

## EXECUÇÃO DE UM TÚNEL PELO MÉTODO NATM – CASO PRÁTICO PORTO SUDESTE

Ana Flávia Ataíde de Santana <sup>1</sup>; Gerson Ribeiro de Souza Júnior <sup>2</sup>; Joandson da Conceição Paixão <sup>3</sup>; Vericleudo Lopes de Araujo <sup>4</sup>; Luiz Antonio Naresi Júnior <sup>5</sup>; Denise do Amaral Santana<sup>6</sup>

**Resumo** – Este artigo tem como objetivo a apresentação de uma análise técnica à construção de túneis pelo Método NATM – *New Austrian Tunneling Method* (Novo Método Austríaco de Túneis), em particular, aplicado especificamente na construção do Túnel no Porto Sudeste, que é um terminal privativo de uso misto localizado na Baía de Sepetiba no Município de Itaguaí, Estado do Rio de Janeiro, utilizado para embarque de minério de ferro em uma retroárea de 52,1 hectares. O Porto Sudeste abriga pátios para estocagem e manuseio de minério de ferro com uma capacidade numa primeira fase para armazenagem de 25 milhões de toneladas por ano, com potencial para chegar as 50 milhões de toneladas por ano. A ligação entre os pátios de estocagem de minério de ferro e o terminal marítimo está sendo feita através deste túnel, por onde passam as correias transportadoras que conduzem o minério de ferro até o píer de embarque. Em termos operacionais, foi possível perceber que se tratou da melhor alternativa para operacionalizar os trabalhos do Porto Sudeste, uma vez que a construção de um túnel elevou a capacidade de estocagem de minério de ferro no porto, além de ter incrementado o seu escoamento através do transporte marítimo. Outro aspecto importante diz respeito às questões ambientais, visto que a implantação do túnel possibilitou não apenas a redução e a emissão de poluentes para a atmosfera, como também a preservação da vegetação e das paisagens no entorno do terminal. A decisão de se construir esse Túnel no Porto Sudeste pelo Método NATM, dentre os métodos existentes, não levou em consideração apenas as questões de natureza financeira, mas também, e principalmente, os aspectos de cunho geotécnico que tornaram a obra exequível e segura.

**Abstract** – This article aims to present a technical analysis of tunnel construction using the NATM – *New Austrian Tunneling Method*, specifically applied to the construction of the tunnel at Porto Sudeste. Porto Sudeste is a private mixed-use terminal located in Sepetiba Bay, in the municipality of Itaguaí, State of Rio de Janeiro. It is used for iron ore shipment and is situated on a 52.1-hectare back area. The terminal includes stockyards for iron ore storage and handling, with an initial storage capacity of 25 million tons per year, with the potential to reach 50 million tons per year. The connection between the iron ore stockyards and the maritime terminal is made through this tunnel, which houses conveyor belts transporting the iron ore to the loading pier. From an operational perspective, it was observed that this was the best alternative for Porto Sudeste's operations, as the tunnel construction increased the port's iron ore storage capacity and enhanced its transportation via maritime shipping. Another important aspect concerns environmental issues. The implementation of the tunnel not only reduced pollutant emissions into the atmosphere but also contributed to the preservation of vegetation and landscapes surrounding the terminal. The decision to construct this tunnel at Porto Sudeste using the NATM method, among the available tunneling methods, was based not only on financial considerations but also, and primarily, on geotechnical factors that ensured the feasibility and safety of the project.

**Palavras-Chave** – Porto Sudeste, NATM, obra exequível.

<sup>1</sup> Eng., Pós Graduação em Engenharia Geotécnica da RTG, [ana.flavia.as@hotmail.com](mailto:ana.flavia.as@hotmail.com)

<sup>2</sup> Eng., Pós Graduação em Engenharia Geotécnica da RTG, [gerson\\_junior16@hotmail.com](mailto:gerson_junior16@hotmail.com)

<sup>3</sup> Eng., Pós Graduação em Engenharia Geotécnica da RTG, [joandsonpaixao@gmail.com](mailto:joandsonpaixao@gmail.com)

<sup>4</sup> Eng., Pós Graduação em Engenharia Geotécnica da RTG, [vericleudo@gmail.com](mailto:vericleudo@gmail.com)

<sup>5</sup> Eng., Coordenador da Pós Graduação em Engenharia Geotécnica da RTG, [naresi@naresi.com](mailto:naresi@naresi.com)

<sup>6</sup> Eng., Universidade São Judas Tadeu, [amaralsantana19@outlook.com](mailto:amaralsantana19@outlook.com)

## 1. INTRODUÇÃO

Em geral, os túneis são escavações subterrâneas que possibilitam a passagem de veículos, pedestres, animais, fiações e fluidos. No que diz respeito à passagem de veículos, por exemplo, a implantação de um túnel rodoviário pode ser um dos principais elementos para viabilizar a infraestrutura necessária de melhoria da mobilidade urbana.

Segundo Zanelato (2003), um túnel começa com a necessidade de superar um obstáculo natural, geralmente um maciço montanhoso. Entretanto, além do relevo montanhoso, existem outras barreiras que podem ser vencidas mediante a construção de túneis, tais como cursos d'água fluviais e marinhos, e zonas urbanas densamente edificadas.

Portanto, também são soluções construtivas muito úteis que além de permitirem um melhor planejamento da construção superficial em grandes metrópoles, sob o ponto de vista urbano, detêm a vantagem do baixo custo ambiental e da durabilidade das obras, características estas que vêm sendo cada vez mais valorizadas no mundo moderno em detrimento à necessidade de um desenvolvimento sustentável.

Por situações práticas, como inspeções acessibilidade e condição econômica, em geral, os túneis são construídos em profundidades rasas, onde, normalmente, os maciços são constituídos por solos ou rochas com certo grau de alteração. A combinação de maciços complexos de baixa competência e túneis rasos fazem com que esses túneis sejam geralmente construídos por métodos específicos, como o *Tunnel Boring Machines* (TMB), onde se emprega a “tuneladora”, ou outros métodos convencionais, tais como o Novo Método Austríaco de Túneis (NATM), em conjunto com técnicas de melhoria de solos ou maciços rochosos. (VERGARA, 2013).

O conhecimento contínuo que vem sendo adquirido com a construção dos túneis, em particular, com relação aos solos e as rochas e ao seu comportamento geoestrutural e geomecânico, tem permitido estabelecer padrões técnicos e melhorias contínuas de segurança para esses tipos de obras.

Um dos princípios do NATM é de que a melhor forma de se executar um túnel é com a escavação em seção, com o fechamento o mais rápido possível. Segundo Ferraz (1994), nem sempre o melhor método é aquele considerável exequível, quer pela limitação dos equipamentos, quer pela limitação do próprio maciço, não sendo rara a ocorrência dos dois aspectos, simultaneamente. É o caso de seções com grande diâmetro onde os equipamentos convencionais não são capazes de executá-las em uma única etapa. Por outro lado, é sabido que grandes seções demandam tempos de ciclo de escavação e aplicação dos suportes muito longos, tornando-os incompatíveis com o tempo de auto-sustentação do maciço no passo do avanço executado.

O NATM é uma técnica que, usualmente, representa menores investimentos, permitindo escavar de forma mais flexível com diferentes formas de seção, além de poder ser adaptado à diferentes solos. Sua maior desvantagem é a necessidade de um monitoramento constante, principalmente, nos casos de túneis urbanos onde esse monitoramento deve ser ainda mais rigoroso, tendo em vista que deslocamentos do solo podem danificar estruturas já existentes na região (DOMINGUES, 2016).

O presente artigo descreve um estudo de caso do túnel construído no Porto Sudeste, na Baía de Sepetiba, no Estado do Rio de Janeiro, para interligar os pátios de estocagem de minério de ferro e o terminal marítimo por onde passam os transportadores por correia que conduzem o minério até o píer. A implantação do túnel trouxe uma série de vantagens, dentre as quais, o aumento da capacidade de estocagem de minério de ferro no porto, e de seu transporte marítimo, além de ter reduzido a emissão de poluentes na atmosfera e preservado a vegetação e as paisagens locais.

O método empregado na construção do túnel do Porto Sudeste foi o NATM, associado ao condicionamento do maciço por técnica de enfilagens tubulares. Foi avaliado o projeto e o desempenho da construção do túnel e o desempenho de sua construção, analisando se a técnica construtiva foi adequada e mostrou-se aplicável à execução de forma segura em diferentes litologias, considerando-se as litologias, o tempo, o risco e o custo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1. O Método NATM

O Método NATM – *New Austrian Tunneling Method* (Novo Método Austríaco de Túneis) foi desenvolvido entre 1957 e 1965, cuja filosofia de projeto e construção se baseia em critérios de observação. De acordo com Balaguer (2014), o ponto de partida é o sistema de classificação e descrição qualitativa de maciços rochosos e as condições que os mesmos apresentam quando são escavados.

Tem como princípio aproveitar-se da capacidade de suporte do próprio solo em que o túnel está sendo escavado. As escavações são realizadas de forma convencional e um elemento de suporte é aplicado nas paredes (usualmente concreto projetado). Após a escavação, a estrutura definitiva pode ser colocada garantindo a estabilidade do túnel, principalmente, pela capacidade de sustentação do próprio solo (ROCHA, 2014).

Segundo Assis (2002), os três princípios básicos que fundamentam o NATM consistem no fato de que: i) o maciço deve ser visto como principal elemento estrutural; ii) a complementação da estrutura de sustentação, quando necessária, deve ser executada pela instalação de um sistema de suporte otimizado; e iii) a instrumentação do túnel deve ser promovida.

Lima (2016) acrescenta que limitações que impostas tanto pelos equipamentos a serem empregados na construção do túnel, quanto mesmo pelo maciço rochoso, tornam necessária a parcialização da seção de escavação de forma sequencial (Figura 1), sendo este também um importante princípio do Método NATM.

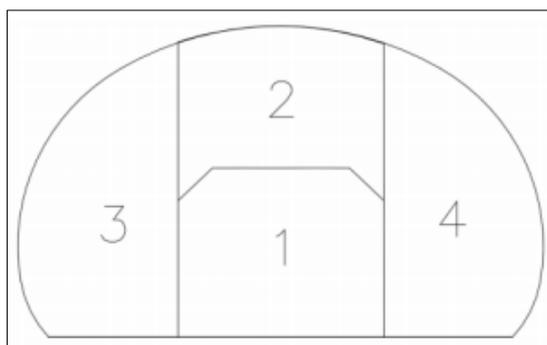


Figura 1. Parcialização da seção do túnel. Fonte: Mascarenhas (2014)

## 2.2. Investigações Prévias

Antes de se iniciar o projeto de um túnel devem ser realizadas investigações preliminares do terreno. As construções dos túneis estão diretamente ligadas às características dos solos e das rochas, fazendo com que suas investigações geológicas e geotécnicas sejam vitais para o sucesso da obra.

## 2.3. Tratamentos preliminares

Caso o maciço rochoso não apresente competência necessária tal que ofereça autosuporte durante os trabalhos de escavação do túnel, é necessário submetê-lo a um tratamento específico para poder dar continuidade aos trabalhos. O tratamento pode ser executado de diversas formas, entretanto, será definido em função da classificação desse maciço e de seu tempo de auto sustentação, diagnosticados através dos estudos geológicos e geotécnicos.

Uma das formas mais comuns de tratamento do maciço em obras de túneis é por enfilagens (Figura 2), que podem ser do tipo mecânica, tubular injetada, por colunas CCPH (*Cement Churning Horizontal Pile*), de bulbo úmido e de pregagens (SOUZA, 2003).

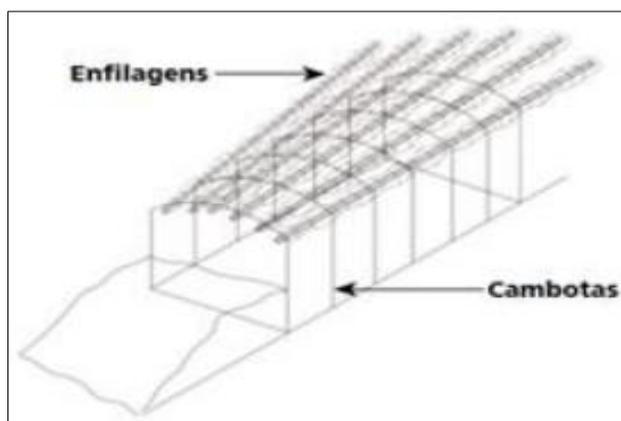


Figura 2. Modelo representativo das enfilagens. Fonte: Souza (2003)

## 2.4. Perfuração e Desmorte

Segundo Geraldi (2011), nas escavações de túneis em rocha maciça ainda predomina as técnicas de abertura tradicionais, conhecidas como Perfuração e Desmorte (*Drill and Blast*). Consiste de várias etapas operacionais executadas de maneira ordenada e que obedecem a um ciclo bem definido durante o trabalho de escavação.

Inicia-se com o denominado “plano de fogo”, donde são definidas a posição e quantidade dos furos a serem perfurados, além da carga explosiva necessária para cada um deles (Figura 3). Com base no “plano de fogo” é executada a perfuração da rocha (Figura 4), o carregamento de explosivos e o desmorte da rocha, o qual ditará o avançamento daquele ciclo operacional.

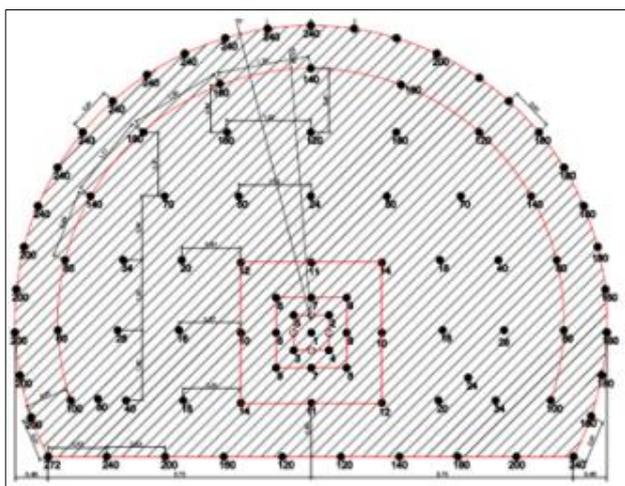


Figura 3. Esquema típico de um plano de fogo num túnel. Fonte: Santana *et al* (2019)



Figura 4. Perfuração de um túnel com o emprego de uma perfuratriz hidráulica de lanças. Fonte: Vieira (2003)

## 2.5. Suporte e Revestimento

Um dos principais elementos responsáveis pelo suporte de cargas do maciço rochoso em uma obra de túnel pelo Método NATM é o concreto projetado, devido a sua boa adaptação em diferentes tipos de superfície, sua facilidade e agilidade quando aplicado, tanto por via seca quanto por via úmida (Figura 5).

Campanhã *et al* (1998) destacam também o emprego do concreto projetado com a adição fibras, que substituem as telas e cambotas metálicas e possibilitam acompanhar as irregularidades da superfície escavada sem deixar vazios. As cambotas metálicas cujos perfis são geralmente em forma de arco, laminados ou treliçados, aparafusados e soldados (Figura 6). Sua função é de suportar as cargas iniciais do terreno, servir de gabarito para o revestimento de concreto, guia para o correto alinhamento do túnel e para a execução do tratamento do solo, além de apoio para a colocação de telas de aço ao redor da seção (ZANELATTO, 2003).

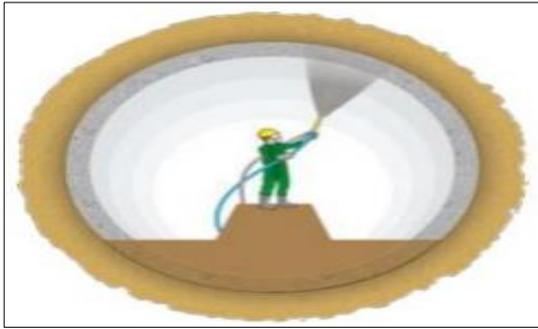


Figura 5. Esquema típico de execução do concreto projetado num túnel. Fonte: Vieira (2003)

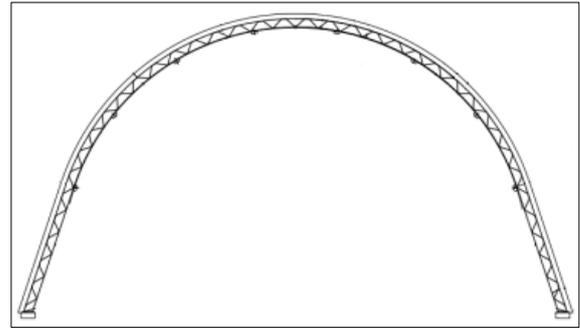


Figura 6. Representação de uma cambota metálica treliçada. Fonte: Zanelatto (2003)

Os arcos invertidos (Figura 7) são estruturas de concreto armado ou projetado, provisórios ou definitivos, empregados na escavação de túneis que passam por solos inconsolidados ou quando existem esforços laterais advindos da movimentação do maciço (LIMA, 2016).

As telas de aço soldadas são elementos de suporte bastante utilizados em solo e rochas muito alteradas (GERALDI, 2011). Quando aplicadas em túneis executados em solo e que empregam as cambotas metálicas, geralmente são aplicadas apenas no revestimento secundário de concreto como mostra a Figura 8.

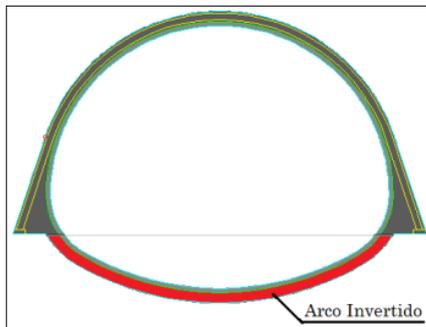


Figura 7. Representação de um arco invertido. Fonte: Lima (2016)

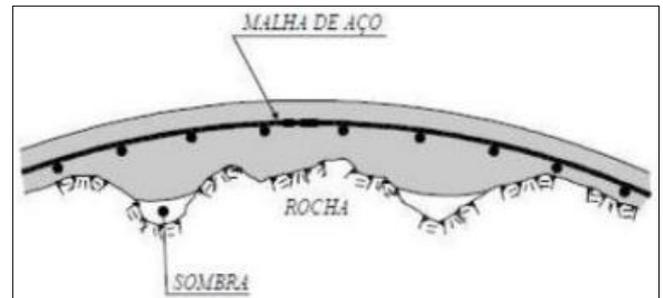


Figura 8. Representação de um arco invertido. Fonte: Campanhã *et al* (1998)

Os tirantes são elementos lineares capazes de transmitir esforços de tração entre suas extremidades (Figura 9). Classificados como sendo tensionados e não tensionados, permitem a aplicação de esforços de compressão no maciço que reduzem os processos de movimentação, deformação e ruptura (LIMA, 2016).

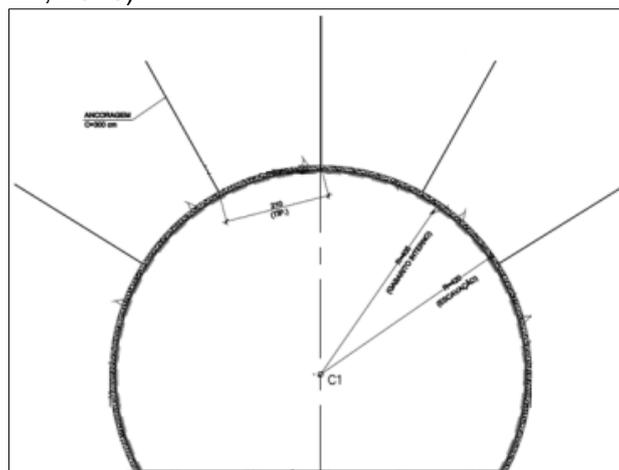


Figura 9. Representação de uma seção de túnel com tirantes. Fonte: Lima (2016)

## 2.6. Instrumentação

A execução de túneis em solo ou em rocha modificará o estado de tensões que atuam no maciço circundante, que podem causar movimentações que tendem a se propagar até a superfície

e gerar recalques, cuja magnitude poderá ser catastrófica às estruturas atingidas vizinhas à escavação, ou até mesmo a do próprio túnel. A Figura 10 mostra uma representação da instrumentação empregada para o monitoramento de um túnel.

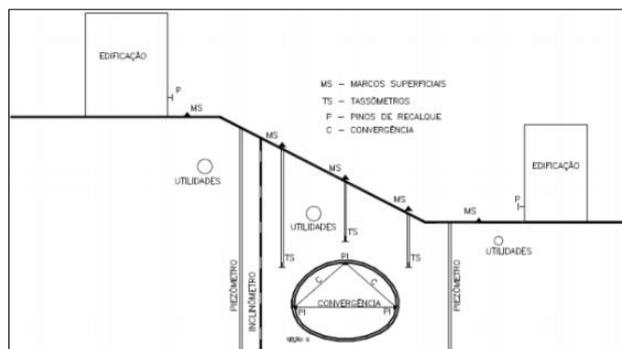


Figura 10. Representação da instrumentação em obras de túneis. Fonte: Murakami (2011)

### 3. ESTUDO DE CASO: O TÚNEL PORTO SUDESTE

#### 3.1. Características da Obra

O projeto compreendeu à execução do túnel de ligação do pátio da cota 32,0 até a plataforma de acesso ao píer do Porto Sudeste, na Ilha da Madeira, Baía de Sepetiba, Estado do Rio de Janeiro. A Figura 11 mostra a planta geral do Túnel Porto Sudeste.



Figura 11. Planta do Túnel do Porto Sudeste. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

O comprimento total do túnel é de 1.721,56 m. As características básicas do túnel estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do Porto Sudeste

PARÂMETROS	VALORES
Altura do emboque	14,00 m
Altura do desemboque	17,58 m
Altura do túnel	11,50 m
Inclinação interna variável	0,33% a 2,57%
Largura interna livre	20,50 m
Largura da pista para manutenção e circulação entre a mina e o porto	3,75 m
Distância da correia transportadora à abóbada do Túnel	1,90 m

Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

#### 3.2. Emboque e Desemboque

O emboque do túnel foi executado no paredão rochoso da antiga Pedreira Sepetiba. Este paredão contém quatro bancadas abaixo da crista, utilizadas anteriormente para a lavra da pedra e que apresentavam lascas e blocos semi-soltos de diversos tamanhos, com riscos de deslizamentos ocasionados pelas detonações de desmonte do passado. O maciço nesta região encontrava-se com diversas juntas de alívio, decorrentes das detonações efetuadas pelo desmonte.



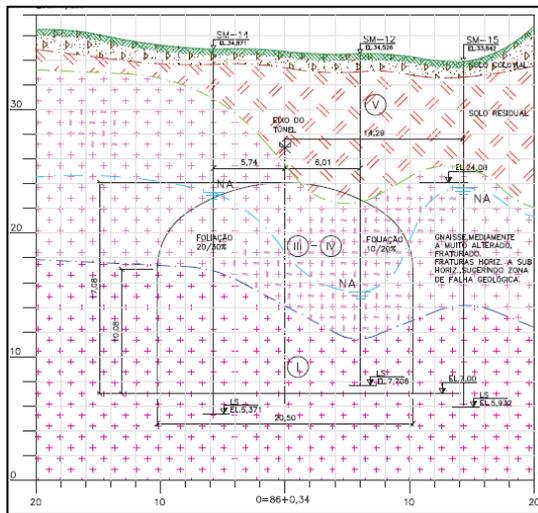


Figura 15. Corte A – A da seção geológico-geotécnica do desemboque do túnel. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

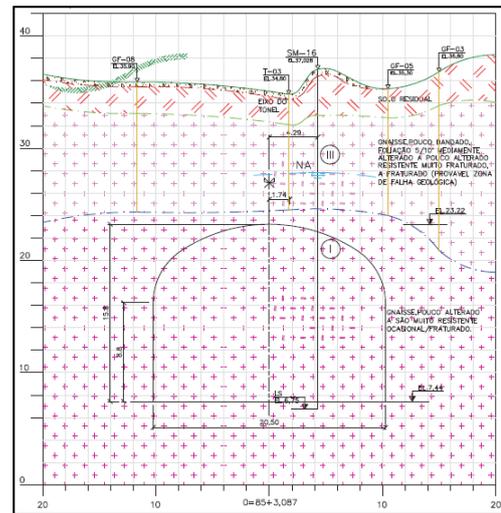


Figura 16. Corte B – B da seção geológico-geotécnica do desemboque do túnel. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

### 3.3. Escavação da Rocha e do Solo

De acordo com estudos, mapeamentos e levantamentos geológicos, aliados ao imageamento elétrico efetuado, às sondagens mistas e ao levantamento geofísico efetuado por sísmica de refração, estes últimos efetuados na área do novo eixo do túnel, pôde-se obter as diversas classes geomecânicas de material encontrados na escavação do túnel.

Segundo Classificação Geomecânica de Bieniawski, estas são as características das rochas por onde passa o túnel:

- Maciço rochoso muito bom (Classe I) – aproximadamente 745,32 m distribuídos ao longo do trecho, com maior concentração entre as estacas 37 e 74;
- Maciço rochoso bom (Classe II) – aproximadamente 215 m com maior concentração entre as estacas 34 e 37; 47 e 51;
- Maciço rochoso razoável (Classe III) – aproximadamente 679,44 m distribuídos ao longo do trecho;
- Maciço rochoso fraco (Classe IV) – aproximadamente 60,90 m, entre as estacas 83 e 86; e
- Maciço rochoso muito fraco (Classe V) – aproximadamente 20,34 m no desemboque.

### 3.4. Tratamento Estrutural das Paredes Internas

A densidade do tratamento é função da classificação do maciço rochoso. Sendo assim, o tratamento e construção do túnel em material Classe V, no desemboque, cuja cobertura de rocha na abóbada nos primeiros metros é quase inexistente, foi projetado e executado com cambota metálica e drenos profundos em função da presença de água no contato solo/rocha. Para o rebaixe, foi executada a escavação com fogo em alturas parcializadas, empregando-se o concreto projetado com fibra metálica e tirantes para o reforço nas paredes.

O tratamento do espelho do emboque foi executado após estabilização do talude rochoso, com tela de proteção de alta resistência. Os tirantes de resina CA 50 com diâmetro de 25 mm receberam placas de ancoragem a cada 4,0 m<sup>2</sup>.

### 3.5. Acabamento Interno

A execução da camada de concreto projetado com fibras metálicas especificada no projeto teve a espessura da seção típica respectiva. Foi aplicada após a camada inicial de concreto projetado, sem fibras metálicas e na espessura de 0,05 m para a regularização do túnel.

Foram previstas e executadas juntas serradas no revestimento de concreto, a cada 5 m, conforme previsto no projeto de construção. No entanto, sempre que o revestimento facetasse as superfícies de concreto (como as bases das fundações das correias transportadoras), seria executada uma junta de expansão. Nos trechos em solo na crista do talude, foram instalados drenos rasos, tipo barbacãs.

## 4. PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO

O planejamento focou os principais serviços executados ao longo da construção das “Obras de Infraestrutura de Perfuração do Túnel de Ligação do Pátio de Estocagem de Minério EL+32 ao Acesso da Plataforma de Transição Terra Mar”, com 1.721,56 m de extensão. Foram executadas, principalmente, as seguintes obras/serviços: i) execução de relatório de vistoria prévia nas edificações vizinhas; ii) execução de sondagens para investigação do subsolo local, quando necessário; iii) limpeza e destocamento da região do emboque, desemboque e vias de acesso; iv) tratamento do emboque executando-se investigações “bate-choco”, remoção de rochas soltas e estabilização do maciço com aplicação de tirantes, telas de aço e concreto projetado; v) execução de sistema de proteção no emboque, contra ultra lançamentos provenientes das detonações.

A proteção foi constituída de telas de aço e toras de eucalipto; vi) construção da proteção definitiva do emboque (Túnel Falso) com estrutura metálica de 5,0 metros de extensão; vii) tratamento do desemboque com escavações de solo e rocha e estabilização do maciço por meio de concreto projetado associado a tela metálica, chumbadores e tirantes; viii) construção do corpo do túnel por meio de escavação em rocha, classes I a V, e estabilização das paredes do túnel com aplicação de drenos, tirantes, chumbadores cambotas metálicas treliçadas e concreto projetado; e ix) pavimentação do túnel, parte em concreto (região de assentamento dos transportadores de correias), e parte em CBUQ (região de pista de rolamento de veículos).

## 5. PREMISSAS DO PLANEJAMENTO

A estratégia idealizada pelo CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010) para abordagem do empreendimento em pauta, foi fundamentada nas seguintes premissas básicas de trabalho: i) foram mobilizadas equipes de serviço que prestaram serviços nas seguintes frentes: a) construção, manutenção e apoio ao canteiro de obras; b) limpeza, destocamento, escavação, carga e transporte de materiais de 1ª, 2ª e 3ª categorias nas áreas do emboque, desemboque e vias de acesso; c) sondagens geotécnicas nos locais de interesse (alinhamento do túnel); d) tratamento do emboque; e) tratamento do desemboque; f) execução do corpo do túnel; g) pavimentação do túnel; ii) as equipes de serviço atuaram em jornadas de trabalho com carga horária de 44 horas semanais, de segunda-feira a sábado, realizando serviços de 1 a 3 turnos, conforme apresentado no planejamento; iii) foram disponibilizadas equipes de construção, manutenção e apoio ao canteiro de obras e às frentes de trabalho com a finalidade de realizar movimentação de carga verticalmente ou horizontalmente (transporte rodoviário), fornecimento de infra-estrutura elétrica e iluminação, ar comprimido, ventilação, água e drenagem, dispositivos de içamento e ascensão de cargas, limpeza, esgotamento, sinalização e segurança no trabalho; iv) as obras de escavações e terraplenagem foram acompanhadas por consultores em geologia, para verificação da estabilidade dos paramentos e maciços remanescentes das escavações; v) o concreto utilizado nas obras foi adquirido de fornecedores existentes na região.

### 5.1. Cronograma de Execução

Após análise dos projetos e avaliando-se os procedimentos técnicos executivos empregados para os principais serviços, análise das quantidades dos serviços necessários, análise da situação dos locais de implantação do empreendimento em pauta e dos prazos requeridos para a execução da obra, o CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010) elaborou um cronograma físico que norteou a mobilização de materiais, mão-de-obra e equipamentos de forma eficaz à realização dos trabalhos. O cronograma físico elaborado pelo consórcio está apresentado a seguir.

A distribuição mensal de equipes de serviço gerou a distribuição mensal da mão-de-obra direta necessária para atender os prazos propostos no projeto. A distribuição de mão-de-obra, em conformidade com suas categorias profissionais, foi efetuada por equipe de serviço e totalizada em um cronograma de permanência global.

### 5.2. Fases de Execução

As fases de execução do túnel foram subdivididas em três etapas assim definidas: 1º Etapa: escavação da galeria-piloto com dimensões de L = 6,50 m x H = 7,00 m; 2º Etapa: alargamento da seção superior e com largura de 7,00 m, para cada lado, e de 20,00 m recuada em relação à galeria-piloto; 3º Etapa: rebaixamento da parte superior, atingindo a seção do projeto.

A Figura 17 detalha as etapas de execução do túnel. Com relação ao desemboque do túnel, as etapas são as mesmas atribuídas à execução do túnel (Figura 17), acrescida da escavação com cambota metálica treliçada no rebaixe e tratamento com cambota metálica treliçada e enfilagem, como mostrado na Figura 18.



Figura 17 – Sequência de etapas de execução do túnel. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

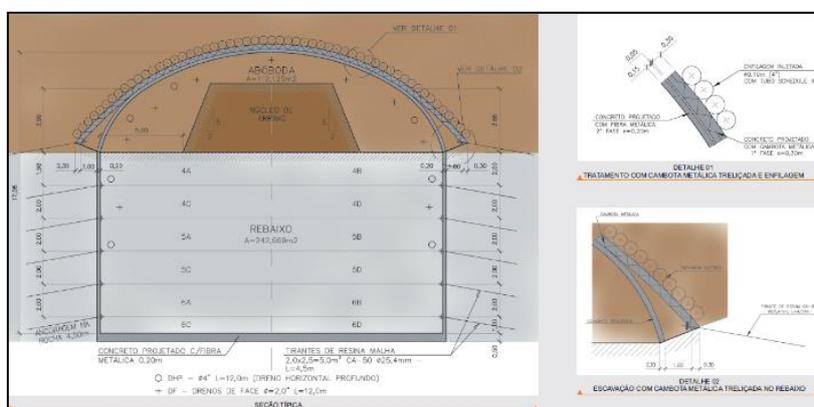


Figura 18. Execução do desemboque do túnel, com detalhe à escavação do rebaixe e tratamento da abóbada. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

As Figuras 19 e 20 mostram, respectivamente, a simulação de como ficaria o emboque e o desemboque do túnel sob o ponto de vista frontal.

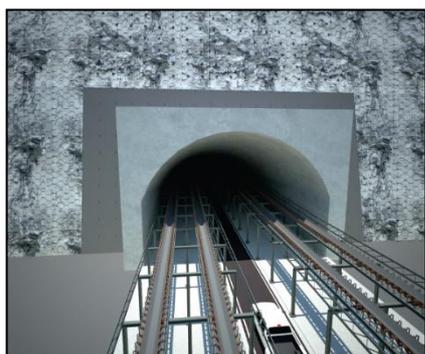


Figura 19. Simulação do emboque do túnel – vista frontal. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010)

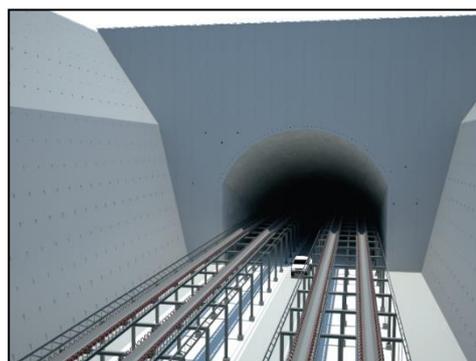


Figura 20 – Simulação do desemboque do túnel – vista frontal. Fonte: CONSÓRCIO ARG-CIVILPORT (2010).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre as opções possíveis, o túnel foi o tipo de obra que menos impactaria o meio ambiente, pois preservaria a vegetação e a paisagem no entorno do terminal do Porto Leste. O Método NATM se mostrou o mais adequado para a construção desse túnel, uma vez que além possibilitar uma maior capacidade de estocagem de minério de ferro no terminal e de seu escoamento marítimo, reduziria consideravelmente a emissão de poluentes (particulados em suspensão) nas circunvizinhanças durante a operação do porto.

Ademais, o Método NATM era o que melhor se adaptaria às condições geológicas e geotécnicas apresentadas pelo solo e pela rocha interceptados durante a escavação do túnel, com menores riscos de colapsos indesejáveis decorrentes da movimentação do maciço, passíveis de paralisar os trabalhos, por conseguinte, o que possibilitaria uma maior produtividade de execução da obra e redução dos custos.

Mesmo que o Método NATM seja confiável e seguro e ter sido crescente o seu emprego na construção de túneis, como o do Porto Sudeste, ainda assim, exige que seja estabelecido um planejamento detalhado e rigoroso que deve ser cumprido à risca em todas as suas etapas, assim como uma equipe de profissionais especializados na execução dos trabalhos de escavação, tratamento estrutural, acabamento interno e monitoramento, para que obtenha o sucesso esperado.

A adoção do processo totalmente mecanizado (perfuratriz hidráulica, pás-carregadeira, caminhões, entre outros) em todas as etapas construtivas do túnel, também foi determinante para o andamento da obra e a qualidade dos trabalhos realizados.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O mundo moderno tem exigido um número maior de obras, cada vez maiores e complexas, para atender as necessidades humanas, sejam elas voltadas à construção de usinas hidroelétricas, sistemas de abastecimento de água e esgoto, canais de drenagem, sistemas de transportes rodoviários e ferroviários, moradias, dentre outras. Nos meios urbanos a construção de túneis se justifica por se tratarem de “obras enterradas” que não demandam a ocupação de grandes áreas na superfície, cada vez mais escassas. Nas rodovias, por exemplo, por questões ambientais e de segurança, a opção pelos túneis tem sido a solução mais adequada.

O objetivo principal deste trabalho foi o de discorrer a respeito do método construtivo do túnel NATM (New Austrian Tunneling Method ou Novo Método Austríaco de Túneis), dentro das modernas técnicas conhecidas no país e no mundo. Só com o prévio conhecimento geológico-geotécnico dos solos, das rochas e/ou da mistura dos dois, por onde passará o túnel, é que poderão ser definidos os parâmetros do projeto e de sua execução, no que tange ao método de escavação e ao suporte empregado, seja ele primário ou definitivo.

Sabe-se que num tipo de obra como esta, tanto o solo quanto as rochas constituintes, vão mudando à medida em que o túnel avança, trazendo novas características e comportamentos geológico-geotécnicos que irão ditar os trabalhos a serem realizados (desmonte, suporte, etc.). Sem contar com as conhecidas descontinuidades geológicas (falhas, intrusões, diques, etc.), que, certamente, comprometerão ainda mais a operação impondo-lhe desafios ainda maiores à equipe de técnicos responsáveis pela construção do túnel.

Num primeiro momento, o trabalho esteve voltado aos primórdios da indústria tuneleira no Brasil e mundo, com o relato de seu histórico e de como as técnicas foram evoluindo com o passar dos anos. A construção da rede de túneis pelos romanos no Século VI a. C., o impulso no Século VII com a proliferação de canais de navegação, e no Século XIX, com a expansão da malha ferroviária na América do Sul, o emprego dos explosivos como a pólvora e, mais à frente, a nitroglicerina, utilizadas para a construção de túneis, o desenvolvimento das chamadas tuneleiras de hoje, que tiveram origem no escudo de tunelamento desenvolvido pelo Engenheiro Brunel e a referência à túneis notáveis como o Canal da Mancha e o Túnel São Gotardo, aliado à redução de espaço na superfície devido ao inevitável crescimento das cidades e das áreas de preservação ambiental, tem proporcionado um significativo aumento no número de obras subterrâneas, onde a tendência é de crescerem ainda mais na mesma proporção em que cresce a necessidade humana.

Num segundo momento, buscou-se conhecer os principais tipos de túneis, isto é, dos métodos construtivos mais utilizados na indústria tuneleira, dentre os quais o NATM, que é a mais usual e difundida técnica de escavação existente no mundo, seja ela no solo ou em rocha.

Num terceiro momento, foi feito o estudo da arte com o desenvolvimento do trabalho voltado, especificamente, à construção (as is) do Túnel do Porto Sudeste, no Rio de Janeiro, em que foram abordados de maneira sucinta: a descrição do projeto deste túnel e o porquê de sua necessidade naquele local, as obras e serviços necessários para construí-lo, a classificação geomecânica

daquele maciço nas várias etapas de execução da obra, o planejamento e sua execução e a estimativa dos custos iniciais.

De tudo que foi visto nesse trabalho, no que se refere à execução de túneis, percebe-se que, independentemente do crescimento na quantidade desses tipos de obras, que tenderá a crescer nas próximas décadas, deve-se ter em mente que a confiabilidade num projeto de um túnel, deve estar “calçada” em informações prévias obtidas nas fases que antecedem a escavação do túnel propriamente dito.

Isto não quer dizer que fatores indesejáveis e imprevisíveis diretamente associados ao maciço rochoso – pois é no maciço que o túnel irá passar - não possam vir a ocorrer com o andamento dos trabalhos. Se não antecipados, que possam ter o seu impacto minimizado ao máximo, visto que, deles, poderão desencadear-se acidentes com sérias consequências a trabalhadores, atrasos na entrega da obra e, até a perda total do túnel, que resultarão em sérios prejuízos financeiros e até jurídicos à empresa executora.

Vale destacar ainda que um túnel, além de se caracterizar como uma solução ecologicamente mais limpa, por diminuir os impactos ambientais que evitam, por exemplo, o desmatamento de áreas com vegetação nativa possibilita a utilização da própria rocha escavada oriunda do desmonte da seção, inclusive na própria construção da obra.

Pôde-se constatar ainda com este trabalho de que a construção de um túnel, qualquer que seja sua finalidade, requer conhecimento e responsabilidade de seus executores. Apesar de ser uma obra de arte, é complexa e impõe inúmeros desafios aos envolvidos, que só com o empenho e a dedicação de todos é que se alcançarão os objetivos propostos pelo projeto.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. P. Mecânica das rochas: obras subterrâneas. Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF, 2002.
- BALAGUER, D. Estudo de Caso – a execução do túnel de serviço da linha 4 do metrô do Rio de Janeiro – Emboque Gávea. Projeto de Graduação da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- CAMPANHÃ, C. A.; BOSCOV, P. NATM - Túneis em terreno pouco consistentes. Manual Técnico, 1998
- CONSÓRCIO A.R.G-CIVILPORT. Porto sudeste: obras de infraestrutura de perfuração do túnel de ligação do pátio de estocagem de minério – EL. +32 ao acesso da plataforma de transição terra-mar – 10 MTPA. Rio de Janeiro, 2010.
- DOMINGUES, V. R. Técnicas construtivas de túneis de travessia. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2016.
- FERRAZ, J. C. F. O NATM – novo método austríaco de execução de túneis “*new Austrian tunneling method*”. Manual Técnico, 1994.
- GERALDI, J. L. P. O ABC das escavações de rocha. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2011.
- LIMA, V. B. O. Aplicação do método NATM na execução de túnel em rocha. Projeto de Graduação da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.
- MASCARENHAS, A. Estudo de caso: escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o método NATM - Região Portuária, Centro do Rio de Janeiro. Projeto de Graduação da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- MURAKAMI, C. A. Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- ROCHA, M. Oliveira. Estudo da estabilidade da frente de escavação em túneis Rasos em Solo. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, Brasil. 2014.
- SANTANA, I. V.; LIMA, M. A.; COSTA L. V.; BONFIM, R. S. Tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas. Anais do 1º Simpósio de TCC das faculdades FINOM e Tecsoma, 2019.

SOUZA, T. B. Tratamento de solos para execução de túneis urbanos. Projeto de Graduação da Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

ZANELATO, E. A. Escavação de túneis – métodos construtivos. Projeto de Graduação da Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

VERGARA, D. A. Análise paramétrica da técnica de pré-suporte com enfilagens em portais de túneis. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

VIEIRA, F. A. Execução de túneis em NATM para obras de saneamento. Projeto de Graduação da Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

Naresi, L.A. Jr. Tunnel Liner e/ou Túnel Bala- Execução e Problemas Típicos durante sua construção por falta de sondagens e eventos não previstos, em <https://sites.google.com/site/naresi1968/naresi> data 08/03/2024 no site [www.naresi.com](http://www.naresi.com) artigo 75.