenções um desempenho de seu papel até o momento do reaterro.

O procedimento do método, em linhas gerais, consiste na abertura de valas de grandes dimensões com uso de paredes laterais de contenção escoradas ou em talude, com rebaixamento do lençol freático existente à profundidade necessária, posterior construção das estruturas definitivas como paredes, lajes e pilares, e por fim, realiza-se o reaterro, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Sequência construtiva de túnel pelo Método VCA Direto

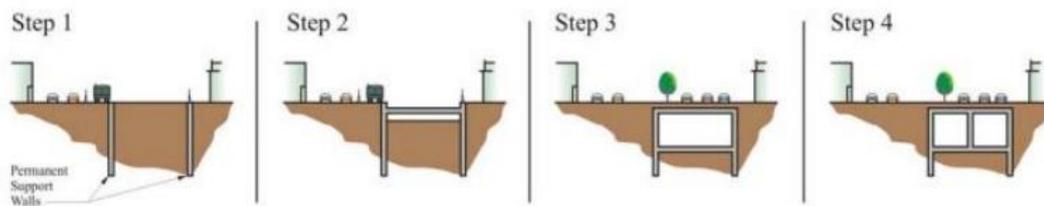


Fonte: NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE (2009)

O Método Invertido, também conhecido como *Cut and Cover*, é uma variação da escavação em VCA pelo Método Direto, com distinção na sequência construtiva do túnel e no momento de recobrimento da vala escavada. O emprego do método é recomendado em casos onde a superfície interditada necessita de liberação rápida.

Lima (2016) aborda que o método consiste na execução das paredes de contenção laterais diretamente pela superfície do terreno através de paredes guias. Logo após, são feitas as contenções laterais, apenas será necessária a escavação até a laje superior do túnel e não mais até a parte inferior como no método VCA direto, permitindo assim a rápida liberação do tráfego na superfície, o que pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Sequência construtiva de túnel pelo Método VCA Invertido



Fonte: NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE (2009)

Por conta da elevação de custos proporcionada e também pela grande complexidade técnica, em especial no que se refere às contenções e ao trato com a água subterrânea, o método de vala recoberta é especialmente recomendado a túneis de pequena profundidade, chamados *shallow tunnels*, situados a não mais do que 35 metros da superfície (TRAVAGIN, 2012).

2.3 Método Mecanizado TBM (*TUNNELING BORING MACHINE*)

O método construtivo mecanizado de túneis utiliza uma máquina tuneladora (Figura 5), conhecida no Brasil por *Tatuzão* e internacionalmente por TBM, abreviação do inglês para *Tunneling Boring Machine*.

Moreira (2006) define as máquinas tuneladoras como escudos geralmente metálicos de seção idêntica àquela que vai ser escavada. Constituem em si mesmos suportes temporários dos túneis e permite operações de escavação e instalação do suporte definitivo em boas condições de segurança. O processo dá-se pela abertura em seção total, com deslocamento da máquina ao longo do túnel em um processo contínuo.

Figura 5 – Ilustração de um TBM

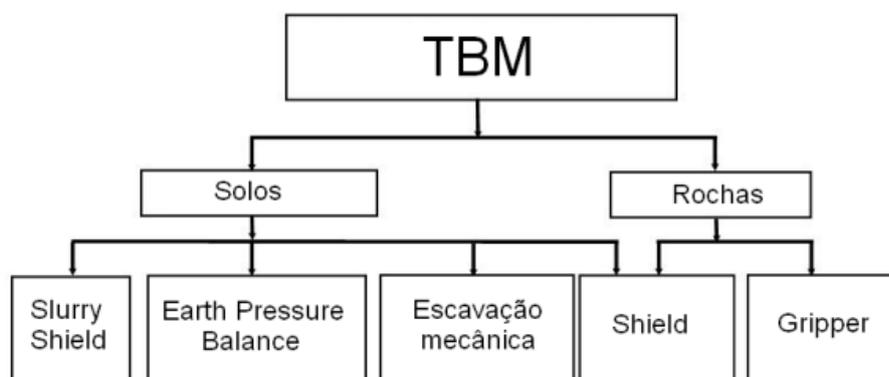


Fonte: <https://tunneltalk.com> (2019)

O TBM é um sistema complexo compreendido de um corpo principal e outros elementos, constituído por mecanismos de corte, de impulso, de direção, de proteção, de perfuração exploratória, de controle e suporte do maciço, de instalação de revestimento, de remoção de escombros, ventilação e de abastecimento energético (NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE, 2009).

Lima (2016) destaca a existência de diversos tipos de máquinas tuneladoras, com variados tamanhos e tipos de terreno onde possam atuar, porém todos os modelos têm duas funções principais, a escavação e a contenção do terreno. Dessa forma, todos os equipamentos funcionam em um sistema bem parecido. Os modelos de tuneladoras e sua classificação dependem do solo a ser escavado, conforme a Figura 6.

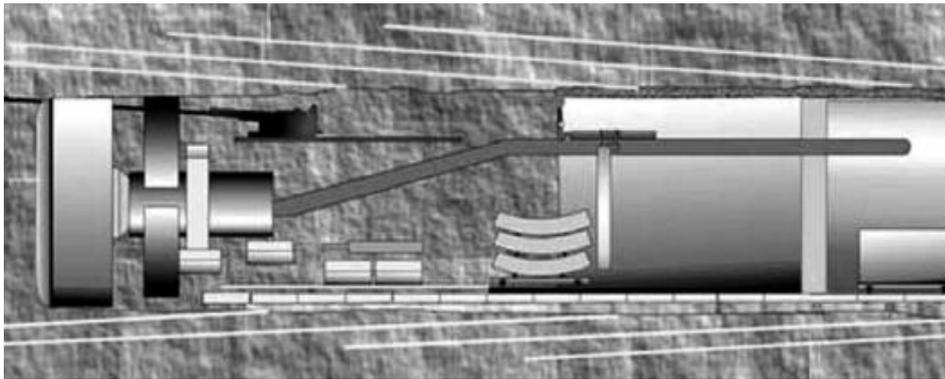
Figura 6 - Classificação das máquinas tuneladoras



Fonte: Adaptado de NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE (2009)

O TBM pode operar em duas modalidades distintas, em conformidade com a forma prática e como a estabilidade da frente de escavação é controlada. Quando não há necessidade de suportar a frente por condições favoráveis de estabilidade e não existência de grande influência de água, utiliza-se TBM de frente aberta (Figura 7). As frentes abertas são formadas basicamente por um tubo oco que se faz penetrar no maciço, sendo possível ainda a aplicação simultânea de ar comprimido para gerar uma pressão estabilizadora na frente de escavação.

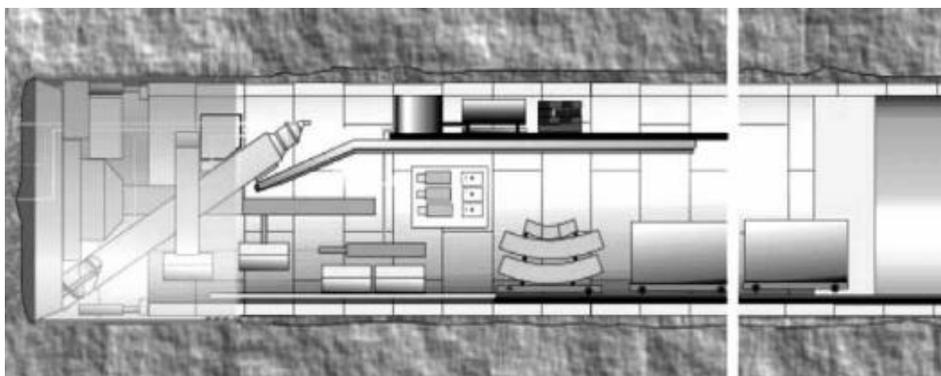
Figura 7 – Corte longitudinal esquemático de TBM de frente aberta



Fonte: Moreira (2006)

Em contrapartida, quando a frente de escavação oferece condições instáveis, que obrigam à utilização de pressões que a estabilizem, ou quando se verificam elevados fluxos hidráulicos, utiliza-se o TBM de frente fechada (Figura 8). Conforme Moreira (2006) o confinamento pode ser obtido por meios mecânicos, através de ar comprimido ou outros fluidos, ou ainda por contrapressão de terras, dando cada um destes meios origem a outros tipos de processos e tuneladoras.

Figura 8 – Corte longitudinal esquemático de TBM de frente fechada



Fonte: Moreira (2006)

Em relação aos fatores positivos do processo mecânico das máquinas tuneladoras em comparação ao método com explosivos, elencam-se a estabilização e segurança em sintonia com o avanço das escavações, alta regularidade e qualidade da seção, maior velocidade de avanço (1-70 m/dia) e menor quantidade de mão de obra.

Lima (2016) pontua que entre as desvantagens do método mecanizado estão os altos custos de aquisição, montagem, instalação e operação do equipamento, tornando sua utilização viável somente para túneis longos, acima de oito quilômetros. Um fator condicionante na utilização do método está relacionado à inflexibilidade com mudanças de geometria da seção e de tipos de maciços presentes no traçado dos túneis, que pode inviabilizar o uso do equipamento.

2.4 NATM – *NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD*

Nesta seção será abordado o método NATM, possibilitando o aprofundamento de conhecimentos sobre a metodologia criada para se ter uma maneira mais segura e eficiente de construir túneis.

2.4.1 Evolução Histórica

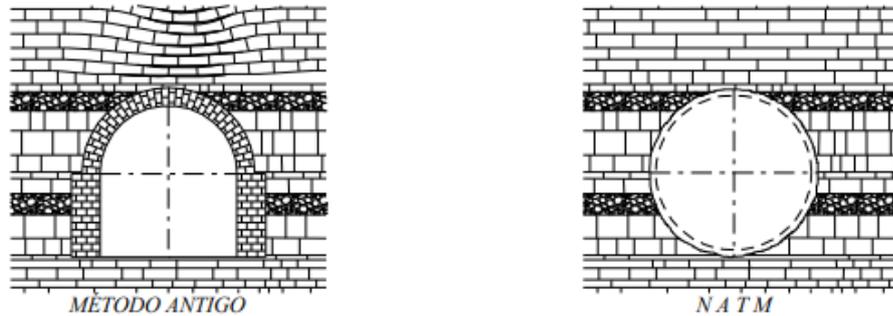
De acordo com Solotrat (2018), o processo de construção de túneis NATM foi desenvolvido na Áustria por Pacher e Rabcewicz, teve evolução na Europa entre o final da década de 1950 e a primeira metade da década seguinte, sendo fruto da experiência com trabalhos de execução de túneis em minas de carvão. À época observou-se que os escoramentos de madeira colocados nas galerias das minas, após as rupturas dos primeiros suportes provisórios, causadas pelos esforços do maciço, podiam ser mais leves do que os instalados inicialmente, em consequência do alívio de tensões ocorridas (SOLOTRAT, 2018).

Segundo Rocha (2012) o NATM foi introduzido na década de 1970 para a construção da Ferrovia do Aço entre Belo Horizonte e Rio de Janeiro e para a Rodovia dos Imigrantes, entre São Paulo e Santos. Muitos túneis NATM em solo e algumas estações foram construídos para o Metrô de São Paulo na década de 1980 e 90, período em que se constata a crescente difusão do método.

Conforme Campanhã & Boscov (1998) o princípio básico do NATM é fazer com que o terreno, em vez de atuar somente como carga sobre o revestimento do túnel, ele próprio atue

como um elemento que colabora com a resistência da estrutura. Dessa forma, o método mostrou-se inovador diante das vantagens econômicas proporcionadas ao se aproveitar a capacidade de suporte do terreno ao longo de sua seção (Figura 9).

Figura 9 – Inovação comparativa entre os métodos de escavação

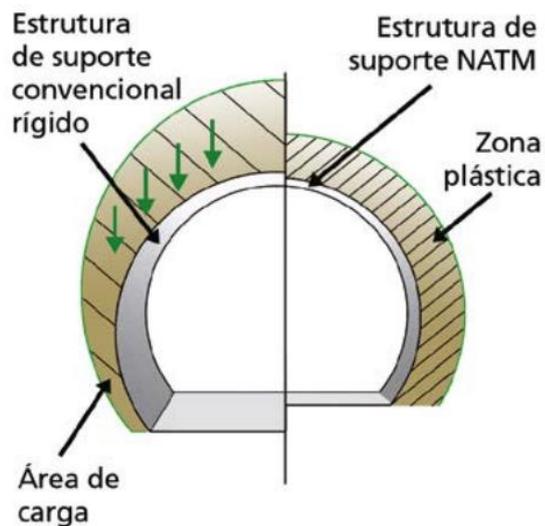


Fonte: Campanhã & Boscov (1998)

2.4.2 Conceitos do NATM

Segundo Solotrat (2018) o maciço que circunda o túnel, inicialmente atua como elemento de carga, mas passa a se constituir em elemento de escoramento com o tempo. Isto se deve à mobilização de suas tensões de resistência. Este é um dos conceitos fundamentais do NATM, o princípio da estabilização pelo alívio das tensões e deformações controladas (Figura 10).

Figura 10 – Carga sobre o revestimento

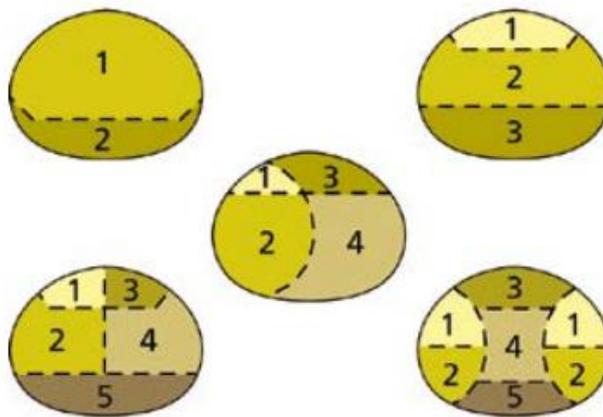


Fonte: Solotrat (2018)

Lima (2016) destaca que cada maciço possui um tempo de autossustentação diferente e que irá definir o momento ideal para a aplicação dos elementos de suporte como o concreto projetado e os tirantes. Estes elementos devem ser aplicados após uma acomodação inicial do maciço e antes de sua desestabilização, de forma a reduzir a dimensão dos suportes necessários.

Segundo Moreira (2006) a escavação de seções através de soluções NATM permite o faseamento da escavação do procedimento e do qual advêm a grande flexibilidade do método e a sua ajustabilidade a uma enorme variedade de geometrias possíveis. Assim, o método evidencia outro conceito fundamental, a parcialização da seção (Figura 11), que favorece a possibilidade de projetar em formas e tamanhos diferentes, além de aplicação de variadas seqüências construtivas.

Figura 11 – Exemplos de parcialização de seção



Fonte: Solotrat (2018)

Na tabela a seguir são explanados, segundo Murakami (2001), os 15 principais conceitos nos quais o NATM está baseado.

Tabela 1 – Conceitos do NATM

CONCEITOS DO NATM	
Conceito 1	Através do alívio de tensões, o maciço circundante ao túnel que inicialmente atua como elemento de carregamento passa a participar do suporte.
Conceito 2	Preservar a qualidade do maciço circundante tanto quanto possível com cuidados durante a escavação e aplicação do suporte, evitando o início de um processo de deterioração do maciço.

Conceito 3	Impedir a deformação excessiva do maciço de forma que ela perca a capacidade de autossuporte passando a constituir um carregamento sobre o suporte.
Conceito 4	Trabalhando-se com deformações compatíveis com o maciço a capacidade autoportante é conservada passando este a trabalhar como um elemento portante.
Conceito 5	Caracterizar geológica e geotecnicamente o maciço de forma a se obter o máximo subsídio na definição do melhor método construtivo e para o dimensionamento do sistema de suporte e do revestimento.
Conceito 6	Adequar a parcialização da frente de escavação em função do comportamento do maciço, do tempo de autossustentação, da deformabilidade do material e dos equipamentos disponíveis.
Conceito 7	Utilizar o suporte adequado em termos de resistência e deformabilidade no momento certo, tirando partido da capacidade de autossuporte do maciço.
Conceito 8	Não devem ser deixados espaços vazios entre o suporte e o maciço que permitam o desagregamento do material e conseqüente perda da capacidade de autossuporte.
Conceito 9	Utilizar-se de elementos de suporte (concreto projetado, telas, ancoragens e cambotas) necessários e suficientes para impor tensões confinantes que equilibrem a abertura mantendo as deformações em níveis aceitáveis.
Conceito 10	Manter o fechamento do AID em distâncias compatíveis com a capacidade de carga da calota aberta e o mais próximo possível da frente de escavação.
Conceito 11	Definir uma seção de escavação com a menor área possível.
Conceito 12	Conceber formas que privilegiem o equilíbrio dos carregamentos predominantemente por esforços de compressão, ou seja, procurar formas arredondadas.
Conceito 13	Realizar o acompanhamento das deformações através de instrumentação, cujas leituras servirão para subsidiar as revisões e otimizações do processo construtivo e do projeto, além de permitir o monitoramento da segurança da obra.
Conceito 14	O acompanhamento das instrumentações deve indicar a total estabilização dos deslocamentos após a conclusão do suporte e do revestimento.
Conceito 15	Drenar o maciço sempre que a presença da água possa provocar algum dano ou mecanismo que ponha em risco a obra e o local de trabalho.

Fonte: Mascarenhas (2014)

2.4.3 Investigações Geológicas e Geotécnicas

Reis et al. (2006) caracteriza o estudo do perfil geológico como o primeiro passo para a elaboração do projeto, o que origina a conceituação geológica do maciço através de estudos, que compreendem:

- Pesquisa bibliográfica e mapeamento geológico-geotécnico da área de implantação do túnel;
- Elaboração de modelo geológico: ênfase em compreensão estrutural e geomorfológica;
- Elaboração do plano de investigação do maciço por meio de sondagens mecânicas e/ou geofísicas, bem como caracterização das amostras das sondagens e elaboração da classificação geomecânica do maciço.

Campanhã & Boscov (1998) afirma que os ensaios geotécnicos destinam-se a definir o comportamento dos diversos materiais do maciço quando submetidos às cargas oriundas do processo de escavação do túnel. No entanto, na execução das escavações podem surgir situações que não foram detectadas, que exigirão um tratamento adequado, ou até mesmo a reformulação de critérios de classificação e de projeto.

Segundo Lima (2016) no método NATM é fundamental que se conheça cada trecho do túnel, já que é a partir das características do terreno que serão definidas as metodologias executivas, o dimensionamento do revestimento, os equipamentos, a mão de obra, os materiais e diversos outros fatores inerentes à execução do túnel. Dessa forma, a boa qualidade das investigações geológicas e geotécnicas reduzirá custos e prazos da obra, e a não execução de qualidade causará danos irreversíveis.

Em termos gerais, sucesso dos empreendimentos que envolvem escavações subterrâneas depende do conhecimento adequado das características do maciço a ser escavado, da escolha correta do método construtivo e da experiência do construtor (MASCARENHAS, 2014).

2.4.4 Classificação dos Maciços

No globo terrestre ocorre uma grande diversidade de minerais que, agregados, formam os diversos tipos de rocha, com idades que podem chegar a bilhões de anos (GERALDI, 2011). Essas rochas são classificadas e agrupadas segundo a sua gênese, sua litologia (presença de minerais em sua composição) e por características estruturais, o que originou uma subdivisão de rochas em três grandes grupos: rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

Conforme Geraldi (2011) em obras com futura escavação de grandes volumes de rocha, após a definição de um modelo geoestrutural, pode-se antever qual o comportamento mecânico dos maciços a escavar e pós-escavados, e então promover os ajustes do projeto, não

só nas locações e geometria das futuras estruturas, como também nas metodologias para as escavações.

Geraldi (2011) pontua, ainda, que as principais estruturas tectônicas que devem ser consideradas dentro de um modelo geoestrutural são aquelas provenientes de deformações nos maciços, em estado plástico ou em estado rígido:

- Maciços em estado plástico (dúctil)
 - Dobras
 - Zonas de cisalhamento
 - Foliações
 - Lineações
- Maciços em estado rígido (rúptil)
 - Juntas/Fraturas
 - Falhas

Geraldi (2011) aborda cinco classes adotadas para determinação da classificação do maciço rochoso a ser escavado (Tabela 2). As classes são definidas a partir dos parâmetros dentro do modelo geoestrutural descritos anteriormente em conjunto das informações pré-existentes.

Tabela 2 – Classificação das rochas

CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS	
Classe I	Maciços de rocha são, sem alterações, coesos e autoportantes, com ausência de planos de fraturas, que, no entanto poderão ocorrer de forma isolada.
Classe II	Maciços de rocha são, sem alterações, coesos e autoportantes, porém já apresentando pelo menos um plano de fratura.
Classe III	Maciços de rocha são, fraturada, ainda com certo grau de autossuporte e coesão, porém entrecortados por planos de fraturas orientados segundo diferentes direções e mergulhos, associadas a maiores concentrações de água subterrânea.

Classe IV	Maciços de rocha mais fraturada e apresentando faixas intercaladas de rocha alterada, com coesão reduzida, autos suporte e estabilidade temporária, quadro que pode se agravar pela presença de água subterrânea.
------------------	---

Classe V	Maciços formados por solo de alteração ou rocha totalmente alterada, com pouca ou nenhuma coesão, ausência de autos suporte e estabilidade quando escavados. Na presença de água estes maciços podem ser classificados como Classe VI.
-----------------	--

Fonte: Geraldi (2011)

Segundo Reis et al. (2006) o acompanhamento do avanço das escavações assumem importância fundamental, pois permitirão verificar a validade dos parâmetros do maciço utilizados nas definições de projeto e/ou a inadequabilidade dos critérios, sendo necessária a reformulação e revisão do projeto buscando-se também a minimização do custo do sistema escavação/suporte, reduzindo prazos e aumentando a segurança ao longo da obra.

O maciço pode ser classificado a partir de métodos específicos e sistematicamente bem definido. Conforme Murakami (2001) o sistema RMR (*Rock Mass Rating*) é uma metodologia simples e baseada em medidas/avaliações rápidas e de baixo custo. Proposto em 1989 por Bieniawski na África do Sul, a classificação avalia seis parâmetros, e são eles:

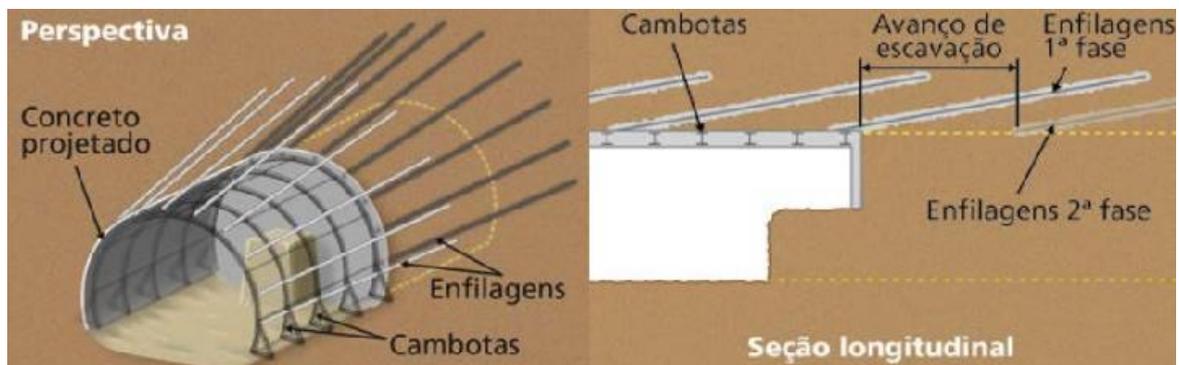
1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. Qualidade da rocha (RQD - *Rock Quality Designation*);
3. Espaçamento entre as descontinuidades;
4. Condições das superfícies de descontinuidade;
5. Condições de água subterrânea;
6. Orientação das descontinuidades em relação à estrutura.

De acordo com a tabela de classificação do Bieniawski, são dadas notas aos seis parâmetros para o maciço. Posteriormente, a soma das notas ocasiona um resultado entre 0 e 100 atribuído ao maciço rochoso, cujo resultado será alocado em uma das cinco classes de maciço previstas pelo NATM.

2.4.5 Tratamentos Preliminares à Escavação

Há situações em que o maciço não fornece um tempo de autossustentação suficiente para permitir a execução das escavações e de elementos de suporte. Assim, faz-se necessário um tratamento antes da continuidade da escavação no maciço. Geralmente, um dos mais frequentes tipos de tratamentos preliminares em obras de túneis são as enfilagens, esquema na Figura 12. Segundo Lima (2016) as enfilagens são instaladas na parte superior da frente do túnel, servindo como uma “laje” que irá suportar parte da carga acima do túnel, e aumentando então o tempo de sustentação do maciço.

Figura 12 – Aplicação de enfilagens



Fonte: Solotrat (2018)

De acordo com Campanhã & Boscov (1998) o tipo mais usual de enfilagem é um tubo de aço de 100 mm cravado sub-horizontalmente no maciço, paralelamente ao eixo do túnel. O comprimento é de 10 a 12 m, sendo 8 a 9 m efetivos e o restante para o transpasse. O espaçamento entre tubos é de 20 a 60 cm, dependendo do tipo de maciço a estabilizar. Com sua funcionalidade ligada estreitamente a estabilização do topo da calota antes da escavação, sendo executadas a partir da face de escavação.

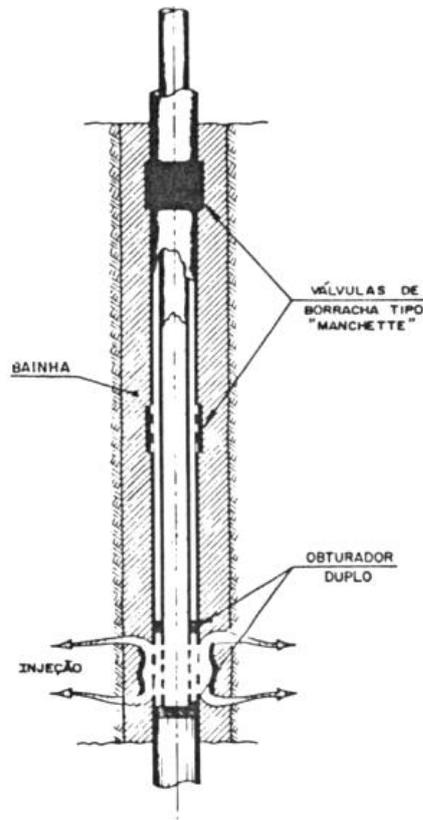
2.4.5.1 Enfilagem Injetada

As enfilagens podem ser constituídas por perfis e tubos de aço, introduzidos no solo através de uma perfuratriz e submetidos à injeção de calda de cimento. As enfilagens injetadas podem ser classificadas em tubulares ou de bulbo contínuo.

Segundo Vieira (2003) a enfilagem tubular consta de um tubo de aço introduzido na perfuração, através do qual é feita a injeção de cimento por meio de válvulas manchete ou

pela extremidade do tubo (Figura 13). Em contrapartida, ainda segundo Vieira (2003), na enfilagem de bulbo contínuo, a calda de cimento é injetada na perfuração, de dentro para fora, introduzindo-se a barra ou tubo de aço depois de completada a injeção.

Figura 13 – Tubo de aço e válvula manchete



Fonte: Guimarães Filho (2015)

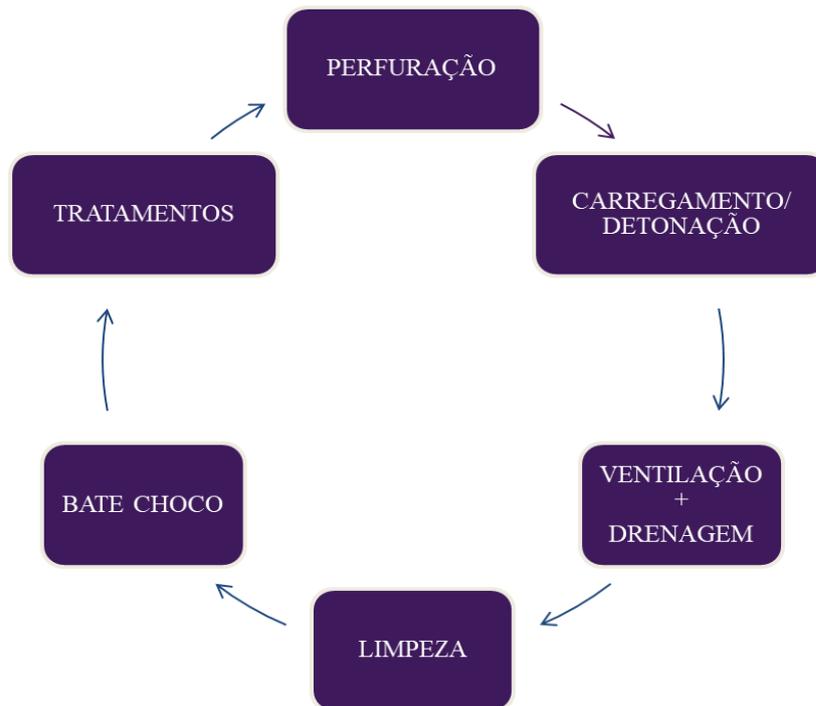
Lima (2016) ressalta que após a realização da injeção, as enfilagens formam então um arco resistente de proteção acima da seção de escavação do túnel, tornando mais seguro o seu avanço.

2.4.6 Metodologia *Drill And Blast*

A tecnologia construtiva do NATM permite sua aplicação na escavação de túnel em solo ou em rocha. Nas escavações de túneis em rocha predomina-se a técnica baseada no uso de explosivos, decorrendo daí denominações como Escavação a Fogo ou *Drill and Blast* (Furar e Explodir).

A metodologia sequencial de escavação compõe-se, segundo Silva (2007), por ciclos de perfuração da rocha, carregamento de explosivos dentro dos furos executados, detonação dos explosivos e tratamentos eventuais ou sistemáticos do maciço, incluindo nesta etapa a execução de suporte, tipicamente em concreto projetado, associado a sistemas de ancoragem ou cambotas metálicas. Na Figura 14 a seguir pode-se visualizar o esquema da metodologia.

Figura 14 – Esquema da metodologia Drill and Blast

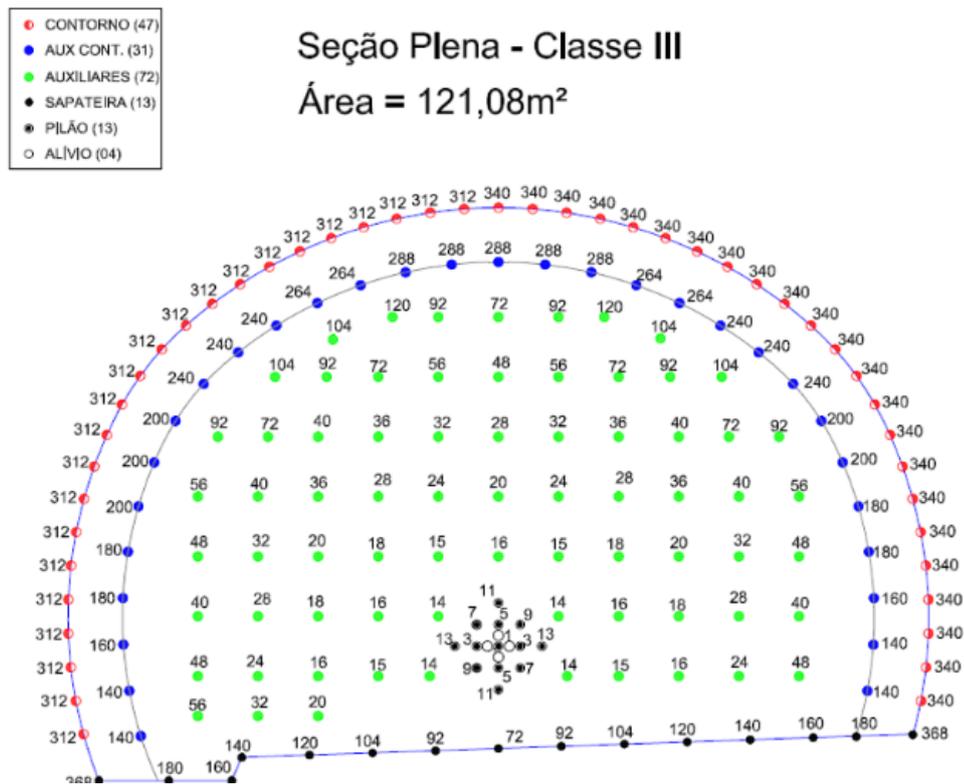


Fonte: O autor (2019)

2.4.6.1 Plano de Fogo

Antes do início da fase de perfuração em rocha, é fundamental que haja um bom planejamento para evitar qualquer problema de execução. O plano de fogo deve trazer as informações referentes à perfuração da rocha e à localização dos explosivos de forma correta, localizados e diferenciados na seção de escavação. Neste contexto, a técnica se baseia numa análise de fatores como pré-fissuramento, pós-fissuramento, fogo cuidadoso e perfuração linear. Na Figura 15 a seguir observa-se um projeto de plano de fogo.

Figura 15 – Plano de fogo



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

Segundo Lima (2016) os furos do pilão são aqueles localizados no centro da seção e cuja função é promover a abertura inicial da frente a ser detonada. Além dos furos de pilão existem os furos de contorno (localizados na borda da seção), os furos de sapateira (localizados na base da seção) e os furos de alívio localizados no pilão e cuja função é auxiliar no corte do maciço.

A detonação de todos os furos (minas) da frente de escavação não ocorre simultaneamente. Na ligação de cada mina é conectado um dispositivo que retarda em milissegundos o seu acionamento. Este mecanismo viabiliza um dos princípios fundamentais do plano de fogo, o planejamento da ordem de detonação das minas (MASCARENHAS, 2014).

Em sua constituição, o plano de fogo traz informações sobre os tipos e quantidades de explosivos, a profundidade e diâmetro dos furos, além da quantidade de furos e outras informações como a área da seção e o volume a ser escavado. Segundo Geraldi (2011), um plano de fogo corretamente planejado e executado garantirá um avanço por detonação da ordem de 90% a 95% da profundidade dos furos.

2.4.6.2 Perfuração da Rocha

Para a execução dos furos na metodologia *Drill and Blast* utilizam-se perfuratrizes. Segundo Mascarenhas (2014) a frente a escavar é perfurada com furos horizontais, normalmente paralelos e de comprimentos iguais. A distribuição destes furos é definida num plano de fogo projetado em função das condições geológicas do rochoso, do avanço que se pretende obter por detonação, da área e do formato geométrico da seção de escavação. Para a perfuração são utilizadas perfuratrizes rotopercussivas hidráulicas, conhecidas como jumbos (Figura 16).

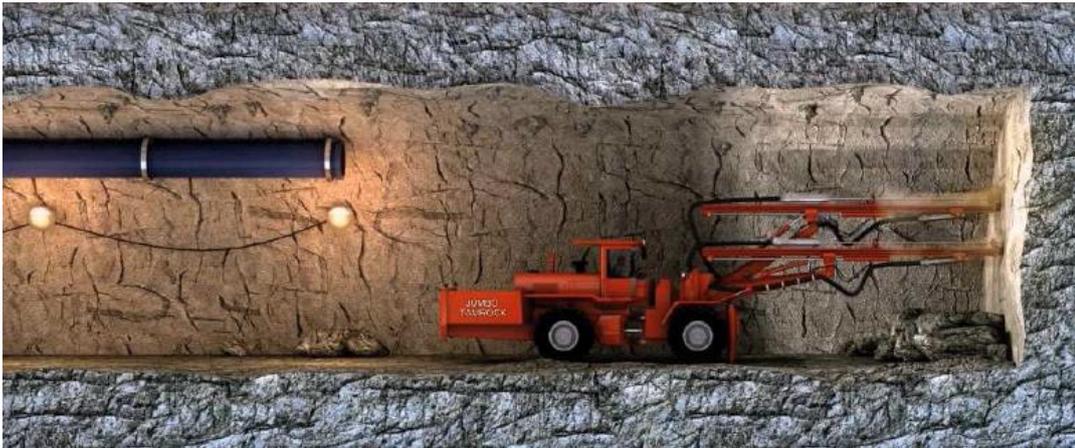
Segundo Franco (2014) por muito tempo foram utilizadas perfuratrizes pneumáticas para a perfuração de rochas, porém, devido a grande perda de ar comprimido comum neste tipo de operação vem sendo substituídas por outras alternativas. Assim, os jumbos surgiram como alternativa mais potente e conseguem uma maior velocidade na perfuração da rocha. O processo de perfuração pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 16 – Jumbo em operação com plano de fogo em tela



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

Figura 17 – Perfuração em rocha com o jumbo



Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br> (2019)

No momento da escolha do diâmetro de perfuração tem de se ter em atenção que os custos de perfuração são significativos. Contudo, existem outros objetivos que levam a limitar o diâmetro de perfuração tais como evitar a sobrefraturação do maciço remanescente, limitar os níveis de vibrações induzidas ao maciço, limitar as projeções de fragmentos rochosos ou obter a granulometria pretendida na pilha de escombros compatíveis com o equipamento de remoção (MARTINHO, 2012).

Como evolução do processo de perfuração, atualmente, pode ser executada na construção de túneis a perfuração inclinada com utilização de equipamento rotopercussivo. Martinho (2012) traz algumas vantagens da perfuração inclinada, como:

- Melhor fragmentação;
- Melhor formação da pilha de escombros, aumentando o rendimento do equipamento de remoção;
- Menos falhas nas pegas de fogo;
- Taludes do maciço remanescentes mais estáveis e com melhor saneamento, aumentando desta forma a segurança para os trabalhadores;
- Menor consumo de explosivo, pois a onda de choque reflete-se com maior eficiência;
- Maior rendimento da perfuração por m³ de rocha desmontada.

2.4.6.3 Carregamento dos Explosivos

Após a execução dos furos, acontece o carregamento com explosivos e conexão dos furos para que seja efetuado o acionamento da detonação. Os furos carregados são detonados em sequência que se inicia do pilão (centro) para o contorno da seção, fragmentando o maciço. A fase de carregamento pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Carregamento da frente de escavação



Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br> (2019)

Conforme Martinho (2012) se o maciço é composto por rocha dura, os explosivos adequados são os explosivos com maior potência e velocidade de detonação, que produzem uma pressão elevada dentro do furo. No caso de maciços muito fraturados, a melhor solução são os explosivos com baixa densidade e baixa velocidade de detonação, que aumentam a eficiência do desmonte destes maciços.

De acordo com Lima (2016) para viabilizar a detonação são necessários vários acessórios com diferentes funções, todos eles projetados e desenvolvidos para que os envolvidos na atividade tenham o máximo de segurança possível. Alguns dos acessórios fabricados no Brasil são os estopins de queima, o cordão ignitor, as espoletas elétricas, o cordel detonante, os retardos e os iniciadores eletrônicos.

2.4.6.4 Sistema de Ventilação

Após a detonação da frente de escavação é necessário ventilar o túnel por insuflação de ar limpo para a exaustão dos gases provenientes dos explosivos. (MASCARENHAS, 2014). O sistema de ventilação é geralmente formado por ventiladores e dutos de ventilação que levam o ar limpo até a frente de serviço, forçando o ar poluído a sair.

A ventilação, como ilustra a Figura 19, utilizada na construção de túneis é fundamental no fornecimento de ar novo necessário à diluição de poluentes emitidos por máquinas de escavação e partículas em suspensão após detonação, o que oferece aos operários um ambiente de trabalho mais seguro.

Figura 19 – Ventilação após detonação



Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br> (2019)

Ao se efetuar um sistema de ventilação adequado, permite-se que os trabalhadores entrem na frente de serviço para dar continuidade ao ciclo realizando a limpeza da frente, removendo os escombros com a utilização de equipamentos de transporte, como visualizado na Figura 20. Segundo Geraldi (2011), nessa fase, deve-se observar cuidadosamente o teto, as paredes e a própria frente que foi detonada para programar a operação de bate-choco, que é a complementação da limpeza, com a remoção cuidadosa de lascas e de blocos de rocha soltos (chocos).

Figura 20 – Limpeza da frente de escavação



Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br> (2019)

2.4.6.5 Drenagem do Maciço

Quando houver a ocorrência de água, a colocação de drenos entre a estrutura e o solo permite o alívio destas pressões sobre a superfície de suporte do túnel, melhorando as condições de segurança da obra e facilitando a escavação (Solotrat, 2018).

Para Justo et al. (2007) a principal função dos elementos de drenagem é assegurar a evacuação de água com a menor perda de carga possível. Os elementos de drenagem são utilizados para responder a duas situações distintas: a intersecção temporária de água e a intersecção permanente da água de percolação do maciço envolvente.

No Brasil, por razões econômicas e técnicas, foi desenvolvido um sistema de drenagem de maciços chamado de *Drainpack*, um tipo de geossintético. Segundo Guimarães Filho (2015) a solução se baseia também na intervenção, durante a escavação do túnel, antes da aplicação da segunda camada de concreto projetado. Dessa forma, o sistema baseia-se nos princípios da captação e condução de maneira ordenada das águas de infiltrações provenientes do lençol freático e revestimento com argamassa projetada impermeável, de alta resistência e aderência. A aplicação do *Drainpack* em obra de escavação de túnel pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Utilização de drainpack nas obras do Rodoanel em São Paulo



Fonte: Guimarães Filho (2015)

2.4.7 Elementos de Suporte e Revestimento do Túnel

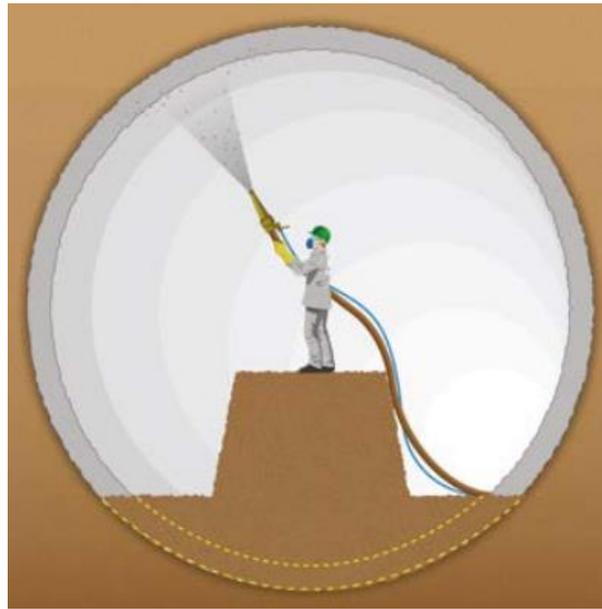
O concreto projetado é um dos principais elementos responsável por suportar as cargas do maciço em obras de construção de túneis pelo método NATM. Entretanto, segundo Lima (2016), até que o concreto atinja resistência suficiente para suportar tais esforços, são necessários alguns elementos de suporte para atuar nos momentos iniciais logo após a projeção do concreto.

2.4.7.1 Concreto Projetado

Atualmente, devido aos avanços tecnológicos em materiais, o concreto projetado tornou-se o material preferido para os projetos de construção subterrânea. Devido a sua característica de aplicação por projeção, permite um selamento superficial e suporte do túnel, pela adaptação ao contorno da escavação, endurecendo e ganhando resistência em um curto período de tempo.

O concreto projetado caracteriza-se por ser um concreto que é transportado por um mangote, desde o equipamento de projeção até um bico, que através de ar comprimido é projetado a grande velocidade contra uma superfície (Figura 22).

Figura 22 – Projeção do concreto pelo método NATM



Fonte: Solotrat (2018)

Gomes (2006) argumenta a utilização de concreto projetado por ser um material que, com adição de aceleradores de pega, é suficientemente plástico no momento de aplicação, preenche irregularidades da escavação e, em pouco tempo, adquire elevadas rigidez e resistência.

Existem basicamente dois tipos de equipamentos de processo de projeção do concreto: *Dry mix* (mistura seca) e *Wet mix* (mistura úmida). O processo de mistura seca caracteriza-se pela mistura de agregado e cimento a partir de ar pressurizado e o mesmo é expulso pelo mangote aonde se mistura com água na parte final do trajeto. Já a mistura úmida é feita em uma única etapa, logo após essa etapa é pressurizada e posteriormente projetado o concreto (FIGUEIREDO & HELENE, 1993).

Lima (2016) relata que a projeção por via úmida permite um melhor controle do fator água/cimento, o que resulta em uma maior uniformidade tanto do produto como no acabamento da superfície tratada. Outras vantagens são o menor ricochete de agregados, o menor consumo de ar e a melhor conservação dos equipamentos de projeção e seus acessórios. Na Figura 23 pode ser observado um robô de projeção via úmida.

Figura 23 – Exemplo de robô de projeção de concreto



Fonte: <http://www.grandesconstrucoes.com.br> (2019)

No processo de revestimento do túnel são aplicadas duas camadas de revestimento com concreto projetado. O revestimento primário atua como sistema de suporte do túnel que deve garantir a estabilização em curto prazo, bem como a segurança dos trabalhadores. Já o revestimento secundário atua como sistema definitivo do túnel que deve garantir uma adequada segurança estrutural, absorvendo as cargas de serviços segundo o projeto.

De acordo com Vieira (2003) o revestimento com concreto projetado permite a economia de custos e de prazos, devido a sua autossustentação, reduz o custo, pois não é necessária a utilização de formas, de escoramento e desforma, e permite aumento na velocidade de concretagem, reduzindo o prazo de conclusão dos serviços. Já a reflexão de agregados e os deslocamentos de concreto, que podem chegar a 50% do volume projetado, são os principais inconvenientes do uso desta técnica.

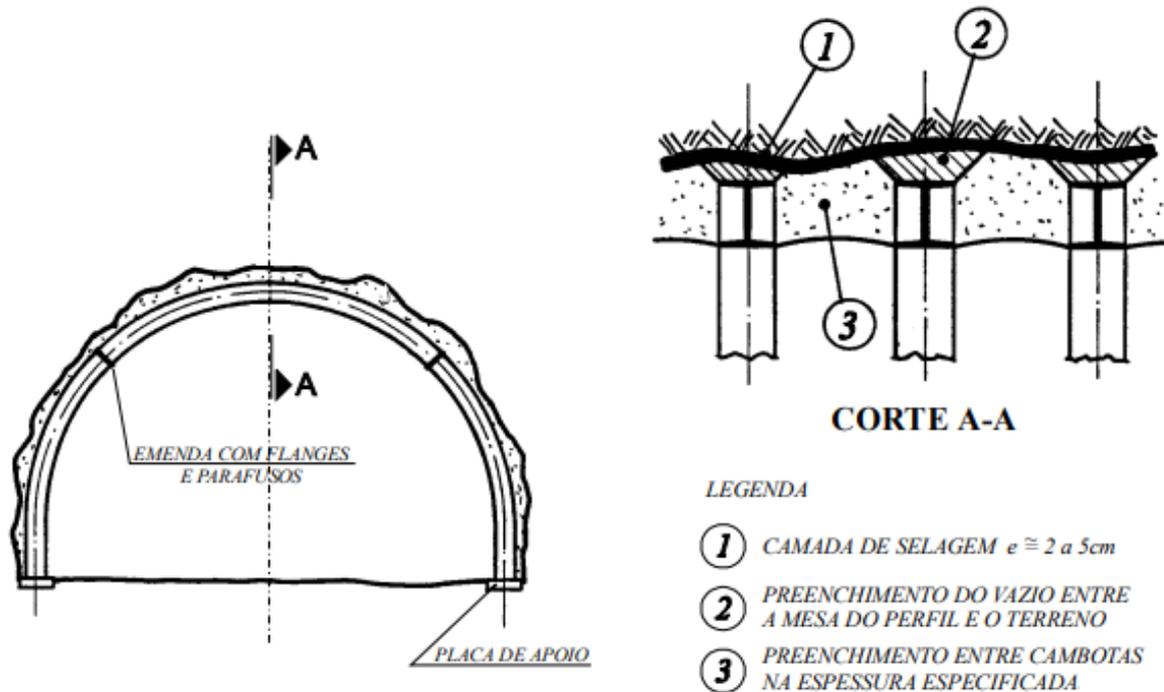
2.4.7.2 Cambotas Metálicas

A sistematização do uso de cambotas ocorre quando há suspeita de instabilidades na frente de escavação devido à baixa resistência do maciço, em qualquer trecho do túnel, ou ocorrência de recalques na superfície superiores aos esperados.

Segundo Reis et al. (2006) as cambotas são arcos de perfis laminados ou treliças de vergalhões de aço (Figura 24). As cambotas são fabricadas em segmentos e montadas no local

de aplicação por meio de parafusos, e têm por finalidade suportar as cargas do terreno nas primeiras horas após a escavação.

Figura 24 – Cambota metálica treliçada



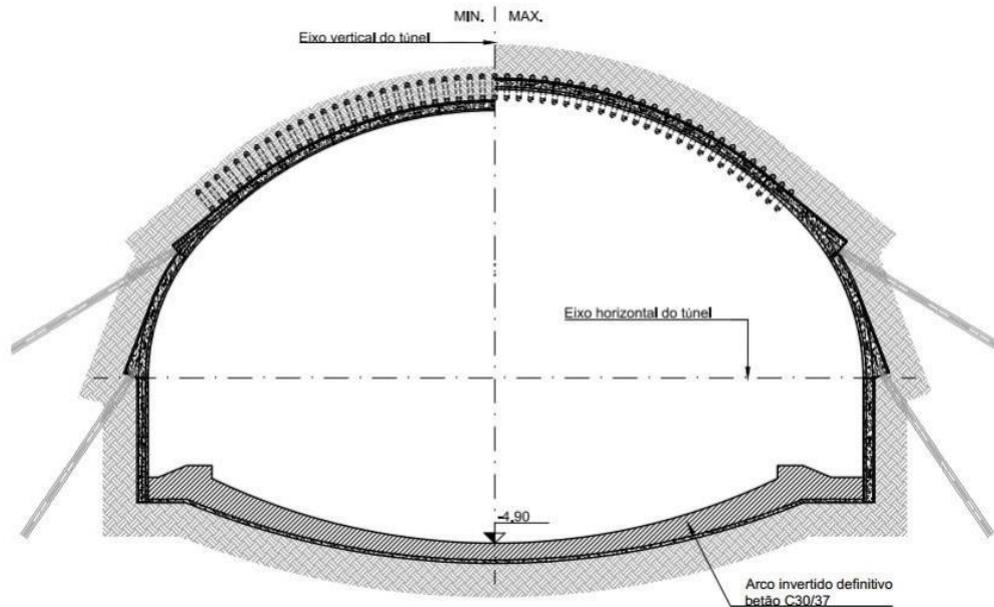
Fonte: Campanhã & Boscov (1998)

Campanhã & Boscov (1998) ressalta que antes de posicionar a cambota é preciso cobrir a superfície escavada com uma camada de concreto projetado de 2 a 5 cm de espessura para estabilizar localmente o terreno, impedindo a queda de material, por menor que seja, e servir como recobrimento do aço da cambota.

2.4.7.3 Arco Invertido Definitivo (AID)

Há casos nas escavações de túneis em que o solo não está consolidado ou a movimentação do maciço causa existência de esforços laterais, fazendo-se necessário a utilização de arcos invertidos. O arco pode ser de concreto projetado ou armado, definitivo ou provisório, a depender das condições do maciço na frente de escavação (Figura 25).

Figura 25 – Arco Invertido Definitivo



Fonte: <https://fenix.ciencias.ulisboa.pt> (2019)

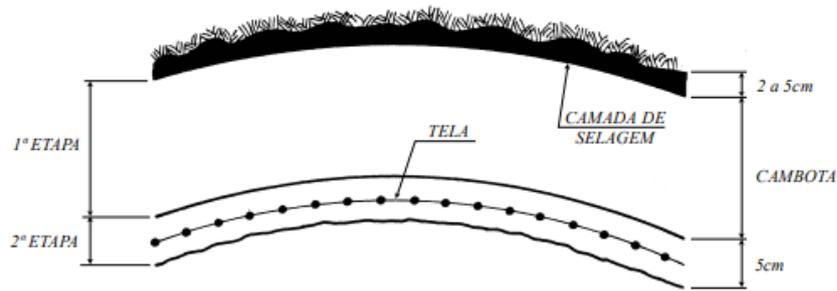
Segundo Lima (2016) a estrutura funciona como um anel contínuo, que deve ser concluído o mais brevemente possível, para isso, após a colocação das cambotas e do revestimento do túnel, deve ser executado o AID para que haja o fechamento do arco da seção.

2.4.7.4 Malha de Aço

Conforme Reis et al. (2006) a malha de aço pode ser usada singelamente ou combinada com cambotas e tirantes, dependendo das condições geológicas do maciço. Na utilização em conjunto com cambotas, a malha é colocada entre as almas dos perfis metálicos das cambotas ou fora das mesas externas, de modo que em primeiro caso, o preenchimento com concreto projetado entre cambotas é feito após a colocação da malha, e em segundo caso o preenchimento é feito antes da colocação da malha.

Lima (2016) afirma que as telas de aço quando aplicadas em túneis executados em solo e que utilizam cambotas metálicas, geralmente são aplicadas apenas no revestimento secundário de concreto, o que pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Tela de aço com cambotas



Fonte: Campanhã & Boscov (1998)

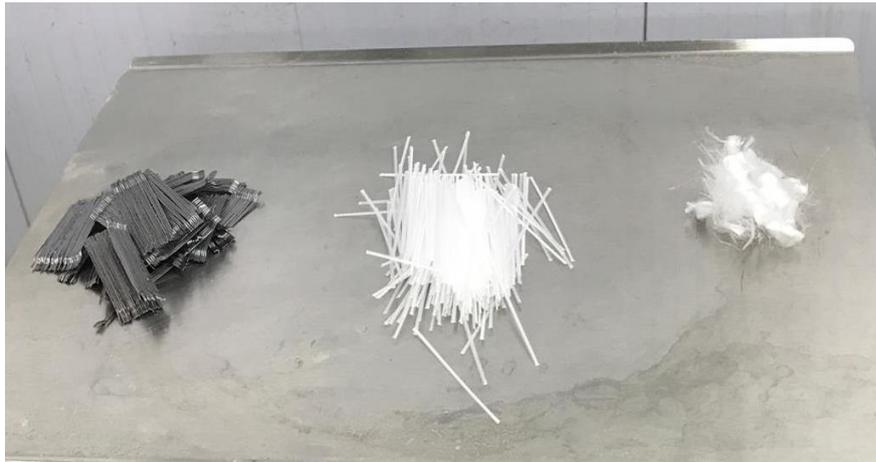
2.4.7.5 Fibras para Concreto Projetado

O concreto projetado reforçado com fibras metálicas tem o intuito de melhorar a plasticidade e elasticidade do concreto, reduzindo fissuração por retração. Segundo Campanhã & Boscov (1998) uma grande vantagem do concreto projetado com fibras de aço, principalmente em rochas, é o de permitir acompanhar as irregularidades da superfície escavada mantendo a espessura especificada em projeto.

As possibilidades de aplicação do material são ampliadas, para algumas aplicações o concreto reforçado com fibras apresenta vantagens tecnológicas e econômicas em relação ao convencional, como é o caso do revestimento de túneis. Com a utilização de fibras o revestimento do túnel não necessita a instalação de telas metálicas, o que acaba por agilizar o processo produtivo e diminuindo os custos com a mão de obra (LIMA, 2016).

Além das fibras de aço existem as fibras de polímeros sintéticos como as fibras de polipropileno. Devido ao fato dos túneis serem estruturas confinadas, na ocorrência de incêndios, o concreto da estrutura atinge temperaturas muito elevadas que causam rápida deterioração. Assim, com a inclusão de fibras de polipropileno no concreto projetado reduz o efeito de *Spalling* (desplacamento de camadas de concreto por poropressão) por aliviar as pressões geradas pelos vapores d'água presentes no concreto em casos de incêndio. A Figura 27 exemplifica os tipos de fibras utilizadas no concreto projetado.

Figura 27 – Fibras metálicas e de polipropileno



Fonte: O autor (2019)

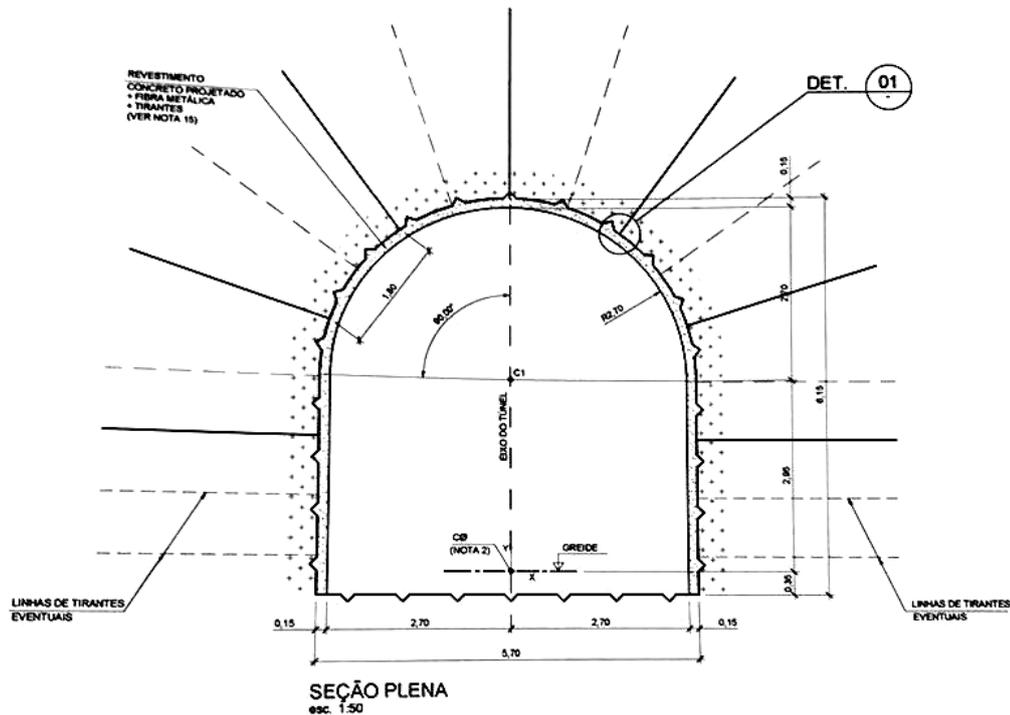
2.4.7.6 Tirantes

Na escavação de túneis em rocha, pelo NATM, os tirantes são usados para a estabilização da camada do maciço circundante ao túnel escavado, desempenhando papel similar ao das cambotas metálicas. Os tirantes são em geral conjugados com concreto projetado e tela metálica (MASCARENHAS, 2014).

Os tirantes são capazes de transmitir esforços de tração entre suas extremidades, caracterizados como elementos lineares. Os tirantes possuem uma extremidade que fica fora do terreno e um trecho ancorado. Segundo Lima (2016) os tirantes podem ser classificados como tensionados ou não tensionados e, sua aplicação em obras de túneis tem por objetivo aplicar esforços de compressão no maciço, reduzindo assim os processos de movimentação, deformação e ruptura.

Campanhã & Boscov (1998) afirma que o tipo de tirante e os espaçamentos entre eles são determinados em função das características geológicas do maciço e do memorial de cálculo. Ainda, recomenda-se a aplicação de uma camada de concreto projetado de 2 a 5 cm de espessura logo após a escavação e remoção dos chocos, antes de iniciar a perfuração para instalação dos tirantes. Na Figura 28 podem-se observar as linhas de tirantes em seção plena.

Figura 28 – Linhas de tirantes em seção plena



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

2.4.8 Sismografia

De acordo com Leão (2016), os efeitos de uma detonação estão relacionados à quantidade de vibrações produzidas em uma massa rochosa, as quais são medidas mediante as velocidades sísmicas. Desse modo, pode-se encontrar uma relação direta entre a natureza do dano produzido pelas vibrações com a velocidade de pico da partícula (VPP), medida no momento da detonação.

Lima (2016) destaca que devido às vibrações que se propagam pelo maciço, é de fundamental importância o seu acompanhamento, principalmente em áreas urbanas onde edificações podem ser afetadas. Esse controle e monitoramento das vibrações serão feitos através da instrumentação sísmica com auxílio de equipamentos denominados sismógrafos.

Os sismógrafos geram relatórios que funcionarão como parâmetro à avaliação dos efeitos da detonação no maciço. Segundo Leão (2016) ao efetuar a medição do nível das vibrações é necessário definir que magnitude deve ser quantificada, entre as quais temos o deslocamento, velocidade, aceleração e frequência.

Os riscos de ocorrência de danos induzidos por vibrações do terreno devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência da velocidade de vibração de partícula de pico. Como cada tipo de estrutura apresenta uma frequência natural de vibração, pode-se estabelecer um limite de velocidade de vibração de partícula de pico (mm/s) aceitável em áreas residenciais para que não ocorram danos às mesmas (MASCARENHAS, 2014).

2.4.9 Instrumentação

Segundo Lima (2016) a instrumentação é instalada para medir, conhecer e monitorar os movimentos do solo, tanto os superficiais como os no interior do maciço. Como também medem pressões e esforços sobre elementos estruturais, tanto antes como durante a execução da escavação, permitindo então que sejam verificados os parâmetros de projeto e a eficácia do método.

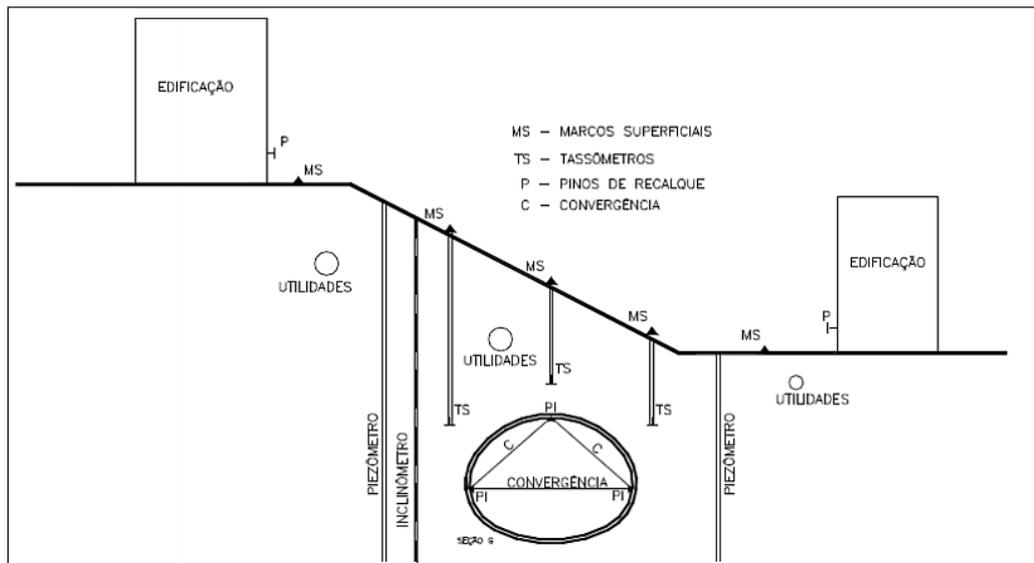
No método NATM, a instrumentação realizada de forma adequada fornece dados que têm papel de grande relevância, pois permitem medir o desenvolvimento das deformações, o alívio das tensões e a interação entre suporte e o maciço circundante. Além disso, segundo Solotrat (2018) a instrumentação permite:

- Alertar para situações imprevistas, possibilitando tomar decisões rápidas;
- Fornecer subsídios para aferir as hipóteses iniciais do projeto, permitindo adaptações e correções do método construtivo, ajustando o espaçamento entre as cambotas e os tratamentos previstos;
- Promover condições para melhorar o desempenho da obra quanto à produtividade, segurança, economia e qualidade, através da interpretação das leituras dos instrumentos associadas aos eventos observados na obra.

De acordo com Murakami (2001) através das medições, a obra pode monitorar a necessidade de melhorias no desempenho dos danos nas edificações e utilidades provocados por distorções e recalques.

Há diferentes tipos de instrumentação, cada um deles com diferentes funções, na Figura 29 podem ser observados os principais instrumentos utilizados em obras de escavação de túnel.

Figura 29 – Esquema geral de instrumentação



Fonte: Murakami (2001)

Conforme Campanhã & Boscov (1998) a instrumentação compreende um conjunto de aparelhos e sistemas para a observação e medição do comportamento do maciço durante a fase de escavação e eventualmente durante a vida do túnel. A instrumentação é instalada externa e internamente ao túnel.

Segundo o projeto, são aplicados os seguintes tipos de instrumentação:

- Marcos superficiais utilizados para controle de recalques por meio de nivelamento topográfico;
- Tassômetro utilizado para controle de recalques logo acima da calota do túnel;
- Pinos para controle de recalques nas edificações vizinhas;
- Nivelamento interno do túnel;
- Seções de convergência para controle de deslocamentos internos no revestimento do túnel;
- Piezômetro para controle da pressão hidráulica no maciço;
- Indicadores de nível d'água para controle do nível freático;
- Inclinômetros pra detectar movimentos laterais e frontais do maciço.

Além da magnitude dos recalques, outro importante elemento a ser controlado através do uso da instrumentação é a velocidade com que eles ocorrem, o que torna fundamental o acompanhamento constante das movimentações do terreno (LIMA, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de pesquisa utilizada foi a de Estudo de Caso. Segundo Yin (2015), o estudo de caso como estratégia de pesquisa compreende um método que abrange tudo, com a lógica de planejamento incorporando abordagens específicas à coleta de dados e à análise de dados. Dessa forma, o desenvolvimento da pesquisa foi obtido através do acompanhamento da obra de escavações, especificamente, as obras de construção de túneis, no trecho ascendente da Nova Rodovia dos Tamoios (SP-099), proporcionando um apurado de informações integrantes desse estudo.

Apesar das limitações, o estudo de caso é o método mais adequado para conhecer em profundidade todas as nuances de um determinado processo. Nesse sentido, mesmo conduzindo-se um caso único, podem-se tentar algumas generalizações, quando o contexto envolve casos decisivos, raros, típicos, reveladores e longitudinais (YIN, 2015).

O trabalho foi estruturado com base em conhecimento consolidado, como livros técnicos e normas, conhecimento em estudo, como artigos, dissertações de mestrado, e conhecimento organizacional da empresa onde ocorreu o estudo, através de consulta a manuais técnicos e aos engenheiros e geólogo da referente obra e especificações técnicas em projeto da Construtora Queiroz Galvão.

Inicialmente, apresenta-se o estudo de caso como forma de esclarecer às peculiaridades da obra de escavação para aliar a prática com a teoria apresentada no referencial teórico deste trabalho. Assim, possibilita-se a apresentação dos principais conceitos interligados ao tema, uma abordagem detalhada com o intuito de contextualizar e detalhar o método construtivo de escavação de túneis em rocha com uso de explosivos. A obra tem o objetivo de melhorar a mobilidade na região de Serra do litoral norte de São Paulo, com impactos positivos ao escoamento de produtos do Porto de São Sebastião.

Em seguida, podem ser evidenciados o processo de mapeamento geológico da região, os tratamentos preliminares a escavação em rocha, os procedimentos integrantes da execução do método *drill and blast*, os elementos de suporte integrados ao método, os equipamentos e controles aplicados em todo o processo da obra.

4 ESTUDO DE CASO

Nesta seção será analisada a metodologia executiva aplicada nos trechos em rocha na execução dos túneis da obra do trecho serra da Nova Rodovia dos Tamoios (SP-099). A obra tem como intuito o desenvolvimento do modelo logístico de integração modal porto-rodovia, uma das deficiências do país na ampliação da participação no comércio exterior.

4.1 Contextualização do Problema

A Rodovia dos Tamoios (SP-099) foi uma obra construída pelo Departamento de Estradas de Rodagem (DER-SP) na década de 1950, interligando a região de São José dos Campos ao litoral Norte, na cidade de Caraguatatuba. Em uma análise estratégica, a via liga um dos principais parques industriais do estado de São Paulo à rota para o Porto de São Sebastião e para o Rio de Janeiro. Após mais de 50 anos de sua construção, devido ao crescimento da região, a rodovia recebeu um grande investimento com o intuito de aumentar sua capacidade de tráfego e sua extensão, facilitando o acesso até o Porto de São Sebastião pela Região do Parque da Serra do Mar, como pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Trechos da Nova Rodovia dos Tamoios



Fonte: Concessionária Tamoios (2019)

De alta complexidade, a obra intercala desafios geológicos, ambientais e de engenharia ao longo de todo traçado da duplicação do Trecho de Serra SJC-CAR (entre o km 60,45 e o km 82), pois cerca de 85% da obra está inserida no Parque Estadual da Serra do Mar, uma das mais importantes unidades de conservação brasileiras, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 – Região de duplicação da Rodovia dos Tamoios



Fonte: Concessionária Tamoios (2019)

As obras estão sendo executadas pela Construtora Queiroz Galvão, na modalidade EPC (do inglês, *Engineering, Procurement and Construction*) com responsabilidade nos projetos, na aquisições e na construção, para a Concessionária Tamoios, que pertence ao grupo da construtora. A duplicação do trecho na serra teve início em 2015, com previsão de conclusão para 2021 e, atualmente, já ultrapassa 50% de avanço físico.

O projeto abrange 21,6 km de novas pistas, com um trecho de 13,135 km em cinco túneis, além de 10 obras de artes especiais – uma ponte e nove viadutos. A totalidade de túneis rodoviários e acessos de serviços caracterizam 71,25% da obra. A Tabela 3 a seguir elenca os túneis do empreendimento e suas extensões.

Tabela 3 – Extensão dos túneis

Túnel	km	13.135
T1	km	2.889
T2	km	721
T3/T4	km	5.555
T5	km	3.970

Fonte: O autor (2019)

As escavações dos túneis da obra estão sendo executados pelo método NATM, devido à logística de montagem e desmontagem de equipamentos que outras técnicas não favoreciam em meio aos diversos trechos de escavação e aos locais de difícil acesso que contemplavam o traçado de duplicação do trecho serra, o qual pode ser observado na Figura 32. Em toda a obra, serão mobilizados 3,2 milhões de m³ de escavações em rocha com destinação para aterros e usina de agregados.

Figura 32 – Visão geral do traçado



Fonte: Concessionária Tamoios (2019)

4.2 Geologia da Região

O perfil geológico dos túneis foi elaborado a partir de campanhas de sondagens, com o objetivo de identificar as camadas de cobertura na região que contemplam o traçado dos túneis, uma estimativa guia para início sequencial das escavações. Para elaboração desses perfis foram realizadas sondagens mistas, com sondagens à percussão SPT (*Standard Penetration Test*) nos trechos em solo, e sondagens rotativas em trechos em rocha.

As expedições geotécnicas realizadas para o levantamento de informações acerca das características dos maciços rochosos que contemplavam o projeto básico inicial, bem como as sondagens com retirada de amostras nos emboques dos túneis receberam uma padronização limite de profundidade. Desse modo, os furos de sondagem foram realizados até a profundidade de 70m para manter a viabilidade econômica das investigações, com realização

de furos a cada 250m na superfície. No levantamento de informações, foram utilizadas imagens de drones e informações já documentadas sobre a região de difícil acesso, esta pode ser observada na Figura 33.

Figura 33 – Região de emboque do T1-CAR na Reserva da Serra do Mar



Fonte: O autor (2019)

As sondagens a percussão foram executadas segundo especificações da NBR-6484 da ABNT e, caso fossem identificadas condições de impenetrabilidade, o furo seguiria pelo método rotativo até a cota programada em projeto.

A partir dos parâmetros de classificação obtidos nas sondagens, foi efetuada a classificação dos maciços rochosos em todos os trechos e a elaboração do perfil longitudinal detalhado para cada túnel da obra apresentado no Anexo I. Por meio dos perfis levantaram-se informações acerca dos elementos de suporte, dos equipamentos e a sequência em que seriam realizadas as escavações e aplicação do método NATM em cada trecho.

A classificação do maciço ainda permitirá a definição de parâmetros construtivos do túnel como a espessura da camada de concreto projetado e a quantidade de tirantes aplicada nas seções. Outro ponto importante deve-se ao fato do perfil geológico ser constantemente atualizado ao decorrer dos avanços das escavações, pois diferentes situações podem ser encontradas. No Anexo II pode ser observada a ficha de classificação RMR da frente de escavação. Ao exemplo prático encontrado na obra, em que o perfil geológico inicial do Túnel 5 aproximou-se do encontrado nas escavações, já o mesmo não ocorreu com o perfil do Túnel 1 que necessitou de atualizações constantes devido à região de baixa cobertura e resistência na transição de classe de rochas.

4.3 Tratamentos Preliminares à Escavação

Ao longo das escavações de túneis, conforme Lima (2016) não é usual a execução de tratamentos preliminares em rocha, mas há trechos com maciço rochoso de baixa resistência, fraturado e em transição para solo que necessitam de tratamento. Nesses trechos da escavação foram executadas enfilagens tubulares injetadas de 12m (Figura 34), com 3 metros executados com tubo PVC e 9 metros com tubos de aço galvanizado. O projeto de enfilagens tubulares utilizadas nos túneis pode ser observado no Anexo III deste trabalho.

Figura 34 – Estoque de tubos de aço destinados a enfilagens



Fonte: O autor (2019)

Os furos foram executados na abóboda do túnel através de uma perfuratriz pneumática (Figura 35), logo em seguida os tubos de aço são introduzidos no furo. A cada metro desses furos estão localizadas as válvulas manchetes que, por fim, recebem a calda de cimento injetada por mangueiras até que a pressão seja suficiente para que as válvulas se rompam.

Ao final do tratamento, as enfilagens formam uma proteção por meio de um arco resistente acima da seção do túnel, tornando-o mais estável ao avanço.

Figura 35 – Execução de enfilagens tubulares injetadas no TI-CAR



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

4.4 Método de Execução em Rocha

Nos itens a seguir serão abordadas as etapas da metodologia de execução em rocha, formada por um ciclo bem definido com etapas que precisam ser executadas ordenadamente.

4.4.1 Plano de Fogo

Inicialmente, na metodologia *drill and blast* de desmonte de rochas, há a marcação do plano de fogo na frente de serviço como tinta branca (Figura 36), esta atividade é realizada por colaboradores da obra sob controle/supervisão da equipe de topografia, que guiam a marcação com uso da estação total, para que posteriormente sejam executados os furos pelo jumbo.

O plano de fogo tem especificações e distribuições de furos de acordo com o tipo da seção adotado para cada trecho, sendo usual em obras de grande porte como os túneis da nova rodovia dos Tamoios a existência de plano de fogo parcializado, por diferentes classes de maciços encontradas nas escavações. O plano de fogo utilizado na obra possuía furos de contorno, auxiliares, de sapateira, de pilão e de alívio. No Anexo IV pode ser visualizado um dos projetos de plano de fogo da obra, e suas respectivas informações de carga, tempo de detonação e outras informações acerca da escavação.

Figura 36 – Frente de serviço marcada com o plano de fogo



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

4.4.2 Perfuração da Rocha

Com a finalização da marcação do plano de fogo na frente de escavação, inicia-se o processo de perfuração em rocha pelo jumbo (Figura 37). Na perfuração dos túneis da rodovia dos Tamoios estão sendo utilizados cinco jumbos de grande porte com três braços e cinco jumbos com dois braços, todos da fabricante *Sandvik*. No processo de perfuração com esses equipamentos era realizado um controle de inclinação e profundidade dos furos nos painéis do jumbo e *software*, para garantir que a perfuração do maciço estivesse segundo o projeto de plano de fogo.

O tempo de trabalho de perfuração do jumbo depende de características da seção e da quantidade de braços mecânicos no jumbo, uma atividade que dura em torno de 1 a 2 horas. Por normativas vigentes do corpo de bombeiros para prevenção de casos de incêndios, há um túnel de serviço paralelo nos túneis de maiores extensões (T3/T4 e T5) e uma interligação entre ambos a cada 250 m. Os túneis principais têm seções iguais de 13m de diâmetro e os auxiliares têm 5,5 m de diâmetro, podendo utilizar a versatilidade dos jumbos existentes nas etapas de perfurações, sob um ciclo de produção de 24 horas, em três turnos na obra.

Figura 37 – *Perfuração em Rocha pelo jumbo em túnel auxiliar*



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

4.4.3 Parcialização da Seção

Durante a escavação, com o intuito de minimizar os efeitos de concentrações de tensões mobilizadas do maciço de baixa estabilidade, utilizou-se a técnica *side drift* em trechos de baixa cobertura (Figura 38), para evitar o colapso do maciço.

Figura 38 – *Parcialização da seção em side drift*



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

Outra característica determinante na escolha da técnica *side drift* na obra foi o diâmetro do túnel, pois quanto maior a seção, maior o impacto da escavação. Assim, as seções são posteriormente estabilizadas com concreto projetado e cambotas metálicas antes da abertura da seção total do túnel. Em relação aos avanços e procedimento de escavação, são determinados a partir da avaliação de tensões e deformações do maciço.

4.4.4 Carregamento/Detonação

Posterior à execução dos furos, pode-se iniciar o carregamento de explosivos na frente de escavação, realizado pelo caminhão de injeção de explosivos (Figura 39), sob a supervisão do *blaster*, profissional responsável por aplicar as informações do projeto do plano de fogo.

Figura 39 – Caminhão para injeção de material explosivo



Fonte: O autor (2019)

O maior princípio do uso de explosivos é sempre oferecer uma face livre para a explosão subsequente. As explosões são realizadas sucessivamente, pois possibilita que o fogo desagregue a rocha e não apenas cause fraturas, não atrapalhando o processo de escavação. A carga de explosão de cada tempo é dimensionada de acordo com a classe de rocha e de acordo com a quantidade de tempos de detonação.

As explosões consecutivas ocorriam em um intervalo de 25 milissegundos, e com o auxílio de uma espoleta, podiam detonar um ou mais pontos ao mesmo tempo. Em cada orifício a emulsão era injetada pelo caminhão até que carregasse toda a frente (Figura 40).

Figura 40 – Carregamento da frente com uso de explosivos



Fonte: O autor (2019)

De um modo geral, o ciclo de acionamento funciona na seguinte ordem de efetivação da explosão: aciona-se a caneta iniciadora que emite energia ao longo da *leadline* (fio de propagação) do lado de fora do túnel até chegar ao cordel (fio central), atingindo a espoleta, ainda podendo conter um *booster* para potencializar o impacto, ocasionando por fim a explosão. A concentração de carga dá-se no centro (pilão) com tendência de deslocamentos das demais explosões para o centro (Figura 41), as últimas explosões são no contorno do túnel. Nesse processo, os túneis da obra têm avanço médio de 3 m/dia.

Figura 41 – Pilão carregado



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

O túnel era evacuado quando se iniciava o carregamento da frente de serviço, sendo autorizado a permanecer apenas os profissionais responsáveis por realizar o carregamento. Após o carregamento, o túnel era completamente evacuado (Figura 42) e vistoriado pelos técnicos de segurança do trabalho e a detonação acontecia do lado de fora do túnel através da caneta iniciadora. Por motivos de segurança, antes da detonação as sirenes eram acionadas três vezes para alertar os colaboradores e a vizinhança.

Figura 42 – Evacuação do túnel



Fonte: O autor (2019)

4.4.5 Limpeza/Choco

Depois da detonação, aguardava-se em torno de 30 minutos para a retomada dos serviços no túnel, uma vez que as detonações provocavam a emissão de gases tóxicos prejudiciais à saúde dos trabalhadores e que eram expulsos com a utilização de um sistema de ventilação interno de grande potência (Figura 43). Assim, um técnico de segurança entrava no túnel após o tempo de espera necessário e realizava a verificação do nível de gases dentro do túnel.

Após a realização das verificações, o processo de limpeza da frente de serviço podia ser iniciado. A frente de escavação, após detonação, encontrava-se obstruída por grandes blocos de rocha.

Figura 43 – Sistema de ventilação



Fonte: O autor (2019)

O material rochoso era retirado da frente de escavação com auxílio de escavadeiras com rompedor hidráulico que realizavam o choco mecânico e de pá carregadeira (Figura 44). Após a limpeza, dava-se início ao bate choco manual, que consiste na remoção de peças de rocha que ainda podem se desprender do maciço. Assim, eram realizadas as atividades de *underbreak* (retirada de rocha sobressaliente indesejável) com utilização de plataforma elevatória com o colaborador (Figura 45) e, também o preenchimento de *overbreak*, pedaços de rocha retirados além do necessário, com concreto projetado com fibras metálicas de alta resistência inicial. Na Figura 46 nota-se a existência de gabaritos para alcançar a uniformidade da camada projetada.

Figura 44 – Retirada do material rochoso



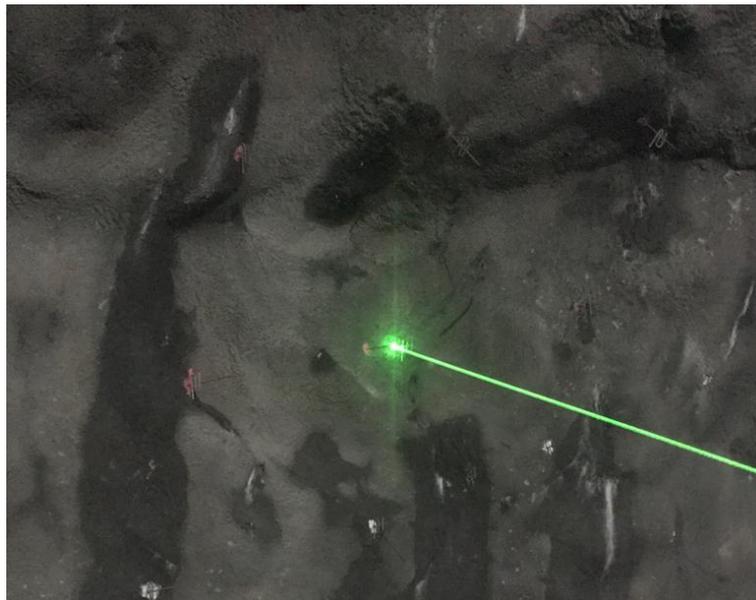
Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

Figura 45 – Atividade de underbreak



Fonte: O autor (2019)

Figura 46 – Gabaritos para projeção de cimento



Fonte: O autor (2019)

4.4.6 Drenagem do Maciço

Em relação à drenagem do maciço, utilizaram-se malhas de *drainpack* para criar um caminho preferencial à água com um posterior bombeamento para fora do túnel, pois não se pode permitir o escoamento de água nos picos do espelho do túnel, ponto que pode provocar o

colapso e desmoronamento da estrutura. Ainda, para fixação das malhas havia cobertura por projeção de argamassa via seca. Na Figura 47 pode ser observada a aplicação do *drainpack*.

Figura 47 – Aplicação de *drainpack*



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

4.4.7 Execução dos Elementos de Suporte

O concreto projetado é um dos principais responsáveis por suportar as cargas do maciço pelo método NATM em uma obra de túnel. Entretanto, segundo Lima (2016), até que o concreto atinja resistência suficiente para suportar tais esforços, são necessários alguns elementos de suporte para atuar nos momentos iniciais logo após a projeção do concreto. Nos itens a seguir serão expostos os principais elementos de suporte aplicados no método NATM.

4.4.7.1 Concreto Projetado

Com a finalização do processo de detonação e limpeza, iniciava-se a execução da camada de revestimento do túnel através da projeção de concreto. A projeção úmida foi adotada para todos os túneis por sua alta produtividade e menores perdas, além da maior eficiência e homogeneidade da camada com o a utilização do robô de projeção (Figura 48).

O revestimento dos túneis está sendo realizado em duas camadas depois da regularização inicial do maciço. A camada primária é constituída por concreto projetado com fibras metálicas que diminuem a possibilidade de fissuração por retração, já a camada

secundária tem em sua constituição fibras metálicas e de polipropileno, o que reduz o efeito de *spalling* em casos de incêndios.

Uma particularidade da obra gira em torno de estudos tecnológicos realizados pela construtora para que a segunda camada de revestimento com concreto projetado com fibras seja aplicada sem o uso de telas entre camadas, os resultados obtidos durante a pesquisa foram positivos para esta solução.

Figura 48 – Robô de projeção de concreto



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

As espessuras das camadas de projeção seguiam definições segundo a classificação do maciço rochoso. Logo, menores espessuras de concreto eram utilizadas em maciços de boa qualidade, pois favoreciam as condições de estabilidade.

No empreendimento, 80% de todo o concreto é destinado para projeção nos túneis, possuindo f_{ck} de 25 MPa e *slump* em torno de 22 cm. No preparo do concreto projetado foram utilizados o cimento CP V ARI-RS como aglomerante, a brita 0 como agregado, aditivos de pega e superplastificantes, sob a razão de água cimento de 0,44. Antes da projeção, no bico de projeção havia a adição de fibras de aço e aceleradores de pega para atingir altas resistências em um período mais rápido após projeção.

4.4.7.2 Cambotas Metálicas

A utilização das cambotas metálicas forma necessárias em trechos com maciços rochosos de baixa resistência (Classe IV e Classe V), como também os que apresentavam

menor cobertura superficial, fazendo necessário o suporte da estrutura para sustentação das cargas do terreno. A armação das cambotas treliçadas (Figura 49) foi necessária na obra em trechos do Túnel 1 e Túnel 2, pelo grau de alteração que o maciço apresentava.

Figura 49 – Aplicação de cambotas em trecho do túnel



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

A instalação das cambotas metálicas era realizada de acordo com a locação da placa de apoio e das emendas segundo orientações da equipe de topografia com o uso de estação total para seguir as especificações do projeto de cambotas, que pode ser observado no Anexo V.

4.4.7.3 Tirantes

Em todos os trechos em rochas dos túneis foram utilizados tirantes. As quantidades e espaçamentos variam dependendo da classificação do maciço rochoso. Em maciços rochosos de classes de boa resistência, a quantidade de tirantes era menor quando comparada a dos maciços de baixa resistência, os quais necessitavam de uma quantidade maior de tirantes para dar estabilidade ao trecho. No Anexo VI deste trabalho pode-se observar em detalhes o projeto de tirante.

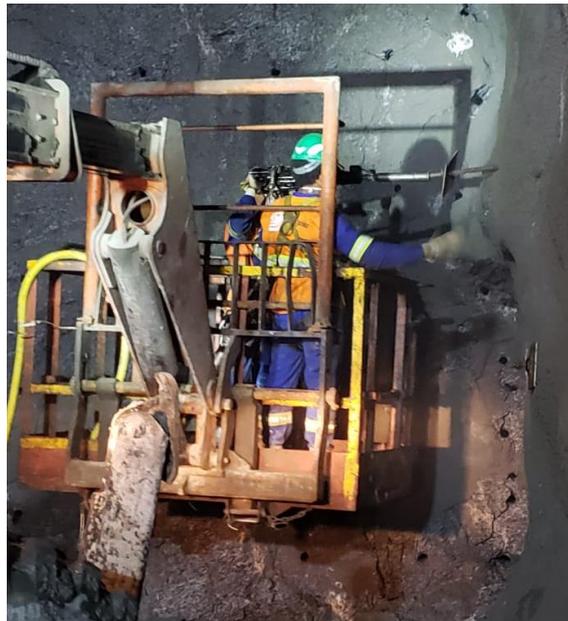
No processo de aplicação dos tirantes, inicialmente a equipe de topografia marcava a malha de tirantes de acordo com o projeto, havia a navegação do Jumbo para verificar o traçado e dava-se início ao processo de furação dos tirantes pelo Jumbo e da frente (Figura 50), havendo aplicação de resina para segurar os tirantes, e por fim torqueavam-se os tirantes para deixá-los tensionados em suas cargas de trabalho (Figura 51).

Figura 50 – Furação dos tirantes pelo jumbo



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

Figura 51 – Instalação de tirantes



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

4.5 Sismografia

A utilização de explosivos no método NATM em zonas urbanas e de preservação pode trazer consequências indesejáveis. As vibrações causadas pelo processo de detonação, que se propagam pelo maciço, podem ser sentidas em vias adjacentes e em terrenos vizinhos à região de escavação de túneis. As detonações nos túneis também podem provocar deslocamento de ar, com possibilidades de danos a estruturas anexas à obra.

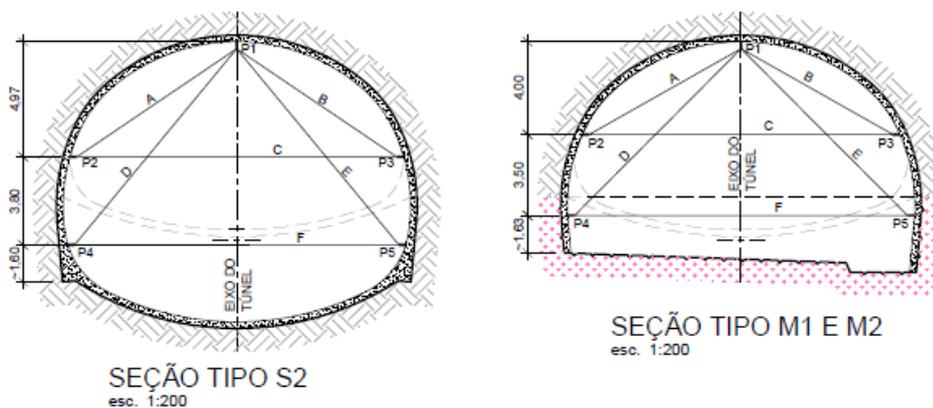
A obra da rodovia dos Tamoios respeitou limites estabelecidos por norma D7.013 de 2015 da CEBESP, que estabelece à velocidade resultante de vibração de partícula (VR) proveniente das operações de desmorte com o uso de explosivo um limite, não podendo ser superior a 4,2 mm/s – pico, no local de avaliação do impacto no licenciamento ambiental, com medição de velocidade de vibração de partícula realizada no lado oposto à face onde ocorre o desmorte da rocha.

Com a utilização de um sismógrafo era possível realizar o controle e monitoramento das vibrações posicionado segundo norma já descrita. Após a detonação foi possível gerar relatórios de informações sobre vibrações e deslocamento de ar, com avaliação posterior dos dados pelos engenheiros e consultores, como apresentado no Anexo VII. Caso os parâmetros de pico de velocidade de vibração, de aceleração, frequência e de deslocamento de ar estivesse fora dos padrões adotados, seria necessária uma análise do plano de fogo para deixá-lo a favor da segurança.

4.6 Instrumentação

Com o intuito de monitorar as movimentações do maciço nas escavações foram instalados equipamentos que geram relatórios de controle de acordo com o projeto de instrumentação. Em relação ao controle das movimentações no interior do túnel, foram adotadas seções de convergência por pinos de recalque instalados na parede do túnel, contendo três pinos por seções. Todos os dias eram feitas leituras topográficas (Figura 53) e elaborados os relatórios de acompanhamento pode ser observado no Anexo VIII deste trabalho. Na figura 52 pode ser observado o posicionamento de pinos de recalque da seção de convergência.

Figura 52 – Seções de convergência do túnel



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

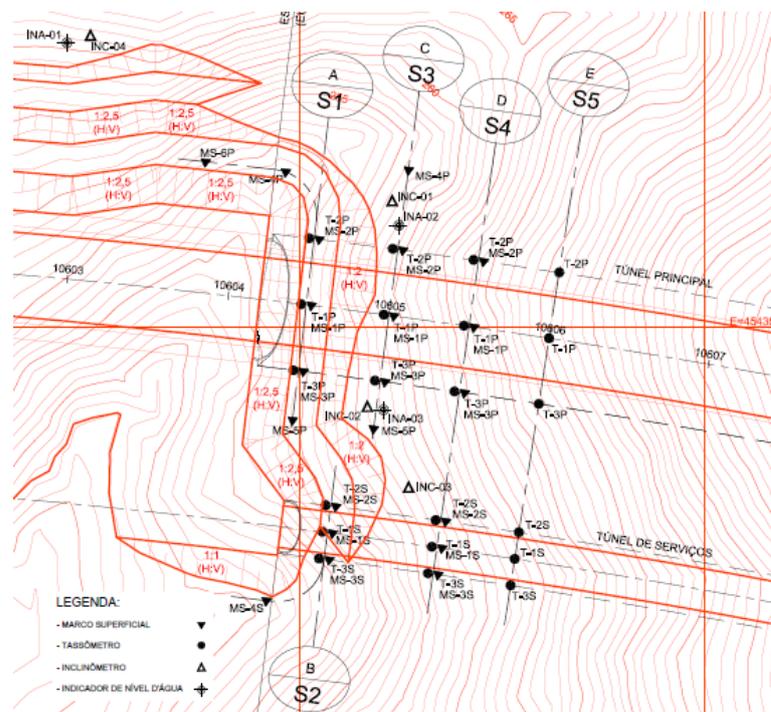
Figura 53 – Realização de leitura dos pinos pela equipe de topografia



Fonte: O autor (2019)

Para medições e controle de recalque na superfície foram instalados marcos superficiais. Já para medição da movimentação profunda do maciço foram instalados tassômetros, ainda foram instalados inclinômetros para monitoramento de movimentações laterais, além de indicadores de nível d'água. Toda a instrumentação na obra teve suas coordenadas cadastradas e atualizadas na planta de locação do túnel, como mostra a Figura 54.

Figura 54 – Projeto de locação dos instrumentos no T5-SJC



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019)

4.7 Análise do Método NATM

O método NATM possui uma maior difusão e desenvolvimento no exterior quando analisado sua implantação no Brasil, especificamente para construção de túneis em maciços rochosos. Assim, em obras de grande magnitude territorial, ambiental e construtiva há a necessidade da realização de adaptações que considerem as condições locais do empreendimento com o intuito de adequar às especificidades da obra, a exemplo da Nova Rodovia dos Tamoios.

Um ponto fundamental na escolha do método é a análise dos equipamentos a serem utilizados. A disposição de uma boa quantidade de jumbos nas escavações dos túneis favorece a logística e os ciclos de operação, uma vez que a tuneladora (TBM) não seria recomendável quando se consideram os custos em equipamentos mecanizados e o tempo de montagem e desmontagem do equipamento em variados trechos e diferentes túneis de um empreendimento, além da região ser de difícil acesso. Logo, em produtividade o método TBM apresenta melhor adequação por atingir velocidade de avanço de 1-70 m/dia, mas quanto a logística o método NATM mostra-se o mais eficaz pelo trabalho simultâneo de diferentes jumbos na obra.

Os trabalhos de escavações de túneis de grande porte necessitam da disposição de equipamentos específicos, além de mão de obra qualificada em serviços subterrâneos. Por ainda estar em difusão no país, no método NATM observa-se que a realização dos trabalhos conta com uma significativa participação humana e mínima mecanização, o que contrasta com o método TBM e seus processos mecanizados, caracterizando um ponto a ser desenvolvido.

O método de execução de túneis em áreas ambientais necessita como vantagens de escolha a preservação máxima do ecossistema e o mínimo impacto na área de influência. Com isso, a adoção do método é consequência direta das condições geológicas oferecidas pelo local e, ainda, das condições de segurança, estabilidade e disponibilidade de recursos (equipamentos, material, mão-de-obra) integrados na solução construtiva.

É característico do método NATM a sua versatilidade e adaptabilidade ao traçado e às condições geológicas, mas é válido pontuar que os avanços no maciço são possíveis em meio a técnicas de tratamentos preliminares e execução de elementos de suporte ao longo da obra, exigindo uma maior compreensão referente aos princípios da mecânica e a compreensão do comportamento estrutural dos maciços. Assim, quando comparado ao método VCA, o NATM mostra-se mais adequado quando considerados alguns condicionantes, como extensão da

obra, forma, dimensões e maciço a ser escavado. A Figura 55 a seguir elenca os pontos de análise do NATM, TBM e VCA.

Figura 55 – Análise de métodos



Fonte: O autor (2019)

Como descrito, o NATM é um método que está começando a ser utilizado no Brasil, e para sua aplicação adequada na obra da Rodovia dos Tamoios (SP-099), face às limitações e às dificuldades geológicas, ambientais e de engenharia encontradas, optou-se pela implantação de um método que combina processos mecanizados e participação do elemento humano no ciclo construtivo, obtendo resultados significativos nos avanços da obra contemplando aspectos fundamentais de custo, logística, segurança, qualidade e funcionalidade.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento das cidades, as adversidades topográficas, a escassez de espaço na superfície e a crescente demanda de novas vias de transportes, vêm causando uma maior procura por passagens subterrâneas no Brasil e no mundo.

Os domínios técnico e teórico sobre o solo e seu comportamento nas interfaces estruturais dos túneis são recentes quando comparados aos mais antigos tipos de construção já realizados pelo homem. Sem a existência de estudos geológicos e geotécnicos aprofundados, era comum a ocorrência de acidentes neste tipo de obra, acarretando em um método arriscado de construção. Com o crescimento tecnológico, foram desenvolvidas metodologias construtivas que permitem a execução de túneis de forma segura e controlada.

Do ponto de vista de segurança, além da grande importância atribuída à execução da escavação do túnel em si, o presente trabalho permite concluir que o método NATM só garante o sucesso do projeto de túnel quando aliado a uma boa investigação geológica e técnicas bem estruturadas.

Em contrapartida, por se tratar de um método em difusão e desenvolvimento constante, este possui pontos positivos e negativos. Como pontos positivos, destaca-se a não necessidade de se utilizar tuneladoras (reduzindo o custo de escavação) e a versatilidade geométrica através da parcialização de seções, o que permite geometrias e traçados inovadores. Entretanto, como pontos negativos, elencam-se o tempo de execução (dependente da classificação do maciço) e a necessidade de tratamento do maciço, que tornam necessários maiores estudos acerca da segurança e estabilidade da obra durante a escavação das seções.

Neste trabalho houve a descrição e análise voltadas apenas ao processo de escavações em rocha, especificamente aos desmontes subterrâneos, possibilitado pelo desenvolvimento do uso de explosivos, equipamentos e acessórios voltados ao aumento da produtividade e redução de impactos negativos ao ambiente, por esta ser a situação do estudo de caso escolhido. Porém, o tema acerca das escavações subterrâneas é bastante abrangente, quando realizadas em solo possibilita outras discussões.

Nota-se, portanto, que o levantamento teórico sobre as escavações em rocha para a execução de túneis e sua aplicação real no estudo de caso elaborado pelo autor, enquanto estagiário de uma grande obra, trouxe ao leitor novos conhecimentos de uma atividade da construção civil de grande importância.

REFERÊNCIAS

CAMPANHÃ, Carlos Augusto; BOSCOV, Pedro. **NATM - Túneis em Terreno Pouco Consistentes**. CBPO Engenharia: Manual Técnico, 1998.

CDURP - Companhia de Desenvolvimento Urbano da Região do Porto do Rio de Janeiro. **Vídeos sobre a metodologia construtiva dos túneis do Porto Maravilha**. Disponível em: <<http://www.portomaravilha.com.br/web/esq/videos.aspx/>>. Acesso em: 15 maio de 2019.

DONATO, Jorge. **Jardín Subterráneo de Forestiere**. El Embrujo de Gaia. Disponível em: <<https://elembrujodegaia.blogspot.com/2014/07/jardin-subterraneo-de-forestiere.html>>. Acesso em: 14 maio 2019.

FIGUEIREDO, Antonio; HELENE, Paulo. **Concreto projetado: o controle do processo de projeção**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC92. São Paulo: Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, 1993.

FRANCO, Fernando Mendes. **Escavações de Túneis em Rocha pelo Método NATM (NEW AUSTRIAN TUNNELLING METHOD) - análise das vibrações do terreno devido à detonação de explosivos**. 2014. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

GERALDI, José Lúcio Pinheiro. **O ABC das Escavações de Rocha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

GOMES, Ricardo Adriano Martoni. **Análise tridimensional de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte**. 2006. 300f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GRANDES CONSTRUÇÕES. **Robôs atestam evolução tecnológica na projeção de concreto**. Revista Grande Construções Online. Disponível em: <<http://www.grandesconstrucoes.com.br/Materias/Exibir/robos-atestam-evolucao-tecnologica-na-projecao-de-concreto>>. Acesso em: 15 maio de 2019.

GUIMARÃES FILHO, João Duarte. **Sistemas de Impermeabilização**. Anais do II Simpósio Internacional de Impermeabilização de Estruturas Subterrâneas, São Paulo, 2015.

JUSTO, João; LOPES, M. G.; BRITO, JORGE. Sistemas de Impermeabilização e Drenagem de Túneis em Escavação: instalação e controle de qualidade. **Revista UMinho**, Universidade do Minho, Braga, n. 29, p 27-43, 2007.

LEÃO, Sandino M. **Criação de um modelo preditivo de vibrações a partir de um estudo em detonações de túneis para a Construção Civil**. 2016. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LIMA, Victor Barreto. **Aplicação do método NATM na execução de túnel em Rocha**. 2016. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MARTINHO, José Fernando. **O uso de explosivos na escavação de túneis: implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folhas de cálculo**. 2012. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2012.

MASCARENHAS, André Magalhães. **Estudo de caso: escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o método NATM - Região Portuária, Centro do Rio de Janeiro**. 2014. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MOREIRA, Carlos Manuel da Cruz. Túneis: uma herança ancestral rumo ao futuro. A Obra Nasce: **Revista de Arquitetura da Universidade Fernando Pessoa**. Porto, Portugal, n. 3, p. 92-115, 2006.

MURAKAMI, Cláudio Atushi. **Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis**. 2001. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

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

REIS, Marcus; PEREZ, Rafael Ribeiro e RUSILO, Luiz Carlos. Alguns Conceitos Técnicos para Escavação de Túneis por NATM - New Austrian Tunneling Method - Empregados na Extensão da Linha 2 Verde do Metrô de São Paulo. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - II Geo Jovem**, Nova Friburgo, 2006.

ROCHA, Hugo Cássio. Panorama do Mercado Brasileiro de Túneis: Passado, Presente e Futuro. **Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC**. Maceió, 2012.

SILVA, Carlos Antônio Reis da. **Perfil geológico-geotécnico do subsolo ao longo do traçado do Metrô de Goiânia**. 2007. 205f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SOARES, Andréia; BENÇÃO, Claus; ESPÍNDOLA, Luiz Eduardo e CANAVER, Raphael. **Escavação de túneis pelo método NATM Estudo de caso Túnel de Ligação Linha 4 – Amarela do metrô de São Paulo**. 2015. 103f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2015.

SOLOTRAT, Engenharia Geotécnica Ltda. **Manual de Serviços Geotécnicos**. 6. ed, 2018.

TAMOIOS. Concessionária Tamoios. **A Rodovia**. Disponível em: <<http://www.concessionariatamoios.com.br/a-rodovia/a-rodovia>>. Acesso em: 18 maio de 2019.

TRAVAGIN, Vinícius Bernardino. **Subsídios para escolha do método construtivo de túneis**. 2012. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

TUNNELTALK. **TBM overcomes challenges in the Andes**. Disponível em: <<https://tunneltalk.com/Chile-Jan2017-Robbins-double-shield-TBM-bores-tunnels-for-Los-Condores-HEPP-in-Chile.php>>. Acesso em: 20 maio de 2019.

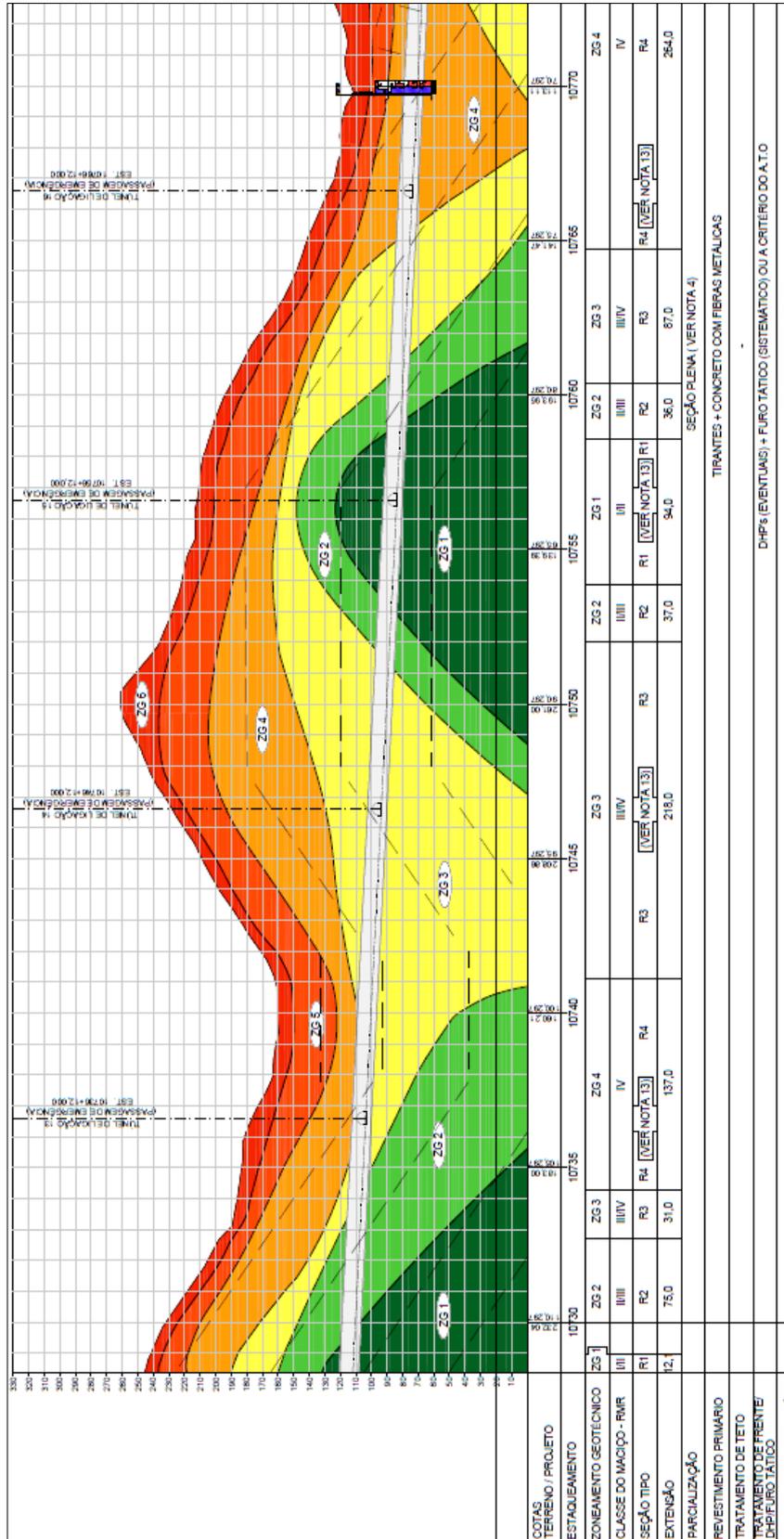
ULISBOA. Universidade de Lisboa. **Estruturas Subterrâneas**. Disponível em: <<https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/844562369085874/Tuneis%20Abril%202016.pdf>>. Acesso em: 19 maio de 2019.

VIEIRA, Flávio Augusto Moreira. **Execução de Túneis em NATM (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD) para Obras de Saneamento**. 2003. 86f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

YOUTUBE. **Cloaca Maxima**. American Institute for Roman Culture. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YjePL1Uqy4k>>. Acesso em: 13 maio 2019.

ANEXO I: PERFIL GEOLÓGICO – TÚNEL 5 PRINCIPAL



ZONAS GEOLÓGICO GEOTÉCNICAS	COMPORTAMENTO	CARACTERÍSTICAS	CLASSE DO MACIÇO - RMR
ZG 6	SOLO ESTRUTURADO	SILTE ARENOSO MICACEO, MACIÇO QUASE CONTÍNUO COM ESTRUTURA RELIQUAR QUE INICIALIZA AS INSTABILIDADES PLASTICÁVEL	V (RMR<15)
ZG 5	MISTO, SOLO E ROCHA	SAPROLITO E ZONAS CATACLASADAS INTERCALAÇÕES DE SOLO E ROCHA COM FEIÇÕES ESTRUTURAS TOTALMENTE ALTERADAS (SOLO) ABERTAS E NÚCLEOS ROCHOSOS	IV / V (16<RMR<25)
ZG 4	RUPTURA PROGRESSIVA	JUNTAS ABERTAS E/OU ALTERADAS, PRINCIPALMENTE AO LONGO DA FOLIAÇÃO E/OU VARIABILIDADE GRANDES DOS LITOTIPOS	IV (26<RMR<35)
ZG 3	RUPTURA BLOCOS NA DIMENSÃO DO LITOTIPO	JUNTAS ABERTAS E/OU ALTERADAS AO LONGO DA FOLIAÇÃO	III / IV (36<RMR<50)
ZG 2	RUPTURA BLOCOS NA DIMENSÃO DO LITOTIPO	JUNTAS POUCO ABERTAS AO LONGO DA FOLIAÇÃO OU COM GEOMETRIA FAVORÁVEL	II / III (51<RMR<70)
ZG 1	RUPTURA BLOCOS NA DIMENSÃO DO LITOTIPO	JUNTAS FECHADAS E COM GEOMETRIA FAVORÁVEL	I / II (71<RMR<100)

ANEXO II: FICHA DE CLASSIFICAÇÃO RMR



queiroz galvão
CONSTRUÇÃO



TAMOIOS
engenharia e arçarias

MAPEAMENTO GEOLÓGICO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

FRENTE: _____ ESCAVAÇÃO: _____

Nº: _____ ESTACA: _____

DATA: _____

CLASSIFICAÇÃO RMR:

PARÂMETRO	INTERVALO DE VALORES				
	> 10 MPa	10-4 MPa	4-2 MPa	2-1 MPa	PARA VALORES MUITO BAIXOS E PREFERÍVEL ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAIXIAL
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO MATERIAL INTACTO	> 250 MPa	250-100 MPa	100-50 MPa	50-25 MPa	25-5 MPa
ENSAIO DE CARGA PONTUAL	> 10 MPa	10-4 MPa	4-2 MPa	2-1 MPa	PARA VALORES MUITO BAIXOS E PREFERÍVEL ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAIXIAL
ERRADO DE COMPRESSÃO SIMPLES	> 250 MPa	250-100 MPa	100-50 MPa	50-25 MPa	25-5 MPa
PONTUAÇÃO	15	12	7	4	2
ROD	100-90%	90-75%	75-50%	50-25%	<25%
PONTUAÇÃO	20	17	13	8	3
ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES	>2m	2-0,6m	0,6-0,2m	0,2-0,06m	<0,06m
PONTUAÇÃO	20	15	10	8	6
PERSISTÊNCIA (m)	>1m	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20
PONTUAÇÃO	8	4	2	1	0
ABERTURA (mm)	selada	<0,1	0,1 a 1	1 a 5	>5
PONTUAÇÃO	6	5	4	1	0
RUGOSIDADE	muito rugosa	rugosa	levemente rugosa	plana	polida
PONTUAÇÃO	6	5	3	1	0
PREENCHIMENTO (mm)	nenhum	duro <5	duro >5	molde <5	molde >5
PONTUAÇÃO	6	4	2	2	0
ALTERAÇÃO	#6	levemente alterada	moderadamente alterada	altamente alterada	descomposta
PONTUAÇÃO	6	5	3	1	0
NÍVEL FREÁTICO	SECO	ÚMIDO	MOLHADO	GOTELHANDO	FLUXO
PONTUAÇÃO	15	10	7	4	0

DESCRÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

TOPO (m)	BASE (m)	LITOTIPO	ALTERAÇÃO

DESCONTINUIDADES

NÚMERO	DIREÇÃO	TPO	ALTERAÇÃO	RUGOSIDADE	ABERTURA	ESPAÇAMENTO	PERSISTÊNCIA	PREENCHIMENTO	OBSERVAÇÕES

CARACTERÍSTICAS:

RUGOSIDADE	PREENCHIMENTO	PERSISTÊNCIA
S1 RUGOSA	P1 SEM PREENCHIMENTO	Pe1 < 1m
S2 POLIDA	P2 PAREDES OXIDADAS	Pe2 1 - 3m
S3 LISA	P3 MATERIAL ARGILOSO	Pe3 3 - 10m
ALTERAÇÃO DAS PAREDES	P4 MATERIAL RUO	Pe4 10 - 20m
A SA	ABERTURA	Pe5 > 20m
B POUCA ALTERADA	Ab1 < 10mm	FECHADA
C MEDIANAMENTE ALTERADA	Ab2 1.0 - 10mm	ESPAÇADA
D MUITO ALTERADA	Ab3 > 10mm	ABERTA

LEGENDA DE MAPEAMENTO

DESCONTINUIDADE

FALHA

FOLIAGEM

CONTATO GEOMECÂNICO

ÚMIDO

MOLHADO

GOTELAMENTO

FLUXO

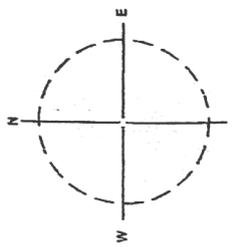
LEVE

MODERADO

INTENSO

OCORRÊNCIAS EXECUTIVAS:

PRINCIPAIS FAMILIAS DE JUNTAS:



AJUSTE CONFORME AS DESCONTINUIDADES

CONDIÇÃO	PONTUAÇÃO
MUITO DESFAVORÁVEL	-12
DESFAVORÁVEL	-10
RAZOÁVEL	-5
FAVORÁVEL	-2
MUITO FAVORÁVEL	0

ANEXO III: PROJETO DE ENFILAGENS

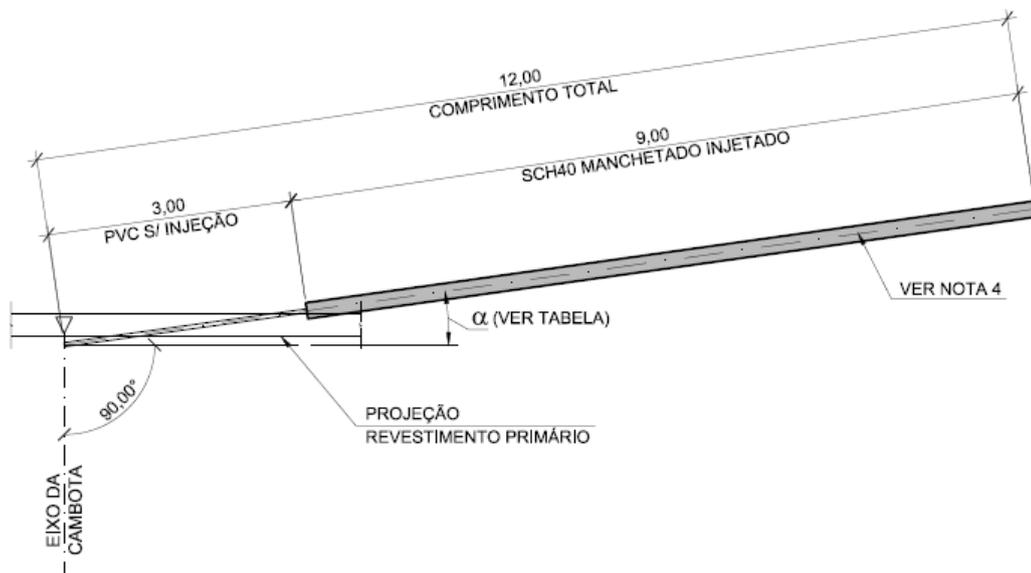
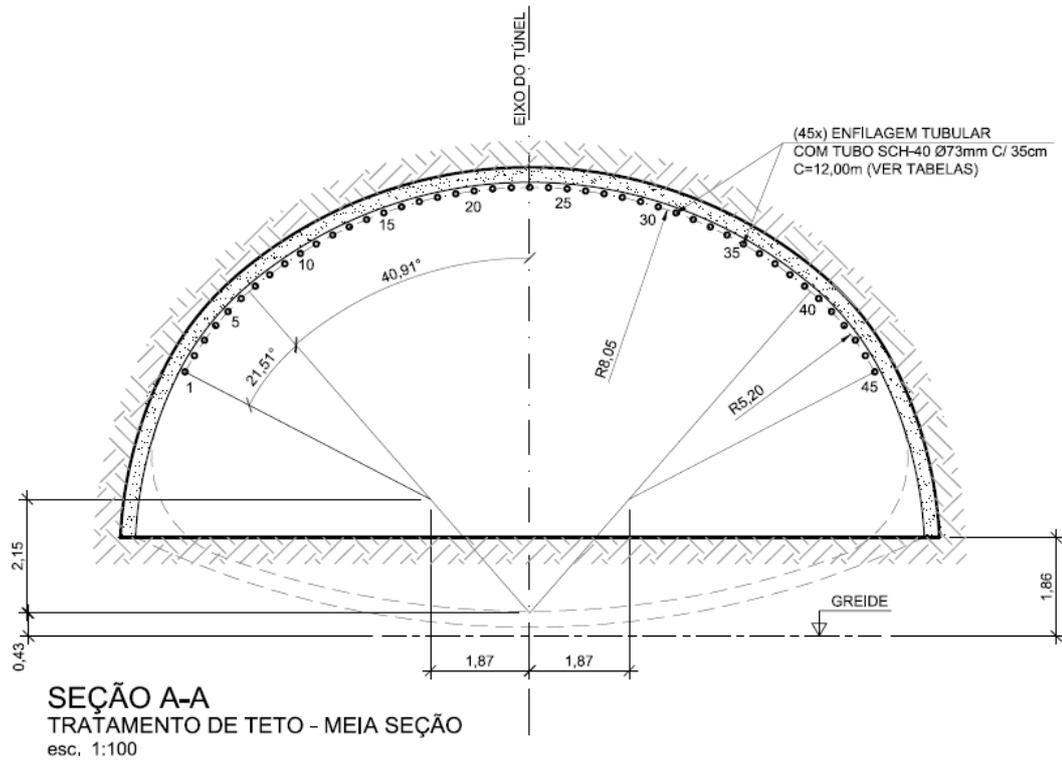
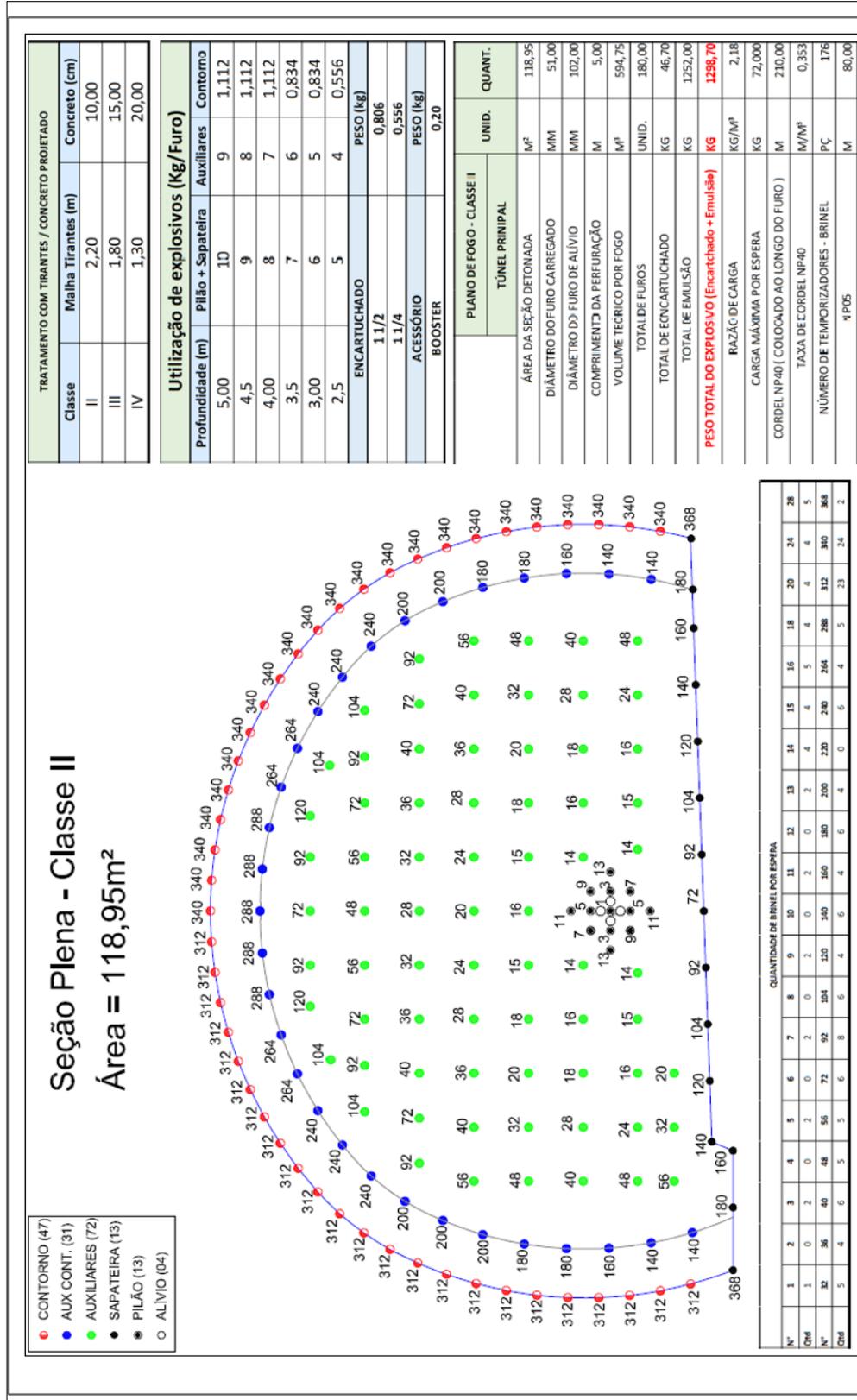
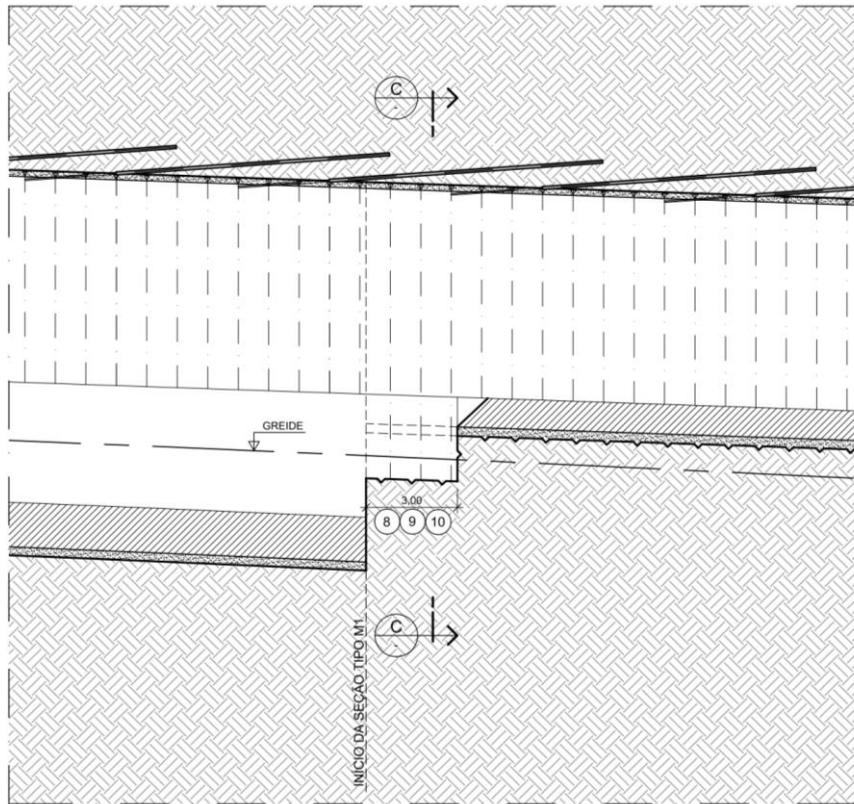
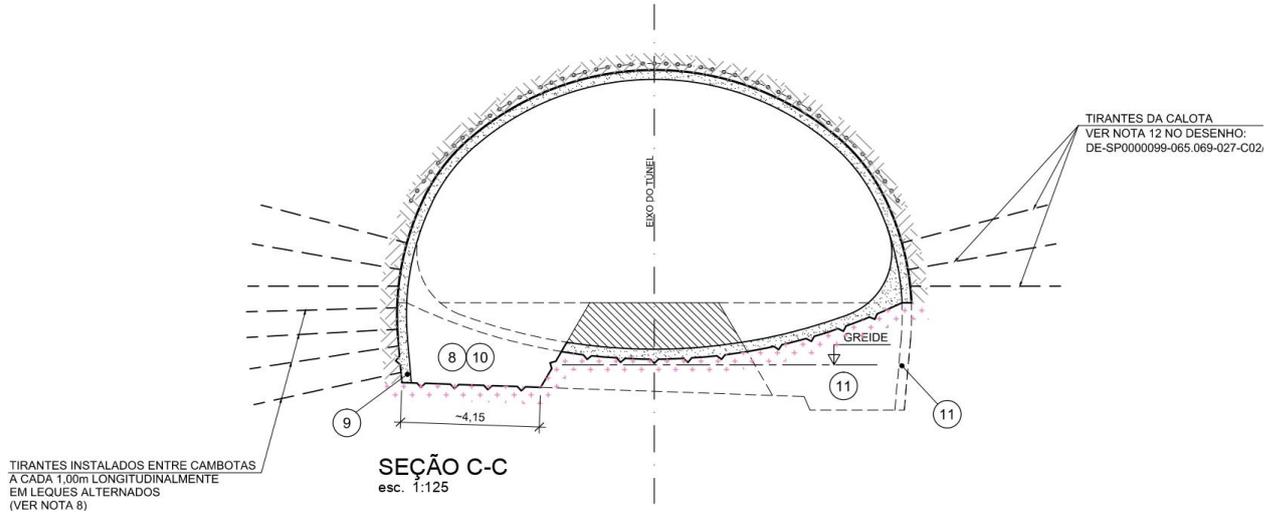


TABELA			
TRATAMENTO DE TETO - MEIA SEÇÃO			
LINHA	COMPRIMENTO (m)		ÂNGULO α
	SEM INJEÇÃO	INJETADO	
1 ao 45	3,00	9,00	4,00°

ANEXO IV: PLANO DE FOGO



ANEXO VI: PROJETO DE TIRANTES



SEÇÃO LONGITUDINAL
esc. 1:125

ANEXO VII: RELATÓRIO DE SISMOGRAFIA

GeoSonics Inc. Seismic Analysis USBM/Velocity Waveform Report

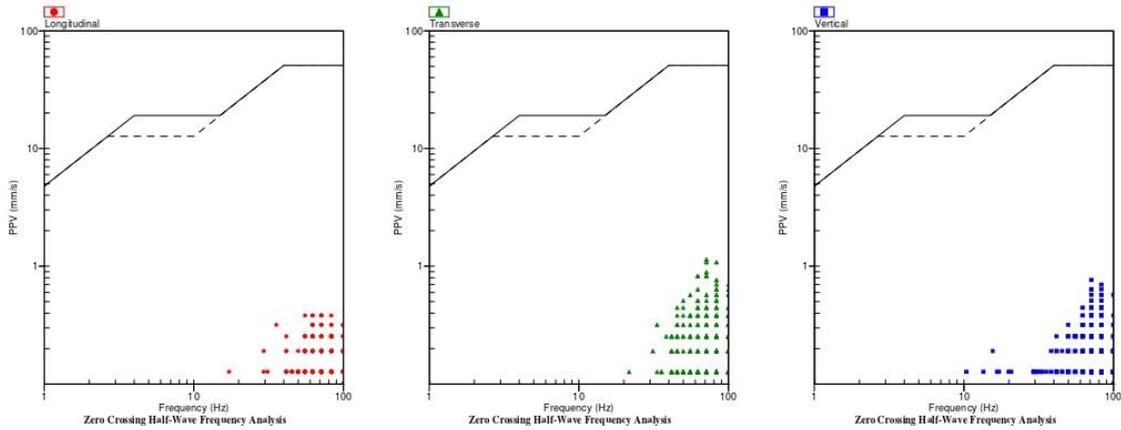
Serial No: 8940 v4.71
Date: 10/01/2018 10:34:05
Event No: 18
Record Time: 5.0 s
Client: QUEIROZ GALVAO
Operation: TUNEL 2
Location: PISTA
Distance: 300
Operator: RICARDO
Comment:
Seismic Trigger: 0.51 mm/s
Sound Trigger: 116 db

	L	T	V
Summary Data			
PPV (mm/s)	0.38	1.14	0.76
FREQ (Hz)	71.4	71.4	71.4
PD (.01mm)	0.20	0.32	0.28
PPA (g)	0.026	0.065	0.039
Peak Vector Sum:	1.27 mm/s		
Peak Air Pressure:	118 db		
	0.00214 PSI @ 3.5 Hz		

Additional Info:

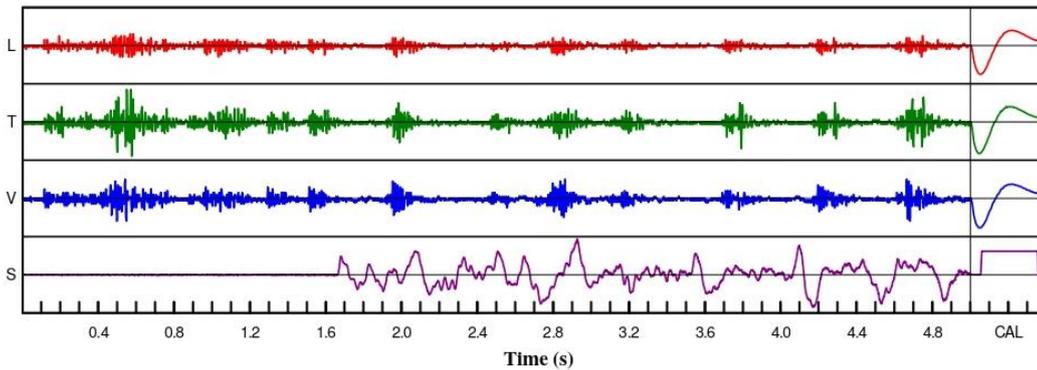
Shaketable Calibrated: 06/08/2018
By: GeoSonics Inc.
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

USBM Safe Blasting Levels



Velocity Waveform

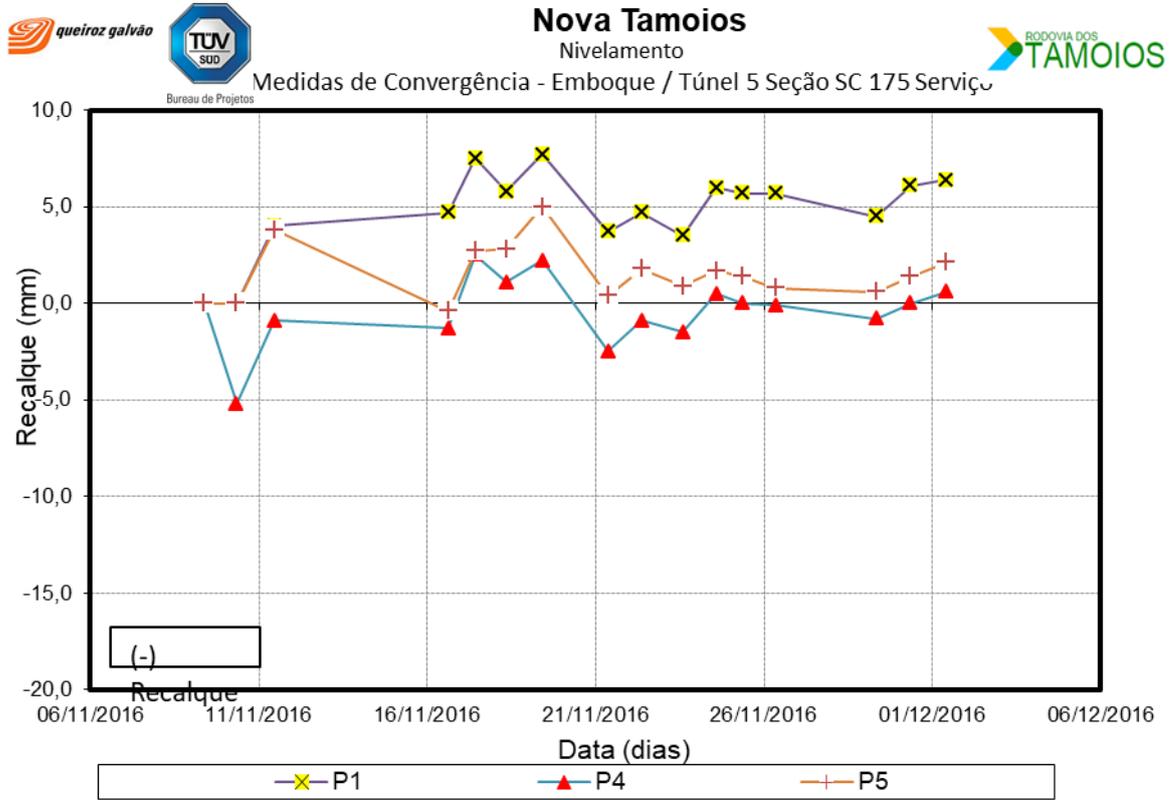
SN: 8940 Event: 18



Velocity Waveform Graph Scale

Time Scale: 0.100 s
Seismic Scale: +/- 1.28 mm/s
Sound Scale: +/- 0.0023 PSI

ANEXO VIII: RELATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO



Data / Hora	P1			P4			P5		
	leitura (m)	parcial (mm)	total (mm)	leitura (m)	parcial (mm)	total (mm)	leitura (m)	parcial (mm)	total (mm)
9/11/16 9:10	69,233	0,0	0,0	66,093	0,0	0,0	66,053	0,0	0,0
10/11/16 8:10	69,230	0,0	0,0	66,087	0,0	-5,2	66,048	0,0	0,0
11/11/16 11:20	69,234	4,0	4,0	66,092	4,3	-0,9	66,052	3,8	3,8
16/11/16 15:10	69,234	0,7	4,7	66,091	-0,4	-1,3	66,048	-4,2	-0,4
17/11/16 10:20	69,237	2,8	7,5	66,095	3,8	2,5	66,051	3,1	2,7
18/11/16 8:20	69,236	-1,7	5,8	66,094	-1,4	1,1	66,051	0,1	2,8
19/11/16 10:00	69,237	1,9	7,7	66,095	1,1	2,2	66,053	2,2	5,0
21/11/16 9:15	69,233	-4,0	3,7	66,090	-4,7	-2,5	66,049	-4,6	0,4
22/11/16 9:00	69,234	1,0	4,7	66,092	1,6	-0,9	66,050	1,4	1,8
23/11/16 14:10	69,233	-1,2	3,5	66,091	-0,6	-1,5	66,049	-0,9	0,9
24/11/16 14:20	69,236	2,5	6,0	66,093	2,0	0,5	66,050	0,8	1,7
25/11/16 9:10	69,235	-0,3	5,7	66,093	-0,5	0,0	66,050	-0,3	1,4
26/11/16 8:40	69,235	0,0	5,7	66,092	-0,1	-0,1	66,049	-0,6	0,8
29/11/16 8:10	69,234	-1,2	4,5	66,092	-0,7	-0,8	66,049	-0,2	0,6
30/11/16 8:30	69,236	1,6	6,1	66,093	0,8	0,0	66,050	0,8	1,4
1/12/16 9:30	69,236	0,3	6,4	66,093	0,6	0,6	66,051	0,7	2,1

