

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Maristela Adriane Sehn

**MEDIÇÃO E CONTROLE DE OVERBREAK EM TÚNEIS ESCAVADOS PELO  
MÉTODO NATM COM EXPLOSIVOS – ESTUDO DE CASO TÚNEL PRINCIPAL 5 DO  
TRECHO SERRA DA RODOVIA DOS TAMOIOS (SP-99)**

Florianópolis  
2020

Maristela Adriane Sehn

**MEDIÇÃO E CONTROLE DE OVERBREAK EM TÚNEIS ESCAVADOS PELO  
MÉTODO NATM COM EXPLOSIVOS – ESTUDO DE CASO TÚNEL PRINCIPAL 5 DO  
TRECHO SERRA DA RODOVIA DOS TAMOIOS (SP-99)**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel/Licenciado em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Marcos A. Marques Noronha

Florianópolis  
2020

Maristela Adriane Sehn

**MEDIÇÃO E CONTROLE DE OVERBREAK EM TÚNEIS ESCAVADOS PELO  
MÉTODO NATM COM EXPLOSIVOS – ESTUDO DE CASO TÚNEL PRINCIPAL 5 DO  
TRECHO SERRA DA RODOVIA DOS TAMOIOS (SP-99)**

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

Florianópolis, 05 de dezembro de 2020.

---

Prof. Luciana Rohde  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Marcos Aurelio Marques Noronha  
Data: 14/12/2020 11:17:30-0300  
CPF: 410.965.173-53

---

Prof. Marcos A. Marques Noronha, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. André Pacheco de Assis, Dr.  
Universidade de Brasília

---

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Ana Carolina Moreira Nascimento, Eng. Civil

---

Tiago Borges da Silva, MSc

*Dedico essa monografia com especial carinho aos meus pais Ana Maria Juszkerwicz e Egidio Egon Sehn, que me proporcionaram segurança e apoio incondicional ao longo dos meus anos de graduação. Eu sou muito grata a vocês.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Construtora Queiroz Galvão pela oportunidade concedida em 2019 com o Programa de Estágio de Férias, por meio do qual pude acompanhar as obras de duplicação da Rodovia dos Tamoios (SP-99), de onde surgiu a ideia para esse estudo de caso.

Também agradeço aos colaboradores da Construtora Queiroz Galvão, com destaque para os colegas estagiários que compartilharam dessa experiência, ao Engenheiro Pedro Paulo dos Anjos pelos materiais fornecidos, e em especial ao Geólogo Tiago Borges pela disponibilidade e entusiasmo dispensados com meu projeto de pesquisa.

Agradeço ao LabTrans/UFSC pela oportunidade de estagiar em projetos voltados para obras de túneis, os quais foram fundamentais no meu desenvolvimento técnico na área e conseqüentemente na construção desse trabalho.

Agradeço ao Einstein Floripa e demais projetos que participei dentro da universidade, que foram essenciais para a minha formação acadêmica e moral, e que de quebra ainda me apresentaram pessoas incríveis.

Agradeço ao professor Marcos Noronha pela orientação, sempre guiada com paciência e incentivo.

Agradeço aos demais professores da graduação pelos conhecimentos transmitidos e à UFSC pela estrutura e recursos concedidos nos últimos anos.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos mais próximos que me ensinam, me inspiram e dão mais sentido à minha jornada. Com vocês a vida é mais divertida e leve.

## RESUMO

A escavação de túneis subterrâneos pelo método NATM com explosivos é um processo inerentemente destrutivo, que tem como uma das principais consequências o *overbreak*. Definido como a quantidade de rocha escavada além do gabarito previsto em projeto, o *overbreak* tem implicações tanto financeiras, como de qualidade e segurança para a obra de um túnel. Apesar de a maioria dos túneis no Brasil ser executada pelo método NATM com explosivos, não há muitos dados ou investigações voltadas para esse tema atualmente. Nesse sentido, esse trabalho faz uma contribuição ao estudo de *overbreak* em túneis rodoviários escavados pelo método NATM, utilizando para esse fim o estudo de caso de um túnel rodoviário inserido na obra de duplicação da Rodovia dos Tamoios (SP-99), a qual está localizada no litoral norte do estado de São Paulo. Os estudos são desenvolvidos a partir de análises qualitativas e quantitativas, sendo essas sob um viés estatístico. Desse modo, são descritos os processos de escavação, de controle e medição do *overbreak* adotados para o túnel em estudo, bem como as tendências de ocorrência desse fenômeno e a sua correlação com o parâmetro geomecânico RMR. Discutem-se também as possíveis causas do *overbreak* a partir da concepção teórica e dos resultados obtidos nas análises.

**Palavras-chave:** *Overbreak*; Túnel; Escavação.

## **ABSTRACT**

Excavation of underground tunnels using NATM method with explosives is an inherently destructive process which might produce overbreak, an excessive excavation beyond the designed profile. Overbreak has financial and safety implications as well as impacts on quality control in construction of tunnels. Although most tunnels in Brazil are constructed with NATM method with explosives there is not much data or research on this topic today. Therefore, this work makes a contribution to the study of overbreak in road tunnels excavated by the NATM method with explosives, using for this purpose the case study of a tunnel for a road duplication of Rodovia dos Tamoios (SP-99), on the north coast of the state of São Paulo. The studies are developed from qualitative and quantitative analyses, the latter from a statistical point of view. The processes of excavation, control and measurement of the overbreak adopted for the tunnel under study are described, as well as the occurrence pattern of this phenomenon and its correlation with the geomechanical parameter RMR. The possible causes of overbreak are also discussed based on the theoretical conception and the obtained results.

**Keywords:** Overbreak; Tunnel; Excavation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistemas de suporte segundo a classificação RMR de Bienawski (1989). ...	24
Figura 2 – Sistemas de suporte segundo a classificação Q de Barton <i>et al.</i> (1974). ....	26
Figura 3 – Túnel esquemático com concreto projetado, cambotas e enfilagens. ....	28
Figura 4 – Parcializações típicas no método de escavação NATM. ....	29
Figura 5 – Comparação de taxas de avanço entre desmonte com explosivos e tuneladoras. ....	31
Figura 6 – Ciclo de escavação NATM com explosivos. ....	32
Figura 7 – Zonemanento do plano de fogo. ....	34
Figura 8 – Zonas afetadas em volta do furo carregado com explosivo. ....	36
Figura 9 – Zonas de danos geradas pela detonação do maciço com explosivos. ....	38
Figura 10 – Resumo das causas do <i>overbreak</i> . ....	41
Figura 11 – Levantamento da seção transversal com varredura a <i>laser</i> . ....	45
Figura 12 – Trechos da Nova Rodovia dos Tamoios. ....	49
Figura 13 – Relevo da área de implantação o Túnel 5. ....	51
Figura 14 – Classificação de Zonas Geológica-Geotécnicas. ....	53
Figura 15 – Sistema de classificação e suportes das seções tipo. ....	55
Figura 16 – Interface do <i>RStudio</i> . ....	59
Figura 17 – Vista frontal da meia seção com enfilagens. ....	60
Figura 18 – Perfuração sendo executada com jumbo de grande porte. ....	61
Figura 19 – Interior da cabine do Jumbo com vista do sistema TCAD. ....	62
Figura 20 – Plano de fogo para as Classes II e III do maciço. ....	65
Figura 21 – Plano de fogo para as Classe IV do maciço. ....	66
Figura 22 – Levantamento da seção transversal escavada. ....	69
Figura 23 – Modelagem das seções do túnel escavado sobrepostas às seções de projeto. ....	70
Figura 24 – Comparação entre seção transversal teórica e real. ....	71
Figura 25 – Histograma com os dados de <i>overbreak</i> (m <sup>2</sup> ) gerado no TP5. ....	73
Figura 26 – Distribuições de frequência simétrica e assimétricas. ....	74
Figura 27 – Histogramas com os dados amostrais de <i>overbreak</i> (m <sup>2</sup> ) gerado no TP5. .	76

Figura 28 – Recorte da tabela do Apêndice A, que elenca os dados amostrais de RMR e <i>overbreak</i> . .....	77
Figura 29 – Histogramas com os dados amostrais de RMR gerado no TP5.....	78
Figura 30 – Gráfico de dispersão das variáveis RMR (eixo x) e <i>overbreak</i> (eixo y).....	80
Figura 31 – Resultados da correlação de Pearson obtidos no software <i>RStudio</i> .....	81
Figura 32 – Intensidades de correlação negativa e positiva para o Coeficiente de Correlação de Pearson. ....	81
Figura 33 – Orientação da descontinuidade em que $\alpha$ é a direção do mergulho e $\beta$ o mergulho. ....	83
Figura 34 – Túnel paralelo à direção de mergulho (esquerda), e perpendicular à direção de mergulho (direita). ....	84
Figura 35 – Efeito a orientação nas descontinuidades na classificação RMR. ....	84

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes do maciço rochoso segundo o método NATM. ....	23
Quadro 2 – Parâmetros geológicos e construtivos que influenciam o <i>ovebreak</i> em túneis. ....	40
Quadro 3 – Métodos de medição de <i>overbreak</i> . ....	45
Quadro 4 – Classificação das pesquisas. ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extensão dos túneis do projeto da duplicação da Rodovia dos Tamoios – Trecho Serra. ....	50
Tabela 2 – Distribuição das seções tipo no TP5 ao longo do túnel. ....	63
Tabela 3 – Informações técnicas dos planos de fogo utilizados na escavação do TP5. ....	65
Tabela 4 – Carga de explosivos em função da profundidade dos furos. ....	66
Tabela 5 – Distância de <i>overbreak</i> na escavação do TP5. ....	67
Tabela 6 – Medidas estatísticas do <i>overbreak</i> no TP5. ....	72
Tabela 7 – Resultados do teste de normalidade para as variáveis <i>overbreak</i> e RMR. ...	79
Tabela 8 – Medidas estatísticas do <i>overbreak</i> em relação às áreas teóricas das seções transversais. ....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATO	Acompanhamento Técnico de Obra
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
<i>FIDIC</i>	<i>International Federation on Consulting Engineers</i>
ITA	<i>International Tunneling and Underground Space Association</i>
NATM	<i>New Austrian Tunnelling Method</i>
PG	Preço Global
PU	Preço Unitário
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
<i>RQD</i>	<i>Rock Quality Designation</i>
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TBM	<i>Tunnel Boring Machines</i>
TP5	Túnel Principal 5
ZG	Zona Geológico Geotécnica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....	18
1.3 OBJETIVOS.....	19
<b>1.3.1 Objetivo geral</b> .....	19
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b> .....	19
1.4 LIMITAÇÕES .....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS .....	20
2.2 MÉTODO NATM .....	21
<b>2.2.1 Classificação</b> .....	22
<b>2.2.2 Elementos de suporte e tratamentos</b> .....	26
<b>2.2.3 Escavação com explosivos</b> .....	30
2.2.3.1 <i>Ciclo de escavação</i> .....	31
2.2.3.2 <i>Plano de fogo</i> .....	34
2.2.3.3 <i>Mecanismos de ruptura da rocha</i> .....	35
2.2.3.4 <i>Danos ocasionados pelas detonações</i> .....	37
2.3 CAUSAS, COTROLE E MEDIÇÃO DO OVEBREAK. ....	39
<b>2.3.1 Causas do <i>overbreak</i></b> .....	40
<b>2.3.2 Técnicas de detonação controlada</b> .....	42
<b>2.3.3 Medição do <i>overbreak</i></b> .....	43
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	46
3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA .....	46
3.2 OBJETO DE ESTUDO .....	47
<b>3.2.1 Apresentação do empreendimento</b> .....	48
<b>3.2.2 Túnel 5</b> .....	50
3.2.2.1 <i>Caracterização geomecânica</i> .....	52

3.2.2.2 Seções tipo.....	56
3.3 COLETA DE DADOS .....	58
3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE .....	58
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>60</b>
4.1 CICLO DE ESCAVAÇÃO .....	60
4.2 CONTROLE DE <i>OVERBREAK</i> .....	64
<b>4.2.1 Planos de fogo e detonação controlada .....</b>	<b>64</b>
4.3 MEDIÇÃO DO <i>OVERBREAK</i> .....	67
<b>4.3.1 Considerações de projeto .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3.2 Levantamento das seções transversais .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.3 Quantificação do <i>overbreak</i>.....</b>	<b>69</b>
4.4 ANÁLISES DO <i>OVERBREAK</i> .....	71
<b>4.4.1 Análise exploratória dos dados.....</b>	<b>71</b>
<b>4.4.2 Correlação entre <i>overbreak</i> e RMR .....</b>	<b>75</b>
4.4.2.1 Seleção de amostras .....	75
4.4.2.2 Verificação de normalidade .....	78
4.4.2.3 Teste de Correlação de Pearson .....	79
<b>4.4.3 Avaliação das possíveis causas do <i>overbreak</i> .....</b>	<b>82</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	86
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>95</b>
ANEXO I: MAPA DO EMPREENDIMENTO DE DUPLICAÇÃO DA RODOVIA TAMOIOS (SP-99).....	95
ANEXO II: SEÇÕES TIPO S1 E S2.....	96
ANEXO III: <i>SIDE DRIFT</i> SEÇÃO TIPO S1 .....	98
ANEXO IV: SEÇÃO TIPO M1 .....	99
ANEXO V: SEÇÃO TIPO M2 .....	101
ANEXO VI: SEÇÃO TIPO R1 .....	103

ANEXO VII: SEÇÃO TIPO R2.....	104
ANEXO VIII: SEÇÃO TIPO R3.....	105
ANEXO IX: SEÇÃO TIPO R4.....	106
ANEXO X: PROJETO DE ENFILAGENS.....	107
ANEXO XI: PROJETO DE PREGAGENS.....	108
<b>APÊNDICES</b> .....	109
APÊNDICE A: AMOSTRA DE <i>OVERBREAK</i> E RMR.....	109



## 1 INTRODUÇÃO

Os fluxos da sociedade global e o adensamento dos centros urbanos demandam um crescente desenvolvimento das redes de comunicação, transporte e saneamento. Tal desenvolvimento tem criado a necessidade de uma maior ocupação do espaço subterrâneo, e, nesse contexto, os túneis têm se estabelecido como soluções inteligentes, pois são seguros e sustentáveis dentro do seu ciclo de vida.

Túneis são obras lineares, que conectam dois pontos para o transporte tanto de pessoas quanto de materiais, permitindo a passagem direta através de obstáculos, como elevações topográficas, corpos d'água (rios, mares, canais), ou obras já existentes (MARTINHO, 2012). Inicialmente desenvolvidos para o setor de mineração, mais tarde os túneis foram sendo aperfeiçoados para o transporte de pessoas e fluidos, dentro e fora das áreas urbanas. Podem, portanto, ser projetados para o tráfego de veículos e pedestres ou para condução de redes de água, esgoto, comunicação e energia.

Como elementos de mobilidade urbana, os túneis viabilizam a implantação de projetos em diferentes modais, com destaque para os sistemas rodoviários e metroviários. Nas cidades, os túneis rodoviários e metrô possibilitam uma menor ocupação superficial e, por consequência, menos desapropriações (PIRES *et al.*, 2016). Já fora das cidades, os túneis figuram como alternativa de desenvolvimento sustentável, pois promovem menores impactos ambientais tanto na sua fase de implantação como na de operação.

Túneis podem ser construídos por meio de diversos métodos e tecnologias, entre eles o *New Austrian Tunneling Method* (NATM), executado a partir de um ciclo de operações que tem por finalidade a escavação e, quando necessário, o suporte da abertura com concreto projetado e outros elementos de escoramento.

No método NATM é fundamental que a escavação não cause perturbações excessivas nas áreas circundantes à abertura, de modo que o maciço remanescente não seja fragilizado e possa ser utilizado como principal material estruturante (CAMPANHÃ e BOSCOV, 1994).

No entanto, apesar do avançado conhecimento da mecânica dos solos e das rochas, dos modelos geomecânicos cada vez mais precisos e da crescente automação dos equipamentos de escavação, a deterioração do maciço circundante é inevitável, especialmente quando a abertura do túnel é executada com explosivos.

Na escavação com explosivos duas situações podem ocorrer: o *overbreak*, que corresponde ao volume de rocha escavado em excesso em relação ao perfil de projeto, e o *underbreak*, que por outro lado corresponde ao volume de rocha não escavado interno ao gabarito de projeto (FODERÀ *et al.*, 2020).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O *overbreak* ocorre com mais frequência e em maiores volumes que o *underbreak*) produzindo efeitos negativos em relação à qualidade da escavação, devido às cavidades geradas no contorno do túnel; à segurança, devido aos riscos de instabilidade ocasionados pela deterioração do maciço; e aos custos da obra, dada a necessidade do preenchimento parcial ou total das cavidades com concreto projetado. Esses fatores, somados ao serviço de remoção do material extra escavado, contribuem para atrasos no avanço da escavacação e oneração da obra.

Diante dessas implicações, o assunto abordado nesse trabalho é particularmente importante para os túneis construídos no Brasil, já que a sua maioria é executada pelo método NATM. No entanto, atualmente no âmbito nacional não há muitos dados ou investigações sobre esse fenômeno em túneis executados por esse método.

Desse modo, é fundamental a realização de estudos que busquem caracterizar o *overbreak* e criar estratégias para minimizar os seus impactos, como a medição e o controle das detonações.

## 1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Os assuntos desse trabalho estão organizados do seguinte modo:

- Capítulo 1: refere-se a esta introdução;
- Capítulo 2: contém a revisão bibliográfica da pesquisa, que inclui as definições e características do método construtivo NATM com explosivos, e os aspectos do *overbreak* em túneis no que tange à sua medição e controle;
- Capítulo 3: descreve a metodologia de pesquisa, apresenta o estudo de caso e suas delimitações;
- Capítulo 4: apresenta o resultado das análises do estudo de caso, incluindo os dados obtidos com o *software RStudio*;
- Capítulo 5: aponta as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é oferecer uma contribuição ao estudo de *overbreak*, no que se refere à caracterização do fenômeno e aos métodos de medição e controle, a partir do estudo de caso do Túnel Principal 5 da obra de duplicação da Rodovia dos Tamoios (SP-99).

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral supracitado, foram listados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as características do método NATM com explosivos;
- Identificar os mecanismos atuantes na produção de *overbreak* em túneis escavados pelo método NATM com explosivos;
- Identificar os métodos de controle e medição de *overbreak* em túneis;
- Analisar o ciclo de escavação do túnel em estudo;

- Analisar as técnicas de controle e medição de *overbreak* aplicadas no túnel em estudo;
- Analisar a ocorrência de *overbreak* a partir de ferramentas estatísticas;
- Analisar a correlação entre *overbreak* e o parâmetro geomecânico RMR;
- Discutir as possíveis causas do *overbreak* gerado no túnel em estudo, a partir das análises estatísticas e do conhecimento teórico.

#### 1.4 LIMITAÇÕES

O trabalho desenvolvido possui limitações quanto à análise estatística, tendo em vista que a amostra dos dados é pequena e não aleatória.

Ademais, considerando que a pesquisa é desenvolvida do ponto de vista de um estudo de caso único, os resultados das análises são limitados às características que o compõe, não sendo cabível a extrapolação literal das conclusões para outros casos de túneis escavados pelo método NATM com explosivos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS

Em projetos de túneis, a escolha do método construtivo a ser empregado perpassa um conjunto de critérios técnicos, econômicos e de segurança, entre eles o perfil do terreno atravessado (rocha ou solo), o comprimento e a cobertura do túnel, a geometria da seção transversal, a localização da obra etc.

Atualmente, um dos métodos mais difundidos no mundo é o NATM, conhecido também por método convencional ou método sequencial (nesse trabalho é utilizada apenas a nomenclatura NATM), ao lado do método mecanizado com tuneladoras, internacionalmente denominadas de TBMs (*Tunnel Boring Machines*).

No Brasil os túneis têm sido executados pelo método NATM, pois na maior parte das vezes as suas pequenas extensões (1 a 2 km) não justificam a mobilização de equipamentos para a execução mecanizada com TBM (MURAKAMI, 2001).

Mesmo para alguns túneis brasileiros de grandes extensões opta-se por utilizar o NATM, como é o caso do Túnel Marcello Alencar no estado do Rio de Janeiro (3395 metros), do Túnel Irineu Meireles (3146 metros), localizado na Rodovia dos Imigrantes no estado de São Paulo, e dos túneis da Nova Tamoios, também localizados em São Paulo, os quais vêm sendo construídos desde 2015 – dois deles serão os dois maiores túneis rodoviários do Brasil, com aproximadamente 5555 m e 3700 metros.

## 2.2 MÉTODO NATM

O NATM (*New Austrian Tunneling Method*) é uma metodologia de construção de túneis baseada na observação e no controle de deformações do maciço escavado pela instalação progressiva de concreto projetado e outros tipos de suportes (KOLYMBAS, 2013).

Desenvolvido na Áustria no fim da década de 1950, o NATM tem como princípio básico a estabilização pelo alívio de tensões no maciço, o qual deixa de atuar somente como carga sobre o revestimento do túnel e passa a colaborar com a resistência da sua estrutura (CAMPANHÃ e BOSCOV, 1994). Isto é, a escavação provoca uma alteração das tensões no maciço circundante, modificando o seu estado de tensões inicial. O reequilíbrio é obtido por meio de um rearranjo interno dessas tensões induzidas, com o auxílio de elementos de suporte quando necessário.

Segundo Hemphill (2013), a caracterização e a descrição das condições do maciço diante da escavação são determinadas a partir de um sistema de classificação, em função do qual são projetados os conjuntos de suportes para cada uma das condições previstas. Por meio do monitoramento constante, observa-se se o comportamento real do maciço condiz com o esperado, e caso as deformações não sejam compatíveis com o conjunto de suportes planejado, outra alternativa passa a ser implementada.

A identificação de deslocamentos excessivos ou outros agravantes, como níveis de água subterrâneos, demanda medidas de interferência que prolongam o ciclo de

escavação e diminuem as taxas de avanço, intrinsicamente baixas se comparadas ao TBM.

Por outro lado, as interferências ocasionalmente necessárias demonstram a adaptabilidade do NATM frente a condições geológicas adversas, versatilidade que também se justifica na variedade de seções transversais que são viabilizadas pelo método, bem como na possibilidade de reutilização dos equipamentos, o que não é possível no caso das tuneladoras, as quais são desenvolvidas exclusivamente para uma única obra (KOLYMBAS, 2013).

### **2.2.1 Classificação**

No NATM a caracterização preliminar do maciço ocorre por meio de uma classificação qualitativa, baseada no quadro geológico-geomecânico revelado nas investigações de campo. Tal classificação é feita conforme o grau de alteração do material e suas condições de coesão e fraturamento (Quadro 1).

Quadro 1 – Classes do maciço rochoso segundo o método NATM.

<b>CLASSIFICAÇÃO NATM</b>	
Classe I	Maciços de rocha sã, sem alterações, coesos e autoportantes, com ausência de planos (famílias) de fraturas ou diáclases, que, no entanto, poderão ocorrer de forma isolada.
Classe II	Maciços de rocha sã, sem alterações, coesos e autoportantes, porém já apresentando pelo menos um plano (família) de diáclases ou fraturas.
Classe III	Maciços de rocha sã, fraturada, ainda com um certo grau de auto-suporte e coesão, porém entrecortado por planos (famílias) de fraturas orientados segundo diferentes direções e mergulhos, podendo ocorrer faixas milimétricas a centimétricas de alterações nessas fraturas, associadas a maiores concentrações de água subterrânea.
Classe IV	Maciços de rocha mais fraturada e apresentando faixas intercaladas de rocha alterada, com coesão mais reduzida, auto-suporte e estabilidade temporários, quadro que pode se agravar na presença de água subterrânea.
Classe V	Maciços formados por solo de alteração (saprólitos) ou rocha totalmente alterada, com pouca ou nenhuma coesão, ausência de auto-suporte e estabilidade quando escavados; na presença de água subterrânea esses maciços passarão a ser classificados como de Classe VI.

Fonte: DNIT (2017). Elaboração: Autora.

Ao longo dos anos, novos sistemas de classificação foram criados ou aperfeiçoados, sendo utilizados na caracterização dos maciços juntamente com o sistema NATM, como é o caso do sistema RMR (*Rock Mass Rating*), proposto por Bienawski em 1973 e revisado em 1989, e do sistema Q, proposto por Barton *et al.* em 1974, com versão atualizada em 1994.

Estes sistemas atribuem valores aos parâmetros geomecânicos do maciço, indicando um conjunto de suportes para cada intervalo de valores definidos; ou seja, são sistemas quantitativos, mais completos e rigorosos.

Segundo Hemphill (2013), o sistema RMR atribui uma pontuação crescente a seis diferentes parâmetros, sendo eles:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- RQD (*Rock Quality Designation*)
- Condições hidrogeológicas;

- Espaçamento das fraturas;
- Condições das descontinuidades;
- Orientação das descontinuidades.

Somados, os parâmetros determinam o valor do RMR dentro de um intervalo de 0 a 100, o qual corresponderá a uma das cinco classes do sistema. Para cada uma das classes, são definidos sistemas de suporte e passo de avanço da escavação para certo diâmetro do túnel. Para os elementos da Figura 1, o diâmetro é de 10 m.

Figura 1 – Sistemas de suporte segundo a classificação RMR de Bienawski (1989).

Classe do Maciço Rochoso	Classe Geomecânica RMR	Escavação	Suporte		
			Ancoragens	Concreto Projetado	Cambotas
I	81 a 100	Seção total; 3 m de avanço	Geralmente não requer suporte com a exceção de ancoragens ocasionais		
II	61 a 80	Seção total; 1 a 1,5 m de avanço; suporte completo a 20 m da frente	Ancoragens com 3 m de comprimento, espaçadas de 2,5 m, ocasionalmente com malha em certas zonas do teto	50 mm no teto quando necessário	Nenhuma
III	41 a 60	Seção parcial (frente e rebaixo); 1,5 a 3 m de avanço; início do suporte a cada fogo; suporte completo a 10 m	Ancoragens sistemáticas com 4 m de comprimento espaçadas de 2 m nas paredes e teto, com malha no teto	50 a 100 mm no teto, 30 mm nas paredes	Nenhuma
IV	21 a 40	Seção parcial (frente e rebaixo); 1 a 1,5 m de avanço; instalação do suporte concomitantemente com a escavação	Ancoragens sistemáticas com 4 a 5 m de comprimento, espaçadas de 1 a 1,5 m com malha no teto e paredes	100 a 200 mm no teto, 100 mm nas paredes	Cambotas leves espaçadas de 1,5 m
V	< 20	Seções múltiplas; 0,5 a 1,5 m de avanço; instalação do suporte concomitantemente com a escavação; concreto projetado logo após o fogo	Ancoragens sistemáticas com 5 a 6 m de comprimento, espaçadas de 1 a 1,5 m com malha no teto e paredes; ancoragem na soleira	150 a 250 mm no teto, 150 mm nas paredes	Cambotas médias a pesadas espaçadas de 0,75m; fechamento na soleira

Fonte: DNIT, 2017.

O sistema Q, por sua vez, classifica um maciço a partir do resultado de uma expressão matemática (Equação 1) composta por seis parâmetros geomecânicos (Hemphill, 2013).



$$Q = \frac{RQD J_r J_w}{J_n J_a SRF} \quad (1)$$

Onde: RQD = Índice de Qualidade da Rocha (*Rock Quality Designation*)

$J_n$  = Índice da família das juntas

$J_r$  = Índice da rugosidade das juntas

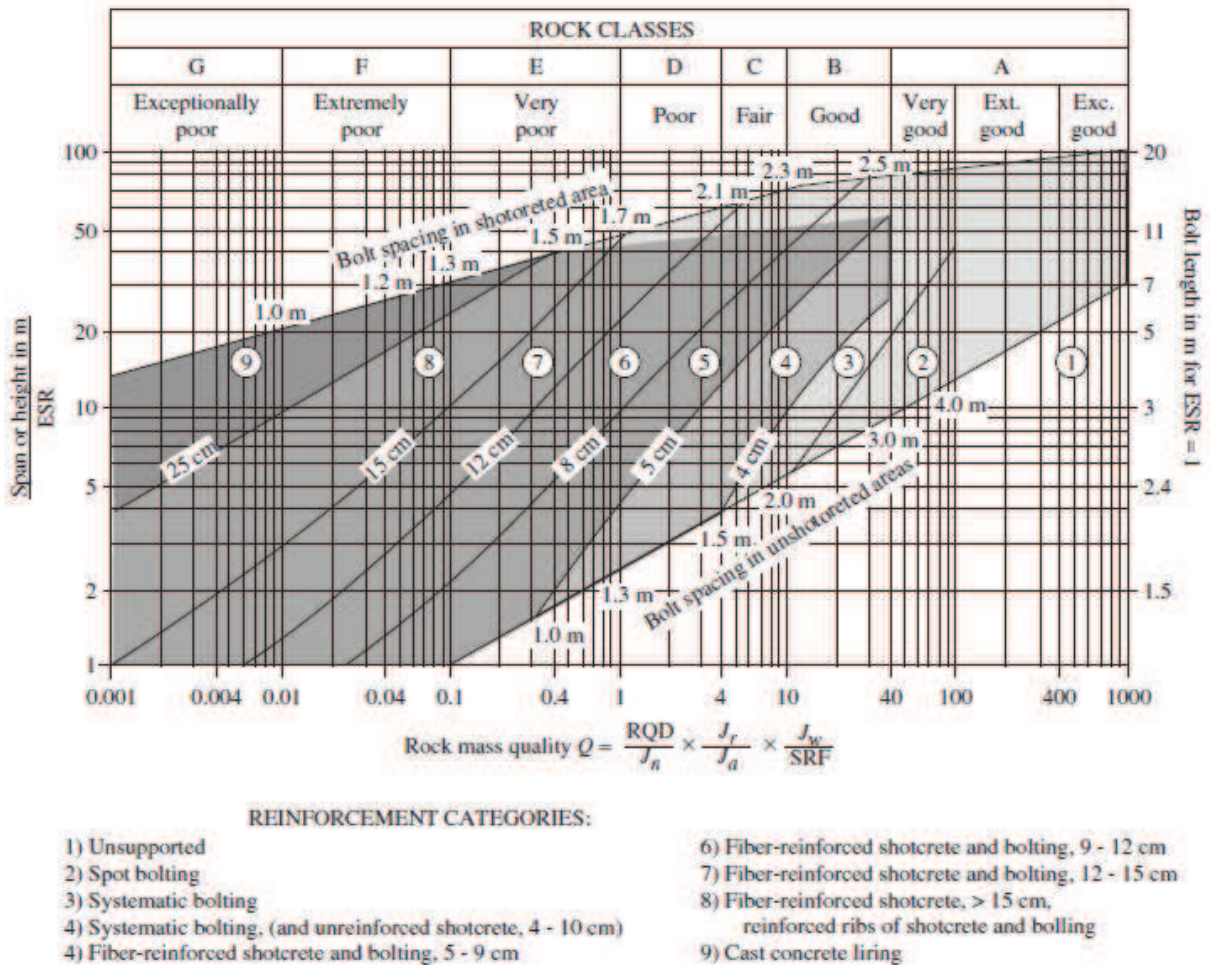
$J_a$  = Índice de alteração das descontinuidades

$J_w$  = Índice das condições hidrogeológicas

$SRF$  = Fator de redução de tensões

O valor obtido da Equação (1) é então associado a uma das nove classes do sistema Q, exibidas na Figura 2.

Figura 2 – Sistemas de suporte segundo a classificação Q de Barton *et al.* (1974).



Fonte: Hemphill (2013, apud GRIMSTAD and BARTON, 1993).

Nas classificações supracitadas os parâmetros geológicos obtidos em campo são associados a valores numéricos definidos em tabelas, que podem ser encontradas nas respectivas fontes bibliográficas.

## 2.2.2 Elementos de suporte e tratamentos

O procedimento técnico do NATM é composto sumariamente pela escavação, monitoramento e aplicação de camadas de suporte primário e secundário, progressivamente ao avanço da frente de escavação.

Por definição, denomina-se suporte primário a estrutura que garante a estabilidade da abertura temporariamente, até que o suporte secundário seja aplicado para estabilizar a abertura de forma permanente, obedecendo aos fatores de segurança normatizados (COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, 2010).

O suporte primário é relativamente flexível, e permite a redistribuição das tensões ao longo do perímetro do túnel e o equilíbrio dos carregamentos potenciais, enquanto garante estabilidade suficiente para a segurança das pessoas e equipamentos envolvidos na operação (CAMPANHÃ e BOSCOV, 1994).

Dependendo das condições atuantes e do comportamento que o maciço apresenta, o suporte primário pode constituir-se apenas de concreto projetado, ou de uma combinação de concreto projetado e um ou mais elementos, como cambotas, tirantes, chumbadores e telas metálicas.

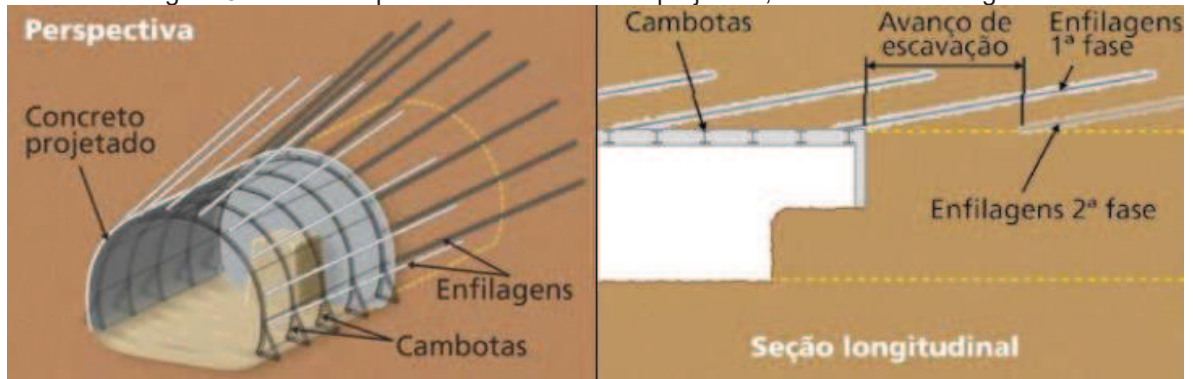
O suporte secundário, também denominado suporte definitivo, é o conjunto de elementos que irá garantir a resistência mínima de projeto e a estabilidade a longo prazo. Ele pode ser composto por concreto moldado, concreto projetado ou uma combinação de concreto projetado e outros elementos estruturais, assim como no suporte primário. A determinação desse conjunto de suportes, tanto para a primeira quanto para a segunda camada, dependerá das características do maciço e da classificação atribuída a ele.

Entre a escavação e a aplicação do suporte primário há uma janela de tempo em que o túnel deve manter-se coeso e estável, denominada de tempo de auto-sustentação (*stand-up time*). Cabe mencionar, inclusive, que alguns túneis escavados em rocha podem apresentar tempo de auto-sustentação permanente, não exigindo instalação de suportes; nesses casos, a superfície eventualmente recebe uma camada de concreto projetado para que a rocha não fique aparente.

Quando o maciço circundante não apresenta tempo de auto-sustentação suficiente para a aplicação do suporte primário, ele deve receber um tratamento prévio à escavação, como injeções de cimento, enfilagens, *jetgrouting*, agulhamento, congelamento ou rebaixamento do lençol freático (CAMPANHÃ e BOSCOV, 1994).

O esquema da Figura 3 apresenta a seção longitudinal de um túnel com enfilagens como alternativa de tratamento do maciço, e concreto projetado e cambotas como suporte.

Figura 3 – Túnel esquemático com concreto projetado, cambotas e enfilagens.



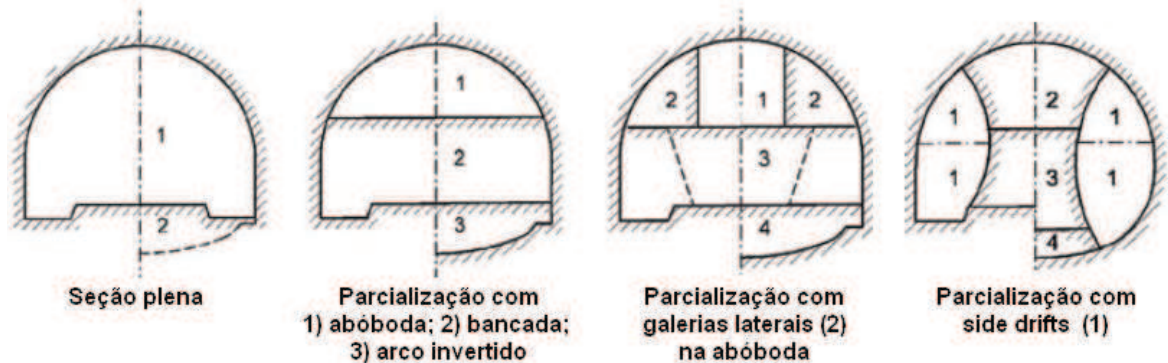
Fonte: Solotrat (2018).

Os tratamentos visam melhorar a estabilidade do maciço, a qual depende, entre outros fatores, das suas características geomecânicas, das dimensões da seção transversal e do método construtivo, sendo fortemente influenciada pelas condições de drenagem, especialmente em solos residuais e arenosos (COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, 2010).

Outra forma de garantir a estabilidade da frente de avanço é a parcialização da frente de escavação. Segundo o Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP, 2005), a parcialização, ou faseamento, é usualmente aplicada na construção de túneis em maciços de rochas brandas ou de solo.

De acordo com a *International Tunneling and Underground Space Association* (ITA, 2009), a parcialização pode ser executada de diversas formas, com bancada, arco invertido, *side drifts*, túnel piloto etc. A Figura 4 ilustra alguns exemplos.

Figura 4 – Parcializações típicas no método de escavação NATM.



Fonte: ITA (2009). Adaptado.

A adoção de processos de estabilização depende da viabilidade técnica, do prazo de execução e dos custos envolvidos. Soluções de menor custo podem não ser viáveis caso o prazo da sua execução seja incompatível com o cronograma da obra, por exemplo (CAMPANHÃ e BOSCOV, 1994).

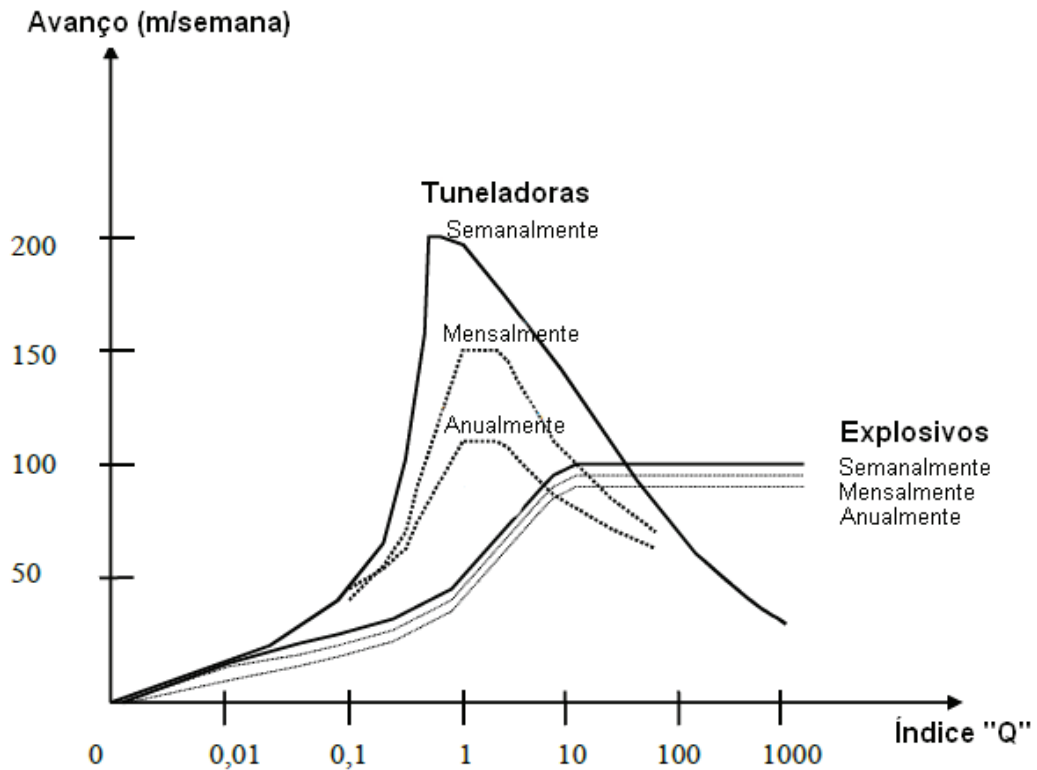
### **2.2.3 Escavação com explosivos**

No NATM a escavação do maciço rochoso pode ser realizada com máquinas de escavação pontual (escavadeiras, escarificadoras, rompedores hidráulicos etc.) ou com explosivos, quando é denominada de escavação a fogo (*Drill and Blast*) (JIMENO, 1997). Segundo a ITA (2009), ambos os métodos podem ser usados em um mesmo projeto se as condições do maciço forem muito heterogêneas.

Na escavação com explosivos o mecanismo de desmonte do maciço está associado ao fraturamento do material escavado, enquanto que as máquinas pontuais são caracterizadas pelo avanço por corte mecânico. Nesse sentido, as escarificadoras são usualmente empregadas em rochas brandas, que são pouco abrasivas e têm baixa tenacidade e fraturamento, enquanto os explosivos são mais usados em seções de rochas duras (BASTOS, 1998). De acordo com Chapman *et al.* (2010) e Kolymbas (2013), o desmonte com explosivos é aplicável para todos os tipos de rochas, desde as mais duras (granito, basalto, gnaisse, quartzo) até as rochas brandas (calcário, argila, etc.). Além disso, exige baixo investimento inicial, e pode ser utilizada para escavar túneis de diferentes formas e tamanhos (VERMA *et al.*, 2017).

No que se refere às taxas de avanço, o método com explosivos pode ser mais eficiente em comparação ao método com tuneladoras em alguns casos, como exhibe a Figura 5, que dá uma ordem de grandeza a esse comparativo.

Figura 5 – Comparação de taxas de avanço entre desmonte com explosivos e tuneladoras.



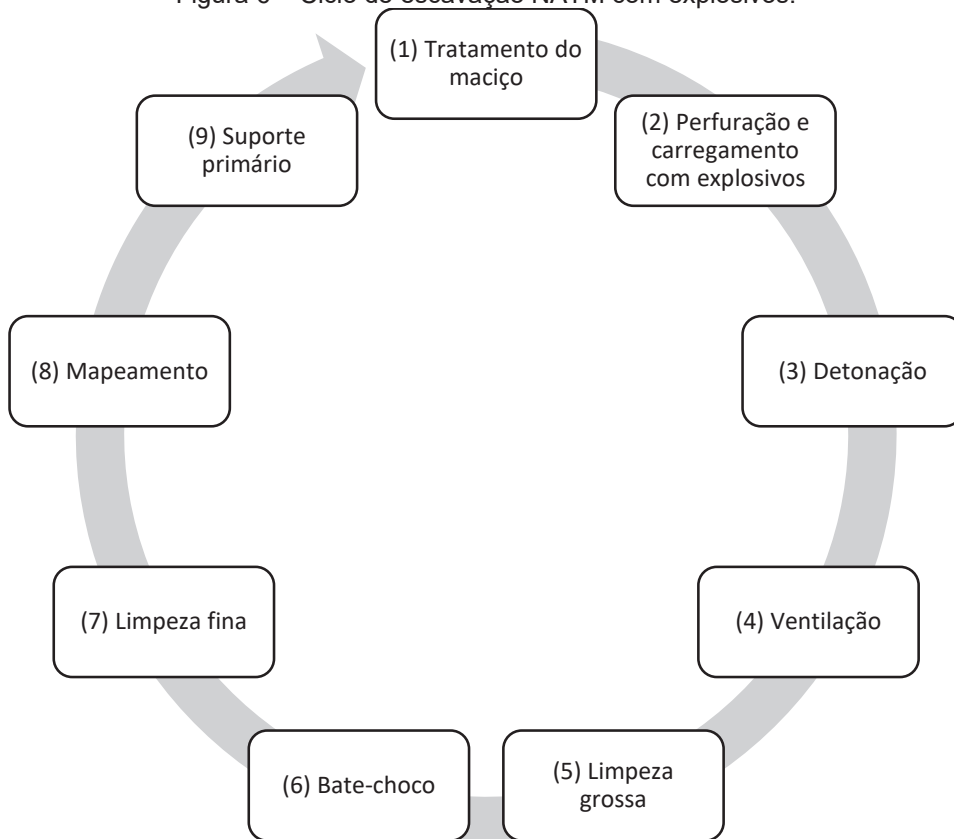
Fonte: Barton (1999) apud Nord (2006). Traduzido.

Da observação do gráfico da Figura 5, elaborado por Barton (1999) após a análise de diversos estudos de caso, infere-se que túneis escavados com explosivos em maciços classificados como bons ou muito bons apresentam maior taxa de avanço, se comparados aos túneis escavados com tuneladoras.

### 2.2.3.1 Ciclo de escavação

Em relação ao procedimento técnico, a escavação com explosivos é realizada por meio de um ciclo de operações, as quais são exibidas na Figura 6.

Figura 6 – Ciclo de escavação NATM com explosivos.



Fonte: Santos (2017). Adaptado.



Na etapa (1) são executados tratamentos para estabilização do maciço. Na etapa (2) é realizada a perfuração com equipamentos automatizados denominados Jumbos, compostos por “braços” equipados com perfuratrizes hidráulicas. Em seguida os explosivos são inseridos nos furos e conectados com os acessórios de detonação (temporizadores e circuito elétrico).

Após a evacuação da frente de trabalho, os explosivos são acionados e a detonação ocorre efetivamente (etapa 3), sendo os gases e poeiras gerados extraídos por ventilação mecanizada (etapa 4). Na sequência os escombros resultantes da detonação são carregados e transportados para fora do túnel (etapa 5).

A fim de evitar deslocamentos tardios de rocha realiza-se o abatimento de choco ou bate-choco (etapa 6), um processo mecânico ou manual de rompimento de placas de rocha instáveis na frente escavada. Essa operação é necessária para garantir a segurança dos colaboradores e dos equipamentos, e para assegurar que o suporte do túnel seja aplicado sobre um maciço coeso, ou seja, sem blocos soltos no seu entorno. Os escombros resultantes do bate-choco também são carregados e transportados para fora do túnel (etapa 7).

Na etapa (8) é realizado o monitoramento das deformações pela equipe de Acompanhamento Técnico de Obra (ATO), que também faz o mapeamento do maciço. No mapeamento são identificadas as características geológicas da frente escavada, atribuindo-lhe uma classificação de acordo com um método de classificação pré-determinado. A classificação irá definir quais os elementos de suporte serão executados no suporte primário.

Na etapa (9) o suporte primário é executado, atuando em complementação à capacidade autoportante do maciço. A interação solo-estrutura continua é monitorada com instrumentação específica, a fim de verificar se as deformações do túnel estão seguindo os valores previstos ou não.

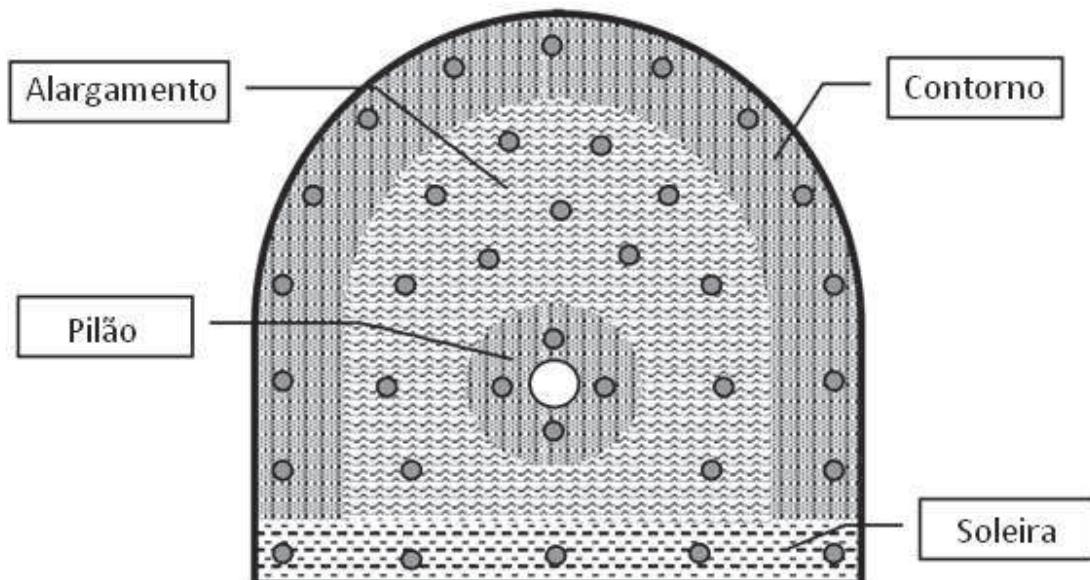
O tempo decorrido entre a primeira e a última etapa determina o tempo do ciclo de escavação, e a extensão escavada nesse tempo determina o chamado passo de avanço. Ademais, a repetição dos ciclos em um dia determina a taxa de avanço da escavação, definida em metros/dia.

### 2.2.3.2 Plano de fogo

O plano de fogo é o documento guia da fase de escavação com explosivos. É nele que estão definidos posição, diâmetro e comprimento dos furos, bem como quantidade, distribuição e sequência de detonação da carga explosiva em uma determinada seção transversal. Segundo Geraldi (2011), o plano de fogo é projetado em função de três fatores: os condicionantes geológicos do maciço rochoso, a área e da geometria da seção escavada, e o avanço pretendido por detonação.

Explosivos fragmentam o maciço com máxima eficiência se existirem superfícies livres aproximadamente paralelas ao eixo dos furos carregados, devido ao mecanismo de reflexão das ondas de choque. No entanto, na escavação de túneis subterrâneos a única superfície livre disponível tende a estar perpendicular aos furos, sendo necessário “fabricar” uma nova superfície livre. Esse objetivo é alcançado a partir do zoneamento da frente de escavação, como mostra a Figura 7. As zonas do plano de fogo são: pilão, alargamento, contorno e soleira.

Figura 7 – Zonamento do plano de fogo.



Fonte: Bastos (1998). Adaptado.

O pilão é formado por um ou mais furos descarregados (furos de alívio), de grande diâmetro, que são rodeados por furos carregados de menor diâmetro. Segundo Geraldi (2011), a detonação dos furos do pilão é executada utilizando-se os tempos iniciais da série de retardos, criando uma abertura ou cavidade na frente de escavação do túnel, a qual terá a sua área gradativamente ampliada pela detonação sequencial dos demais furos distribuídos na seção.

Os pilões podem ter diversos arranjos, sendo de modo geral classificados em: pilões de furos paralelos (*burn cut*) e pilões de furos inclinados em relação ao eixo longitudinal, como o pilão em V, pilão em leque etc (GERALDI, 2011).

Dadas as condicionantes impostas pelos equipamentos de perfuração, os furos de contorno devem ser executados com certa divergência em relação ao eixo longitudinal do túnel, com orientação voltada para o interior do maciço (formato cônico), a fim de evitar o afunilamento da seção escavada e manter espaço para a perfuração do próximo avanço (MARTINHO, 2012). Como consequência, a seção resultante escavada sempre será maior que a seção teórica preconizada em projeto.

### 2.2.3.3 Mecanismos de ruptura da rocha

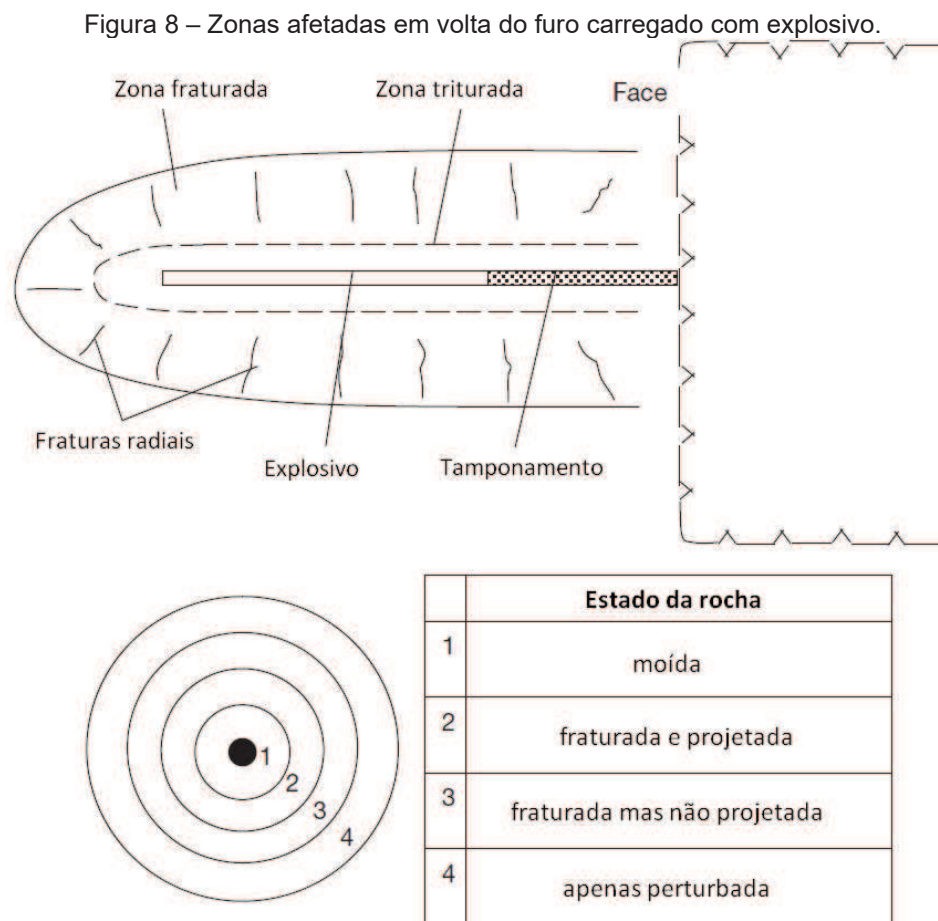
No método de escavação a fogo, a ação dos explosivos transforma o maciço rochoso em fragmentos menores de rocha, mais fáceis de serem removidos e transportados para fora do túnel. Esse processo ocorre devido a dois principais mecanismos, que atuam em função dos princípios de resistência à tração e à compressão da rocha: ruptura radial, gerada pela reflexão das ondas de choque, e rompimento por flexão, gerada pela expansão dos gases (MARTINHO, 2012; HEMPHILL, 2013).

Ao serem detonados, os explosivos se decompõem muito rapidamente, liberando grandes quantidades de energia na forma de calor e gases, que se expandem em alta velocidade (SATICI, 2000). A liberação dessa energia provoca uma variação abrupta da pressão no meio onde ocorre, formando camadas de ar comprimido radiais ao furo carregado, denominadas de ondas de choque (ondas de compressão).

Apesar das rochas serem muito mais resistentes a esforços de compressão do que de tração (HEMPHILL, 2013), nos instantes iniciais da detonação a pressão transmitida pelas ondas de choque é tão grande que ultrapassa a resistência à compressão da rocha que compõe as paredes do furo, triturando-a.

Em seguida, as ondas de choque se propagam e criam fissuras radiais aos furos, em virtude dos componentes tangenciais de tração que surgem na frente de onda (MARTINHO, 2012). Esses efeitos são ilustrados na Figura 8.

Ao atingirem uma superfície livre ou descontinuidades, as ondas de compressão são refletidas e transformadas em ondas de tração, causando então a fraturamento do maciço (DICK *et al.*, 1987).



Fonte: Chapman *et al.* (2010). Adaptado.

Imediatamente após a propagação das ondas de choque, o gás criado pela reação química da explosão se expande, prolongando as novas fraturas ou as fraturas já existentes. Adicionalmente, a pressão do gás leva à ruptura da rocha por flexão em uma direção perpendicular ao eixo dos furos, como em uma viga duplamente apoiada, ocasionando a projeção dos fragmentos (HEMPHILL, 2013).

#### 2.2.3.4 Danos ocasionados pelas detonações

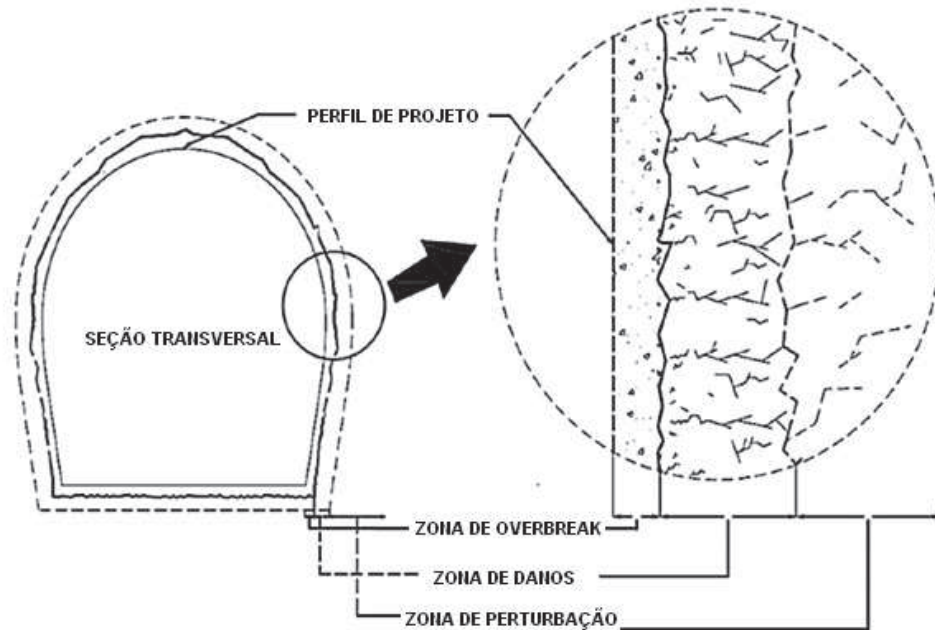
Segundo Bastos (1998), entre as ações prejudiciais desencadeadas pelo desmonte de rocha com explosivos, que incluem vibrações, ruídos, gases, poeiras e projeção de material, está a deterioração do maciço remanescente.

Tal deterioração ocorre devido à ação das ondas de choque geradas nas explosões, pois, conforme aponta Mohammad *et al.* (2015), mais de 85% da energia liberada na detonação não é usada na fragmentação e arranque da rocha para fora do maciço, propagando-se por muitos metros além do perímetro de contorno do túnel.

As ondas de choque modificam as propriedades do maciço circundante ao promover o surgimento de novas fraturas e a expansão de fraturas existentes, propiciando problemas de estabilidade que originalmente não existiam e alterando seu estado de tensões de maneira significativa e até irreversível (VAN ELDERT, 2017).

De acordo com Verma *et al.* (2017), os danos induzidos pelas explosões em torno de uma abertura subterrânea são divididos em três zonas, ilustrados na Figura 9: Zona de *overbreak*, Zona de danos e Zona de perturbação.

Figura 9 – Zonas de danos geradas pela detonação do maciço com explosivos.



Fonte: Verma *et al.* (2017). Traduzido.

A Zona de danos é caracterizada por uma rede de microfraturas, decorrentes da redistribuição de tensões gerada pelo processo de escavação. Nessa zona, as alterações que ocorrem nas propriedades mecânicas e físicas do maciço são irreversíveis. Já a Zona de perturbação, localizada imediatamente após a Zona de Danos, contém microfraturas dispersas, que geram alterações insignificantes e reversíveis nas propriedades do maciço.

A Zona de *overbreak*, por sua vez, é a zona mais alterada pelo processo de escavação, apresentando tendências à instabilidade. Essa zona se situa adjacente à linha de projeto, e é caracterizada por macro fraturas com deslocamentos de blocos e de fragmentos de rocha.

Os deslocamentos que ocorrem na Zona de *Overbreak* criam cavidades nas paredes do túnel, que posteriormente devem ser parcialmente preenchidas com concreto projetado para a obtenção de uma superfície menos irregular. O preenchimento total dessas cavidades é necessário apenas nos casos de *overbreak* profundo e anguloso (cantos de “raio vivo”), em que ocorre uma grande concentração de tensões; nesses casos, o preenchimento total tem como objetivo a recomposição da

geometria da seção transversal e a manutenção do efeito “casca” do suporte, o qual garante a distribuição uniforme do carregamento proveniente do maciço.

O volume adicional de concreto projetado, o transporte do material deslocado, os suportes adicionais eventualmente necessários, e o consequente atraso no avanço da escavação geram custos extras, muitas vezes não previstos. De acordo com Verma *et al.* (2017) e Mandal e Singh (2008), em alguns casos os custos de projeto aumentaram em 15% por causa do *overbreak*. Não obstante, a Zona de *Overbreak* pode oferecer potenciais riscos aos indivíduos e equipamentos envolvidos na escavação, visto que a deterioração do maciço influencia diretamente no tempo de auto-sustentação do túnel.

No âmbito das pesquisas, diversos autores estudam meios para medir a extensão das zonas de deterioração do maciço, minimizar os seus impactos ou prever seu modo de ocorrência. No entanto, a maioria desses esforços tem sido direcionada especialmente para a Zona de *Overbreak*, dados os riscos econômicos e de segurança mencionados.

### 2.3 CAUSAS, COTROLE E MEDIÇÃO DO OVEBREAK

*Overbreak* é o termo em inglês para sobreescavação, que por definição corresponde à quantidade de rocha escavada além do perímetro de escavação previsto em projeto (FHWA, 2009).

Apesar dos avanços tecnológicos em explosivos, máquinas perfuratrizes e dispositivos de detonação, o *overbreak* é inevitável e permanece como um dos principais desafios na construção de túneis, variando de 5 a 30% em volume segundo Verma *et al.* (2017).

Devido aos efeitos negativos tanto financeiros como de qualidade e segurança, minimizar o *overbreak* é um dos principais objetivos na escavação com explosivos. Sendo assim, é essencial que sejam investigadas suas causas e estabelecidos critérios de controle e medição desse fenômeno.

### 2.3.1 Causas do overbreak

As causas do *overbreak* podem ser classificadas em dois grupos: parâmetros geológicos e parâmetros construtivos (JANG e TOPAL, 2013; MOTTAHEDI *et al.*, 2017; MOHAMMADI *et al.*, 2017; DARAEI e ZALE, 2018.).

Os parâmetros geológicos são fixos, isto é, não podem ser alterados, tendo influência significativa na magnitude do *overbreak*. Os parâmetros construtivos (ou técnicos), por sua vez, compreendem a metodologia construtiva, o plano de fogo e os equipamentos utilizados, sendo, portanto, controláveis. Alguns parâmetros geológicos e construtivos são elencados no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros geológicos e construtivos que influenciam o *overbreak* em túneis.

<b>Parâmetros geológicos</b>	<b>Parâmetros construtivos</b>
Resistência da rocha intacta	Diâmetro e comprimento das perfurações
RQD ( <i>Rock Quality Designation</i> )	Desvio das perfurações
Influência da água	Razão de carga (kg/m <sup>3</sup> )
Espaçamento das descontinuidades	Tipos de explosivos
Condições das descontinuidades	Espaçamento dos explosivos no perímetro de contorno
Orientação das descontinuidades	Carga dos explosivos no perímetro de contorno
Tensões atuantes no maciço	Tempo de espera

Fonte: Ibarra *et al.* (1996). Elaboração: Autora.

Os parâmetros geológicos podem ser considerados em conjunto, a partir das classificações geomecânicas. A classificação RMR, por exemplo, inclui os seis primeiros parâmetros listados no Quadro 2.

O desvio das perfurações corresponde aos desvios verticais e horizontais previstos pela condição de conicidade da perfuração, bem como os desvios não previstos, resultantes de imperícias de execução. A razão de carga é a relação entre a carga de explosivos e o volume de rocha a ser detonada (kg/m<sup>3</sup>), e o tempo de espera (*delays*), corresponde ao intervalo de tempo entre as detonações sucessivas.

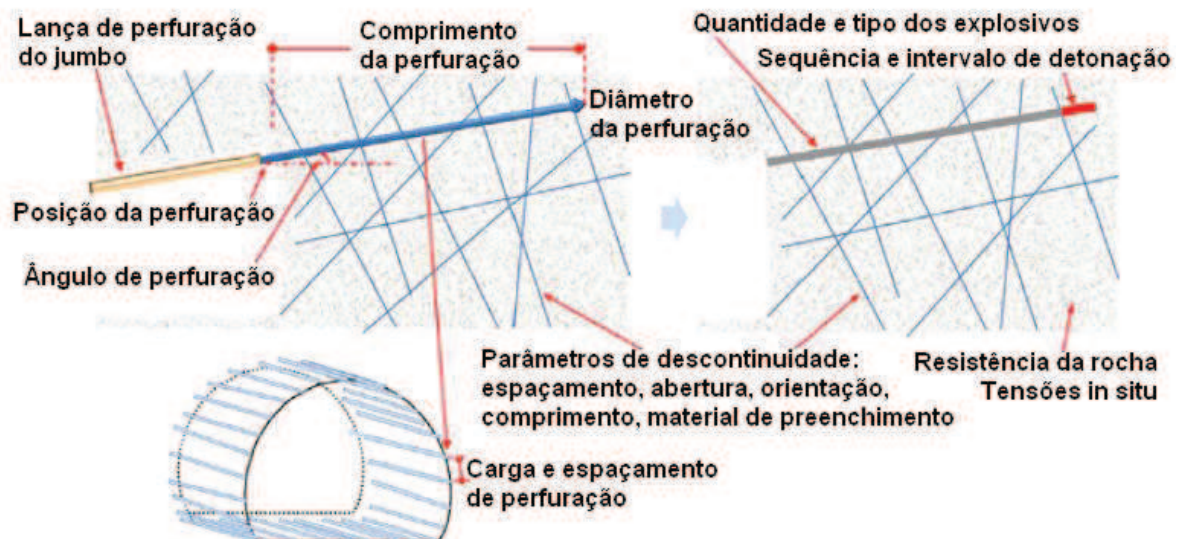
No que se refere ao *overbreak* técnico, cabe mencionar a influência da qualidade dos equipamentos, dos materiais, da técnica e experiência associadas à



mão-de-obra. Esses parâmetros são muito difíceis de serem quantificados, mas devem ser analisados, pois podem ter relevância significativa nos resultados.

Além dos parâmetros controláveis e não controláveis, outros autores também mencionam os parâmetros semi-controláveis, associados à geometria da abertura escavada, como forma e área da seção transversal (CHAKRABORTY *et al.*, 2003; MOTTAHEDI *et al.*, 2017; MOHAMMADI *et al.* 2017). A Figura 10 apresenta um resumo das causas do *overbreak* supracitadas.

Figura 10 – Resumo das causas do *overbreak*.



Fonte: Mottahedi *et al.* (2017). Traduzido.

Ademais, o *overbreak* não é causado apenas por parâmetros geológicos, construtivos e geométricos, mas por uma soma desses fatores, que é particular de uma obra para outra. Ou seja, mesmo que sejam aplicadas as mesmas metodologias construtivas e os mesmos equipamentos em túneis de mesma geometria, com condições geológicas parecidas, os resultados de *overbreak* não serão iguais.

### 2.3.2 Técnicas de detonação controlada

Tanto nas escavações a céu aberto quanto nas escavações subterrâneas são usadas técnicas especiais de detonação que reduzem os danos no maciço e por consequência o volume de *overbreak*, conferindo maior uniformidade e acabamento à superfície escavada.

Essas técnicas são denominadas técnicas de detonação controlada, desmonte escultural ou técnicas de detonação de contorno, pois todas elas são voltadas à detonação dos furos do contorno da seção. Segundo Nieble (2017) e FHWA (1991), a detonação controlada pode ser realizada de três formas: pré-fissuramento ou pré-corte (*presplit*), pós-fissuramento (*smoothblasting*), e perfuração alinhada (*line drilling*).

No pré-corte os furos de contorno são detonados antes dos furos adjacentes principais (pilão e alargamento), criando uma superfície de descontinuidade por meio da qual as fissuras radiais não se propagam (FHWA, 1991). Trata-se, portanto, de uma medida protetiva, que reduz o *overbreak* e minimiza a propagação das vibrações provenientes das outras sequências de disparos (Bastos, 1998). Nesse esquema os furos são pouco espaçados entre si, com pequenos diâmetros e pequenas cargas (FHWA, 1991).

Em contrapartida, na técnica de pós-fissuramento a detonação dos furos de contorno ocorre após a detonação do pilão e dos furos de alargamento. Os furos são executados próximos ao perímetro de projeto, pouco espaçados entre si, com pequenos diâmetros e pequenas cargas explosivas, semelhante ao pré-corte (CHAPMAN *et al.*, 2010).

A perfuração linear, por sua vez, consiste na perfuração de uma fileira de furos não carregados, espaçados de duas a três vezes o diâmetro do furo (NIEBLE, 2017). Sob condições geológicas propícias, esses furos concentram as tensões e atuam como guias das fissuras formadas pela detonação dos explosivos. Por outro lado, em condições geológicas mais complexas isso pode não acontecer, dado que as fissuras tendem a ocorrer conforme os planos de fissura naturais do maciço (FHWA, 1991).

Os resultados das técnicas de detonação controlada são função da geologia, do número e da orientação das juntas, dos planos de fratura e da qualidade final que se

busca obter nas paredes do túnel no caso de escavações subterrâneas (ST J TOSE, 2006).

### **2.3.3 Medição do *overbreak***

Para fins contratuais, o *overbreak* é classificado em duas categorias: *overbreak* técnico, que está associado ao método construtivo e às imperícias de execução, e *overbreak* geológico, resultante das condições geomecânicas naturais do maciço (ITA, 2013).

Por questões práticas decorrentes da conicidade de perfuração sempre ocorrerá certo volume de *overbreak* técnico. Diante dessa circunstância, é comum ser adotado um limite de tolerância no perfil de projeto, que pode ser incluído nos custos de escavação pagos pelo contratante. De acordo com Mandal e Singh (2008), as diretrizes encontradas em manuais de construção permitem *overbreak* de 15-20 cm na abóboda e 10-15 cm nas paredes do rebaixo, a fim de incluir os efeitos da conicidade da perfuração.

No caso do *overbreak* geológico, devem ser consideradas as incertezas relacionadas ao comportamento do maciço e às suas condições. Os aditivos financeiros resultantes do *overbreak* geológico poderão ser muito elevados e acarretar prejuízos se as condições do maciço forem favoráveis à ruptura, sendo necessária a alocação equilibrada dos riscos entre as partes interessadas. Essa diretriz é corroborada pelo *FIDIC Form of Contracts for Underground Works*, denominado *Emerald Book*, um livro lançado em 2019 que estabelece práticas contratuais para obras subterrâneas, desenvolvido a partir de uma parceria entre ITA e FIDIC (*International Federation on Consulting Engineers*).

Com base nas premissas do *Emerald Book*, Neuenschwander e Marulanda (2019) descrevem duas alternativas, entre as várias possíveis, para a alocação de riscos geológicos. Uma delas propõe atribuir os riscos de *overbreak* geológico em termos de porcentagem sobre a seção de projeto, em que o *overbreak* até x% da área teórica de escavação estaria na esfera de risco da Executora.

A outra alternativa propõe a definição de uma distância limite para o *overbreak* geológico, a partir do perímetro de projeto. Nessa lógica, a esfera de risco atribuída à Executora é estipulada por meio de uma linha limite, distante y metros do perfil de projeto. Em ambos os casos, os custos relacionados ao *overbreak* maior que o limite (maior que x% ou maior que y metros), seriam incluídos nas taxas unitárias de escavação.

De modo geral, a alocação dos riscos geológicos associados a obras de túneis depende da modalidade do contrato, que normalmente é do tipo Preço Global (PG) ou do tipo Preço Unitário (PU). No primeiro caso, a empresa contratada pré-estabelece um preço global fixo pela obra, enquanto que no segundo caso o pagamento da empresa contratada é guiado pelos preços unitários definidos na proposta de licitação (PIRES *et al.*,2016).

A ocorrência de situações inesperadas, como condições do maciço diferentes das indicadas no contrato, ou ainda, condições físicas de natureza totalmente incomum e desconhecida, devem constar em cláusulas específicas do contrato, que permitam o ajuste de preços (PIRES *et al.*,2016).

Contudo, apesar das possibilidades de alocação de riscos em voga, a discussão acerca do *overbreak* geológico eventualmente torna-se fonte de disputas entre Executora e Contratante independentemente do tipo de contrato, pois na prática pode ser difícil diferenciar o que é *overbreak* técnico e o que é *overbreak* geológico.

No que se refere ao procedimento de medição, o *overbreak* é quantificado mediante levantamento da seção escavada – operação que também identifica as porções de *underbreak*. O levantamento pode ser realizado por métodos manuais ou automáticos (Quadro 3), que diferem em relação à velocidade de medição e de processamento, à precisão, alcance e custos de operação (CLARKE, 1996).

Maerz (1996) afirma que os métodos manuais de medição são lentos e trabalhosos, e que por conta disso normalmente as medições são feitas em intervalos de 5 a 10 m ao longo do eixo do túnel – intervalos considerados amplos e insuficientes para fins de controle da escavação e pagamento. O referido autor também menciona

que os resultados tendem a ser imprecisos, raramente estão disponíveis a tempo para o desmonte da próxima frente, e são incapazes de medir grandes seções transversais.

Quadro 3 – Métodos de medição de *overbreak*.

<b>Equipamentos manuais</b>	<b>Equipamentos automáticos</b>
Teodolito e Métodos Eletrônicos de Medição (MED)	Teodolitos automáticos
Taqueômetro ótico (Estação Total ótico)	Refletor MED
Taqueômetro laser (Estação total laser)	Triangulação ótica
Fotogrametria terrestre	<i>Laser scanner 3D</i>
<i>Light Sectioning</i>	

Fonte: Clarke (1996).

Atualmente, os equipamentos topográficos são os mais empregados no levantamento de túneis, em especial os taqueômetros (estação total). Com o advento do *laser scanner 3D*, algumas empreiteiras têm optado por investir nessa tecnologia para avaliar a qualidade da escavação, devido à possibilidade de coleta de dados por varredura (Figura 11) e da alta precisão e velocidade na gravação das informações.

Figura 11 – Levantamento da seção transversal com varredura a *laser*.



Fonte: Leica Geosystems AG (2020).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para alcançar os objetivos planejados em uma pesquisa, bem como validar os resultados obtidos, é essencial o uso de uma metodologia científica, que consiste em um conjunto de métodos e procedimentos sistemáticos, pelos quais são formuladas respostas às questões estudadas.

A escolha da metodologia científica está sujeita às características da pesquisa, que variam de acordo com a sua natureza, seus objetivos, da abordagem do problema e dos procedimentos adotados, como exhibe o Quadro 4.

Quadro 4 – Classificação das pesquisas.

<b>Natureza da pesquisa</b>	<b>Abordagem do problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Procedimentos</b>
Pesquisa básica	Pesquisa quantitativa	Pesquisa exploratória	Pesquisa bibliográfica
Pesquisa aplicada	Pesquisa qualitativa	Pesquisa descritiva	Pesquisa documental
		Pesquisa explicativa	Pesquisa experimental
			Levantamento
			Estudo de caso
			Pesquisa ex-post-facto
			Pesquisa ação
			Pesquisa participante

Fonte: Almeida (2017). Elaboração: Autora.

No que se refere a esse trabalho, a pesquisa realizada é classificada como exploratória, pois visa criar familiaridade com o assunto estudado; e básica, uma vez que pretende gerar conhecimentos novos sem aplicação prática prevista. O procedimento adotado para a compreensão do tema é um estudo de caso único.

Segundo Yin (2001), como estratégia de pesquisa o estudo de caso tem uma vantagem distinta quando “faz-se uma questão do tipo ‘como’ ou ‘por que’ sobre um conjunto contemporâneo de acontecimentos sobre o qual o pesquisador tem pouco ou nenhum controle”. Desse modo, a escolha do estudo de caso como procedimento de

análise da ocorrência de *overbreak*, especialmente em túneis escavados pelo método NATM com explosivos, mostra-se conveniente.

Duas questões principais foram investigadas: quais medidas de controle e medição do *overbreak* foram adotadas, e quais as possíveis causas desse fenômeno no contexto estudado. A metodologia adotada para responder a essas questões foi definida em três principais etapas:

1. Objeto de estudo: apresentação do túnel rodoviário escolhido para estudo, com informações acerca da sua localização, do empreendimento no qual ele está inserido, das suas características geomecânicas bem como os suportes e tratamentos que compõem as denominadas seções tipo de projeto.

2. Coleta de dados: obtenção de informações sobre a escavação do túnel e o *overbreak* resultante, por meio de documentos fornecidos pela equipe de engenharia da obra e entrevistas informais realizadas com alguns dos seus funcionários.

3. Métodos de análise: análise qualitativa e quantitativa dos dados.

Por meio das análises buscou-se compreender o ciclo de escavação empregado no túnel, bem como as medidas de controle e de medição de *overbreak* adotadas. Ademais, com auxílio de ferramentas estatísticas buscou-se identificar padrões e tendências de ocorrência do *overbreak*, além do nível de relacionamento da variável com o parâmetro geomecânico RMR.

### 3.2 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo escolhido foi um túnel que está inserido dentro de uma obra de duplicação rodoviária. O túnel já foi completamente escavado, mas ainda não se encontra em operação uma vez que depende da finalização de toda a obra. A seguir são apresentadas algumas características do empreendimento e do túnel em específico.

### 3.2.1 Apresentação do empreendimento

A Rodovia dos Tamoios (SP-99) está localizada no litoral norte do estado de São Paulo, tendo início no entroncamento com a Rodovia Presidente Dutra (BR-116), na área urbana do município de São José dos Campos, e fim no entroncamento com o futuro Contorno Sul de Caraguatatuba e de São Sebastião, município de Caraguatatuba.

Construída pelo DER/SP no fim da década de 1950, desde então a rodovia tem sido a principal ligação viária entre os municípios do Litoral Norte com as demais regiões do Estado de São Paulo, com destaque para a região denominada Macro metrópole Paulista<sup>1</sup>, de vasta importância para o cenário socioeconômico devido às atividades ligadas ao turismo litorâneo e ao transporte de cargas com origem ou destino no Porto de São Sebastião.

Dois trechos distintos, tanto em termos de tráfego quanto em termos de configuração física, compõe a Rodovia dos Tamoios: Trecho Planalto, duplicado pela DERSA (Desenvolvimento Rodoviário S/A) entre 2012 e 2014, e Trecho Serra, que vem passando por obras de duplicação desde 2015, executadas pela Construtora Queiroz Galvão.

A Figura 12 ilustra os trechos da atual Rodovia dos Tamoios e o trecho em duplicação, além dos contornos viários de São Sebastião e Caraguatatuba, que também farão parte do complexo viário quando finalizados.

---

<sup>1</sup> Aglomerado urbano que abriga a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), além das Regiões Metropolitanas (RMs) da Baixada Santista, de Campinas, de Sorocaba e do Vale do Paraíba e Litoral Norte, as Aglomerações Urbanas de Jundiaí e de Piracicaba e a Unidade Regional Bragantina, ainda não institucionalizada (Emplasa, 2020).



Figura 12 – Trechos da Nova Rodovia dos Tamoios.



Fonte: Concessionária Tamoios (2019).

O projeto da Nova Tamoios está localizado entre os municípios de Paraibuna e Caraguatatuba, passando pelo Parque Estadual da Serra do Mar. A duplicação da rodovia ocorre entre os quilômetros 60,4 e 82, com extensão total de 21,5 km.

Parte do traçado será parcialmente paralelo ao atual, mas a partir do quilômetro 64,40 (borda do Planalto) o projeto desenvolve um novo traçado, com características geométricas distintas da atual rodovia, que se estende até a Baixada Litorânea no quilômetro 82. O padrão rodoviário do novo traçado a ser implantado é de uma pista ascendente com duas faixas de rolamento e acostamento, enquanto a pista atual será destinada ao fluxo descendente, no sentido à cidade de Caraguatatuba.

O Trecho Serra da Rodovia dos Tamoios é caracterizado por um desnível de 800 m, que oferece uma série de restrições ao projeto de duplicação em termos de elevada interferência em áreas dentro de uma Unidade de Conservação (Parque

Estadual da Serra do Mar) e velocidades diretrizes de projeto muito baixas devido ao traçado muito sinuoso.

Nesse sentido, a alternativa de traçado com túneis longos foi escolhida pela vantagem de permitir um traçado geométrico mais favorável, e por proporcionar redução dos impactos ambientais em comparação à alternativa de execução de extensos percursos em superfície com terraplanagem.

Desse modo, o traçado que está sendo implantado conta com quatro túneis principais (Tabela 1), totalizando 12,8 km, com gabarito vertical mínimo de 5,5 m e diâmetro médio de 14,7 m. Os túneis se destacam pelas suas grandes dimensões, sendo dois deles os futuros maiores túneis rodoviários do país (Túnel 3-4 e Túnel 5).

As obras ainda contemplam a implantação de 8,7 km de pontes, viadutos e rodovias, 11,9 km de túneis de serviço, paralelos e contíguos aos túneis principais, interligados a cada 200 ou 250 m conforme as especificações do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, além de estruturas de contenção, cortes e aterros. A visão geral do traçado é exibida no Anexo I.

Tabela 1 – Extensão dos túneis do projeto da duplicação da Rodovia dos Tamoios – Trecho Serra.

<b>Túnel</b>	<b>Comprimento (metro)</b>
Túnel 1	2889
Túnel 2	714
Túnel 3-4	5555
Túnel 5	3696

Fonte: Concessionária Tamoios (2019).

Os túneis estão sendo executados pelo método NATM, com escavação tanto em solo quanto em rocha. Para esse trabalho, serão estudados os detalhes e impactos dessa metodologia de escavação apenas para o Túnel 5, descrito a seguir.

### **3.2.2 Túnel 5**

O Túnel 5 está situado próximo ao município de Caraguatatuba, entre os quilômetros 76+800 e 80+400. Com comprimento total de 3696 m, é o segundo maior túnel do empreendimento, tendo sido escavado a partir dos dois emboques

simultaneamente: lado São José dos Campos, na estaca 10604+3,90, e lado Caraguatatuba, na estaca 10831+17,03.

Na área de implantação existem dois morros de características distintas, ambos com densa cobertura vegetal (Figura 13). O primeiro morro, próximo ao emboque Caraguatatuba, apresenta um perfil de denudação avançado, com um formato arredondado, declividades médias e amplitude de relevo de 100 m de altura.

O segundo morro, conhecido como Pico do Jaraguá, possui uma camada de solo mais fina que o primeiro morro, apresenta um formato pontiagudo e declividades mais acentuadas, com amplitude de relevo na ordem de 550 m. O túnel nessa região corta o terreno a profundidades superiores a 100 m.

Figura 13 – Relevo da área de implantação o Túnel 5.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

O Túnel 5 é composto por um túnel principal, um túnel de serviço e dezessete túneis de ligação, espaçados a cada 200 metros em média. No escopo desse estudo foi

considerado para a análise de escavação e *overbreak* apenas o Túnel Principal 5, que será referido a partir daqui pela sigla TP5.

### 3.2.2.1 Caracterização geomecânica

Devido às dificuldades de acesso, restrições ambientais e a alta profundidade média do TP5, foi proposta uma campanha de investigação direta e indireta que privilegiou os emboques (com a finalidade de desenvolver seções longitudinais e transversais nessas áreas para estudos de estabilidade de taludes), os locais ou áreas de baixa cobertura, e regiões de falhas geológicas mapeadas em trabalhos anteriores.

Os métodos de investigação direta consistiram em sondagens mistas, com sondagens rotativas em trechos de rocha e sondagens a percussão SPT (*Standard Penetration Test*) nos trechos em solo. Como método indireto de investigação foi realizado o levantamento geofísico, por meio da sísmica de refração e caminhamento elétrico. Para melhor caracterização do maciço foram realizados ensaios de infiltração e permeabilidade no trecho em solo, ensaios de compressão uniaxial e análise petrográfica de amostras de rocha.

Os dados obtidos em campo, em laboratório e na literatura fundamentaram o embasamento teórico para a concepção de um modelo geológico e um modelo geomecânico que identificaram os principais condicionantes geológico-geotécnicos atuantes no maciço e suas implicações no decorrer da obra.

O modelo geológico apresenta as características geológicas do maciço, isto é, a distribuição e propriedades das rochas e solos (litotipos), formas estruturais, condicionantes hidrogeológicas e percurso preferencial, manifestações de tensões tectônicas residuais decorrentes de processos geodinâmicos e as características de intemperismo e de relevo (alteração, fraturas por alívio de tensões, inclinação, origem dos solos).

As condições geológicas investigadas no TP5 apresentaram comportamento variável, dada as zonas de cisalhamento que afetam o túnel em quase toda a sua extensão e a grande variação de litotipos, com predominância de granito e gnaiss

finos, gnaiss facoidal e pacotes metassedimentares de composição variada, ricos em quartzo.

O modelo geomecânico, por sua vez, identifica padrões na distribuição dos elementos geológicos e setoriza o maciço em áreas que são aproximadamente homogêneas em termos de condições geotécnicas. Essa setorização (zoneamento ou compartimentação), permite uma visão integrada de vários aspectos referentes ao comportamento do maciço ao longo da escavação, e a avaliação de condições desfavoráveis de estabilidade.

No TP5, assim como em todos os túneis do empreendimento, foi proposta a compartimentação em Zonas Geológico Geotécnicas (ZGs), como exhibe a Figura 14.

Figura 14 – Classificação de Zonas Geológica-Geotécnicas.

ZONAS GEOLÓGICO GEOTÉCNICAS	COMPORTAMENTO	CARACTERÍSTICAS	CLASSE DO MACIÇO - RMR
ZG 6	SOLO ESTRUTURADO	SILTE ARENOSO MICÁCEO, MACIÇO QUASE CONTÍNUO COM ESTRUTURA RELIQUIAR QUE INICIALIZA AS INSTABILIDADE, PLASTICÁVEL	V (RMR<15)
ZG 5	MISTO, SOLO E ROCHA	SAPROLITO E ZONAS CATACLASADAS INTERCALAÇÕES DE SOLO E ROCHA COM FEIÇÕES ESTRUTURAIS 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)

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

O comportamento geral do maciço para a obra está englobado nas seguintes classes definidas:

- **ZG 1 – Rocha sã, pouco fraturada.** Comportamento bem controlado sem a tendência de desenvolver processos de instabilidade geral ou localizado. Maciço auto-portante.
- **ZG 2 – Maciço rochoso são, fraturado com geometria favorável.** Maciço com baixa possibilidade de rupturas localizadas ao longo dos planos de foliação.

- **ZG 3 – Maciço rochoso são com geometria desfavorável.** Maciço com possibilidade de rupturas localizadas (instabilidade de blocos), porém, sem tendência a desenvolvimento de rupturas progressivas.

- **ZG 4 – Maciço rochoso alterado.** Maciço com possibilidade de rupturas generalizadas. Rupturas localizadas com tendência a desenvolvimento de rupturas progressivas.

- **ZG 5 – Solo com intercalações de rocha.** Maciço plastificável, com baixo tempo de auto-sustentação. Necessidade de suportes imediatos, para se evitar rupturas generalizada.

- **ZG 6 – Predominância de solo.** Maciço plastificável. Resistência dos materiais muito inferior à sollicitação determinada pela escavação. Necessidade de suporte imediato para se evitar rupturas generalizadas.

A partir da compartimentação foram aplicados os demais sistemas de classificação, que permitiram o desenvolvimento de metodologias construtivas e sistemas de suporte apropriados a cada mudança de comportamento do maciço ao longo da escavação.

No caso em estudo, cada ZG apresentou um correspondente de classe no Sistema RMR. Com base nas seis classes desse sistema foram definidas oito seções tipo para o TP5, apresentadas na Figura 15.

Figura 15 – Sistema de classificação e suportes das seções tipo.

Classificação Bieniawsky	Zona Geológica	Seção tipo	Espessura do Revestimento Primário (cm)	Espaçamento de Tirantes (m)	Passo de avanço (m)
Classe V (RMR < 20)	ZG 6 (RMR < 15)	S1/S2	28	Cambota	0,80 - 1,00
	ZG 5 (16 < RMR < 25)	M1/M2	28	Tirantes instalados entre cambotas 1,0 x 1,0	0,80 - 1,00
Classe IV (21 < RMR < 40)	ZG 4 (26 < RMR < 35)	R4	20	1,30 x 1,30	1,30 - 2,60
	ZG 3 (36 < RMR < 50)	R3	15	1,80 x 1,80	2,60 - 3,60
Classe III (41 < RMR < 60)	ZG 2 (51 < RMR < 70)	R2	10	2,20 x 2,20	3,60 - 4,40
	ZG 1 (71 < RMR < 100)	R1	5	Tirantes eventuais	4,40 - 5,50
Classe II (61 < RMR < 80)					
Classe I (81 < RMR < 100)					

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

A seção S1 foi prevista para escavação com ocorrência de maciço ZG6 em toda face do túnel até ocorrência de maciço ZG5 no mínimo 2,00 m acima da cota de apoio da cambota da meia seção. Independente da classe do maciço, essa seção também podia ser empregada caso se tenha cobertura inferior a 10 m ou outra situação que confira risco potencial de instabilidade de teto ou face.

A seção S2 foi prevista para escavação com ocorrência de maciço ZG5 no mínimo 2,00 m acima da cota de apoio da cambota da meia seção até ocorrência de maciço ZG4, ZG3 ou ZG2 no mínimo 2,00 m acima da cota de apoio da cambota da seção plena.

As seções M1 e M2 foram previstas para escavação com ocorrência de maciço ZG4, ZG3 ou ZG2 no mínimo 2,00 m acima da cota de apoio da cambota da seção plena, até ocorrência de maciço ZG4, ZG3 ou ZG2 no mínimo 2,00 m (seção M1) e 6,00 m (seção M2) acima da geratriz superior da seção.

A seção R4 foi prevista para escavação com ocorrência de maciço com RMR entre 26 e 35 em toda face do túnel e no mínimo 6,00 m acima da geratriz superior da seção.

As seções R3, R2 e R1 foram previstas para escavação em maciço com RMR entre 36 e 50, 51 e 70, e para maciços com RMR superior 71, respectivamente.

### 3.2.2.2 Seções tipo

Os suportes e tratamentos, bem como a sequência de escavação empregada (seção plena ou parcializada) caracterizam uma seção tipo, utilizada como referência para todas as seções transversais com mesma classificação RMR. Ao todo, no TP5 foram definidas oito principais seções tipo, respectivas às classificações S1 e S2 (solo), R1, R2, R3 e R4 (rocha) e M1 e M2 (mistas com solo e rocha). Os desenhos esquemáticos das seções tipo podem ser conferidas do Anexo I ao Anexo IX.

O suporte primário das seções em solo e mistas do TP5 foi executado em concreto projetado, com a calota reforçada com cambotas metálicas e o arco invertido reforçado com telas metálicas (exceto pela seção M2 que não apresenta arco invertido). Já as seções em rocha foram executadas em concreto projetado com fibras metálicas, utilizadas em substituição às telas metálicas por apresentarem vantagens técnicas e econômicas, e tirantes eventuais.

O suporte secundário nas seções em solo foi executado com telas metálicas, concreto projetado na calota e concreto moldado no arco invertido. Por outro lado, nas seções mistas foi executado concreto projetado tanto na calota quanto no arco invertido (para M1), com reforço de telas metálicas. Para as seções em rocha foi executado apenas o concreto projetado.

O concreto projetado do suporte secundário recebeu adição de microfibras de polipropileno, as quais, dadas às suas propriedades térmicas, tornavam o concreto menos suscetível ao efeito de *spalling*<sup>2</sup> em caso de incêndio.

---

<sup>2</sup> *Spalling* é o nome dado ao efeito que causa deslocamentos repentinos nas camadas externas do concreto. Ocorre devido ao aumento rápido da temperatura, que transforma a água presente nos poros do concreto em vapor, gerando pressões na sua estrutura interna (Kolymbas, 2013).



A respeito da sua composição, o concreto aplicado no túnel foi preparado com cimento CP5 ARI-RS (alta resistência inicial), com adição de superplastificantes e aditivos de pega rápida que proporcionavam, respectivamente, adequada fluidez para a projeção e rápida aderência do concreto ao substrato.

Em relação aos tratamentos, para o avanço típico das seções tipo S2, M1 e M2 optou-se por tratamento de teto com enfilagens tubulares injetadas, além de pregagens de frente com barras de aço (tirante ou chumbador).

As enfilagens tubulares injetadas eram compostas por perfis tubulares de aço, introduzidos no perímetro da seção transversal com uma perfuratriz e preenchidos com injeção de calda de cimento. O conjunto dessas enfilagens formava uma espécie de “guarda-chuva” na abóboda do túnel (no inglês *pipe umbrella*), melhorando a capacidade resistente do maciço e fornecendo mais segurança para a escavação e a instalação dos suportes.

As pregagens eram elementos de contenção que podiam ser do tipo ativas (tirante) ou passivas (chumbador). Os tirantes eram ditos ativos, pois recebiam uma carga de protensão ao serem aplicados, transmitindo assim esforços que impediam as deformações do maciço; já os chumbadores eram executados sem protensão, exercendo resistência apenas quando solicitados pelas deformações do maciço. Os projetos de enfilagens e pregagens são exibidos no Anexo X e Anexo XI, respectivamente.

A parcialização da escavação em calota (meia seção) e rebaixo foi implantada a critério do ATO ou da produção (com anuência do ATO), em função de ocorrência de situação que conferisse risco potencial de instabilidade da face ou para otimização do ciclo de avanço. Nesse caso, o sistema de suporte e o passo de avanço preconizados para a seção plena eram mantidos, e o plano de fogo alterado para a nova geometria.

Cabe mencionar que a definição da seção tipo a ser executada foi realizada pelo ATO em campo tomando-se como base a compartimentação oriunda do mapeamento da frente de escavação. Logo, a quantidade e a distribuição dos suportes estavam sujeitas a alguma variação em função da posição do topo rochoso e da qualidade do maciço.

Desse modo, para frentes de escavação que apresentassem classes de rocha competente, mas ao mesmo tempo tivessem baixa cobertura ou os litotipos em torno da escavação fossem mais frágeis – condições denominadas de “condições de contorno” – optava-se pela aplicação de seções tipo mais robustas, ou seja, com maior capacidade de suporte.

### 3.3 COLETA DE DADOS

De acordo com Yin (2001), a coleta de dados para os estudos de caso pode se basear em muitas fontes de evidências, entre elas documentos e registros em arquivos, que podem ser encontrados na forma de mapas/relatórios e levantamento de dados, respectivamente. Para esse estudo, ambos foram utilizados como fonte de informações e serão detalhadas nessa seção.

O levantamento de dados correspondentes à medição do *overbreak* e à classificação RMR do TP5 foi disponibilizado pela Construtora Queiroz Galvão em planilhas *excel*, e forneceu as informações quantitativas necessárias às análises. Já os mapas e relatórios foram disponibilizados em formato PDF, e possibilitaram uma visão mais global do fenômeno, visto que abordam as características construtivas e geológicas do túnel.

Os dados de *overbreak* e RMR foram levantados em campo pela equipe ATO por meio de mapeamentos da frente de escavação e levantamentos com estação total, respectivamente.

### 3.4 MÉTODOS DE ANÁLISE

As análises qualitativas foram realizadas a partir da análise documental dos materiais disponibilizados pela construtora, nos quais buscou-se identificar os procedimentos de escavação executados, bem como as medidas de controle e medição do *overbreak*.

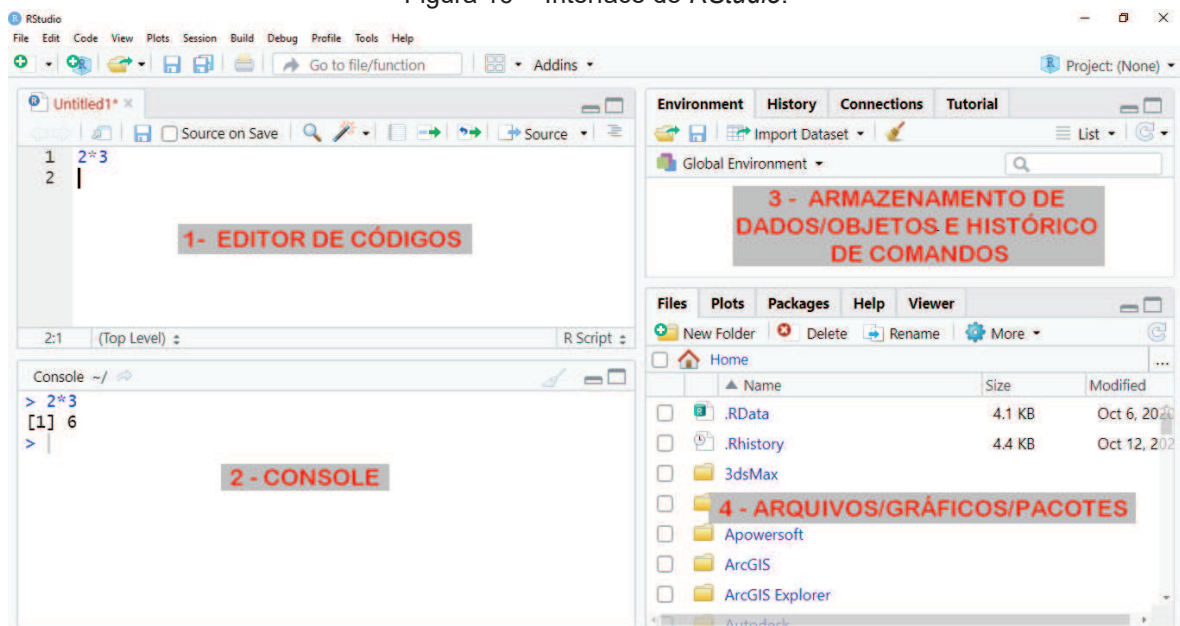
Já as análises quantitativas foram realizadas sob o ponto de vista estatístico. Para tanto, foram utilizadas planilhas eletrônicas do Excel e um *software* denominado

*RStudio*. O Excel foi utilizado para a organização e normalização dos dados, enquanto que o *RStudio* foi aplicado para os testes de normalidade e correlação.

O *RStudio* é um *software* gratuito de ambiente de desenvolvimento integrado para R, uma linguagem de programação C++ utilizada para gráficos e cálculos estatísticos, e está disponível em formato de aplicativo desktop e navegador *web*. Em outras palavras, é um software que fornece uma interface gráfica com diversos recursos e funcionalidades, que facilita o trabalho com o R.

A interface do *RStudio* é dividida em quatro quadrantes, que possuem uma ou mais abas e podem ser organizados conforme as preferências do usuário. A configuração utilizada pela autora é mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Interface do *RStudio*.



Elaboração: Autora.

O editor de códigos é onde são inseridos os comandos do *script*, os quais aparecem no *Console* após serem executados. O histórico de comandos fica armazenado na aba *History*, e as bases de dados e objetos criados ficam armazenados no *Environment*. Outras abas importantes são *Files*, *Plots* e *Packages* onde ficam os arquivos, os gráficos e os pacotes de comandos, respectivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CICLO DE ESCAVAÇÃO

O ciclo de escavação do TP5 da Nova Tamoios foi composto pelas seguintes etapas: tratamento do maciço, perfuração e carregamento dos furos com explosivos, detonação, ventilação, limpeza grossa, bate-choco, limpeza fina, mapeamento geomecânico e instalação de suporte primário.

Os tratamentos consistiram na primeira etapa do ciclo, pois tinham como objetivo a estabilização do maciço antes da execução da escavação. Para tanto, foram utilizadas duas opções: enfilagem tubular injetada (Figura 17) e pregagem de frente.

Figura 17 – Vista frontal da meia seção com enfilagens.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

A etapa de perfuração do maciço rochoso iniciava com a marcação do plano de fogo na frente de escavação. Essa atividade era executada pelos colaboradores da obra com auxílio da equipe de topografia, que orientava a marcação dos furos a partir de uma estação total.

Na etapa de perfuração foram utilizados jumbos de grande e pequeno porte, com três e dois braços mecânicos (Figura 18), respectivamente, todos fabricados pela empresa *Sandvik*. Os jumbos foram equipados com um *software* denominado TCAD, um sistema de automação e monitoramento que auxiliou o operador no controle dos braços mecânicos.

Figura 18 – Perfuração sendo executada com jumbo de grande porte.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

Com o TCAD as informações necessárias para a execução do plano de perfuração eram exibidas no computador de bordo do jumbo (Figura 19), garantindo uma maior precisão das perfurações em termos de profundidade, alinhamento e angulação. Entretanto, o resultado final sempre estava sujeito à perícia do operador.

Além das vantagens executivas, o TCAD atuava como uma ferramenta de controle de qualidade da escavação, pois fornecia relatórios com informações técnicas específicas sobre as perfurações realizadas em comparação às perfurações planejadas.

Figura 19 – Interior da cabine do Jumbo com vista do sistema TCAD.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

Finalizadas as perfurações, os furos foram carregados manualmente com explosivos de acordo com as razões de carga definidas nos planos de fogo. Antes de realizar as detonações o túnel era completamente evacuado, e para garantir que nenhum colaborador permanecesse em seu interior, técnicos de segurança do trabalho realizavam vistorias.

Outra medida de segurança consistia em acionar sirenes três vezes antes da detonação, com o objetivo de alertar os colaboradores e os entornos do túnel. Posteriormente, a detonação era iniciada pelo lado de fora, por meio de uma caneta iniciadora.

Os serviços no túnel eram retomados após um período de tempo da detonação, no qual o sistema de ventilação realizava a exaustão da poeira e dos gases tóxicos produzidos nas explosões. Esse sistema consistia em dois dutos provisórios instalados na parte superior do túnel.

Após a ventilação completa do túnel, os colaboradores executavam a limpeza grossa dos escombros gerados na detonação, utilizando escavadeiras e caminhões. Os

escombros eram destinados às áreas de bota-fora ou locais temporários de deposição localizados próximos aos emboques (“bota-espera”). Essa limpeza grossa era realizada para que as paredes ficassem expostas para a operação seguinte, denominada de bate-choco (ou abatimento de choco).

A operação de bate-choco tinha por objetivo romper as placas de rocha instáveis e era realizada mecanicamente, com rompedor hidráulico, ou manualmente com uso alavancas metálicas, manuseadas pelos colaboradores a partir de plataformas elevatórias. Nessa etapa de bate-choco também eram eliminadas as porções de rocha sobressalentes (*underbreak*). Em seguida, era realizada uma etapa de limpeza fina do material deslocado.

Logo após o bate-choco a equipe de ATO realizava medições e mapeamentos da frente de escavação. Ao todo foram realizados 828 mapeamentos durante escavação do TP5, que revelaram predominância de seções em rocha, com alguns trechos de seções mista M2. Nas regiões de emboques foram definidas seções plenas em solo (S2). A Tabela 2 apresenta o percentual de cada uma das seções obtidas nos mapeamentos ao longo de todo o túnel.

Tabela 2 – Distribuição das seções tipo no TP5 ao longo do túnel.

<b>Seções tipo</b>	<b>Percentual (%)</b>
Seção R3	41,67
Seção R2	27,42
Seção R4	16,43
Seção M2	13,04
Seção S2	1,45

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

Por fim, era realizada uma regularização da superfície escavada com concreto projetado e em seguida a instalação dos suportes primário e secundário. O concreto aplicado nessas três etapas era projetado por via úmida<sup>3</sup>, com a utilização de um robô de projeção (equipamento controlado remotamente por um colaborador especialista), que possibilitava maior produtividade na operação. As espessuras das camadas de

<sup>3</sup> Método de aplicação do concreto projetado em que a adição da água é realizada antes de a mistura ser conduzida até o local da aplicação (Solotrat, 2018).

concreto projetado seguiam as definições estabelecidas pela classificação RMR do maciço rochoso (Figura 15).

A construção do TP5 foi realizada a partir da repetição do ciclo de operações supracitadas, ao longo de três turnos (24 horas). Os tempos dos ciclos e os passos de avanço variavam de acordo com a seção tipo escavada; de modo geral, as seções em rocha acarretavam em tempos de ciclo menores, com passos de avanços maiores, enquanto que as seções mistas e em solo estavam associadas a tempo de ciclos maiores, com menores passos de avanços.

## 4.2 CONTROLE DE *OVERBREAK*

O controle de *overbreak* pode ser realizado por meio das chamadas técnicas de detonação controlada, em que os furos do contorno da seção transversal são executados com diâmetro, espaçamento e cargas especiais. A seguir são detalhadas as características dos planos de fogo executados no TP5, no qual foi utilizada a técnica de pós-fissuramento.

### 4.2.1 Planos de fogo e detonação controlada

O TP5 foi escavado a partir de três planos de fogo, projetados para as classes II, III e IV do sistema RMR. Os planos de fogo associadas à classe II e III eram executados essencialmente em seções de rocha competente, enquanto que os planos de fogo associados à classe IV eram executados em seções de rocha fraturada e em seções mistas (nas seções em solo não eram executadas detonações).

Em todos os planos de fogo a sequência de ignição foi caracterizada por *delays* e dividida em seis áreas de detonação: pilão, auxiliar, auxiliar de contorno, contorno e sapateira. Na área do pilão também foram perfurados os furos de alívio, não carregados, que colaboraram para a criação da frente livre. Para todas as seções o diâmetro dos furos de alívio foi de 102 mm e dos furos carregados foi de 51 mm.

A locação dos furos na frente de escavação e a temporização-sequenciamento dos retardos para a detonação foi a mesma para as Classes de maciço II e III, com 180 furos e 176 temporizadores ao todo, enquanto que para a Classe IV somaram-se 166



furos e 162 temporizadores. Outras informações técnicas sobre os planos de fogo são apresentadas na Tabela 3.

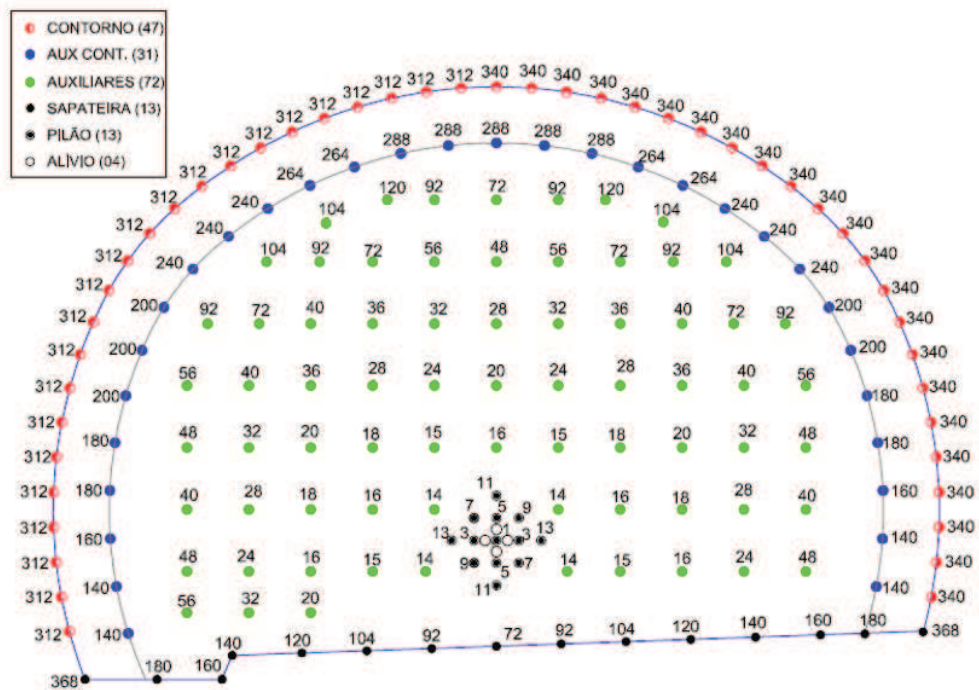
Tabela 3 – Informações técnicas dos planos de fogo utilizados na escavação do TP5.

INFORMAÇÕES	PLANO DE FOGO 1	PLANO DE FOGO 2	PLANO DE FOGO 3
Classe do maciço	II	III	IV
Área da seção (m <sup>2</sup> )	118,95	121,08	123,23
Comprimento da perfuração (m <sup>2</sup> )	5,0	3,5	2,50
Razão de carga (kg/m <sup>3</sup> )	2,18	2,15	1,79

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

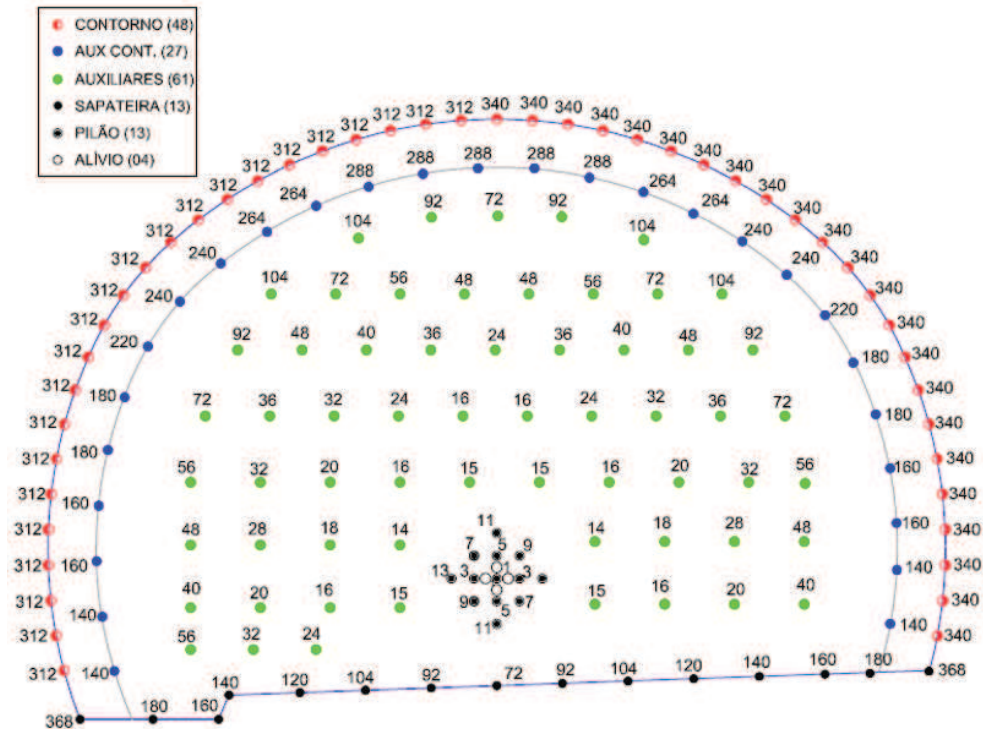
Com base nos dados apresentados, pode-se observar que para maciços que apresentaram maior grau de fraturamento, os avanços e o volume de explosivos foram automaticamente reduzidos. A Figura 20 e Figura 21 exibem a locação dos furos dos planos de fogs na seção transversal.

Figura 20 – Plano de fogo para as Classes II e III do maciço.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

Figura 21 – Plano de fogo para as Classe IV do maciço.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

Em todos os planos de fogo havia a utilização sistemática da técnica de desmonte escultural denominada pós-fissuramento, em que os furos do contorno eram pouco espaçados entre si (0,60 a 0,70 metros) e pouco carregados. As cargas nos furos de contorno, assim como nos demais furos da seção, estavam associadas ao comprimento da perfuração, como exibe a Tabela 4.

Tabela 4 – Carga de explosivos em função da profundidade dos furos.

Profundidade (m)	Explosivos (kg/furo)		
	Pilão+Sapateira	Auxiliares	Contorno
5,00	10	9	1,112
4,50	9	8	1,112
4,00	8	7	1,112
3,50	7	6	0,834
3,00	6	5	0,834
2,50	5	4	0,556

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

### 4.3 MEDIÇÃO DO *OVERBREAK*

A medição do *overbreak* no TP5 foi realizada em duas etapas: levantamento de dados em campo com equipamentos topográficos, e processamento das informações coletadas por meio de *softwares*. As etapas são descritas a seguir.

#### 4.3.1 Considerações de projeto

Seguindo as definições encontradas na literatura, o *overbreak* gerado no TP 5 foi classificado em *overbreak* técnico, decorrente da conicidade da perfuração e das operações de bate-choco, e *overbreak* geológico.

Os limites de tolerância do *overbreak* técnico foram estabelecidos com base no *overbreak* esperado para as seções em rocha, considerando que as seções em solo e mistas deveriam atender integralmente a linha teórica de projeto. Nas seções em solo e mistas o suporte trabalha essencialmente à compressão, de maneira que a geometria em arco de projeto é fundamental para minimizar esforços de flexão.

Na Tabela 5 são apresentadas as profundidades de *overbreak* que eram esperadas para as seções tipo em rocha, estipuladas com base na experiência da Projetista.

Tabela 5 – Distância de *overbreak* na escavação do TP5.

Seção Tipo	<i>Overbreak</i> por conicidade (m)	<i>Overbreak</i> por bate-choco (m)	<i>Overbreak</i> geológico (m)	<i>Overbreak</i> total (m)	<i>Overbreak</i> a ser considerado (m)
R1	0,22	0,10	0,10	0,42	0,45
R2	0,19	0,15	0,20	0,54	0,55
R3	0,16	0,20	0,30	0,66	0,65
R4	0,11	0,25	0,25	0,61	0,60

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

A conicidade de perfuração é a condição necessária para a execução do plano de fogo com as condicionantes impostas pelos equipamentos de perfuração. Os fatores que influenciam são: comprimento dos furos e desvios imprevistos de furação. Uma vez que o comprimento dos furos diminuía conforme piora a classe do maciço, o *overbreak* por conicidade esperado também diminuía da seção R1 para R4.

Além do *overbreak* por conicidade, para o *overbreak* técnico foi considerado aquele ocasionado pela execução do bate-choco, em que o fator preponderante era o fraturamento do maciço, tanto natural quanto o induzido pelo desmonte a fogo. A experiência tem mostrado que maciços mais fragmentados e heterogêneos são mais suscetíveis à queda de blocos nessa operação, justificando os valores crescentes na Tabela 5. De modo semelhante, o *overbreak* geológico era maior para maciços compostos por rochas mais fragmentadas e alteradas.

O *overbreak* total constituiu a soma do *overbreak* técnico (conicidade + bate-choco) e do *overbreak* geológico, enquanto o *overbreak* a ser considerado correspondeu ao valor arredondado do *overbreak* total. Uma vez que o contrato entre a Contratante e a Construtora era do tipo Preço Global, o *overbreak* a ser considerado era incluso no preço ofertado.

#### **4.3.2 Levantamento das seções transversais**

Para a obtenção dos dados de *overbreak* foi realizado um levantamento das seções transversais do túnel em intervalos pré-definidos, utilizando uma estação total robótica tipo Leica TS12 (Figura 22) de alta precisão, equipada com *laser* rotativo que realizava o escaneamento do túnel por varredura. O *overbreak* levantado correspondeu ao somatório do *overbreak* técnico e *overbreak* geológico.

Figura 22 – Levantamento da seção transversal escavada.



Fonte: Amberg Technologies (2020).

Os levantamentos das seções foram iniciados após a limpeza da frente escavada e a operação de bate-choco, em intervalos de 2 m ao longo do eixo longitudinal do túnel. A coleta de dados ocorreu após três etapas distintas: a escavação, e a aplicação da primeira e da segunda camada de revestimento. Ao todo, foram realizados 1464 levantamentos, sendo 920 pelo emboque Caraguatatuba e 544 pelo emboque São José dos Campos.”

#### 4.3.3 Quantificação do *overbreak*

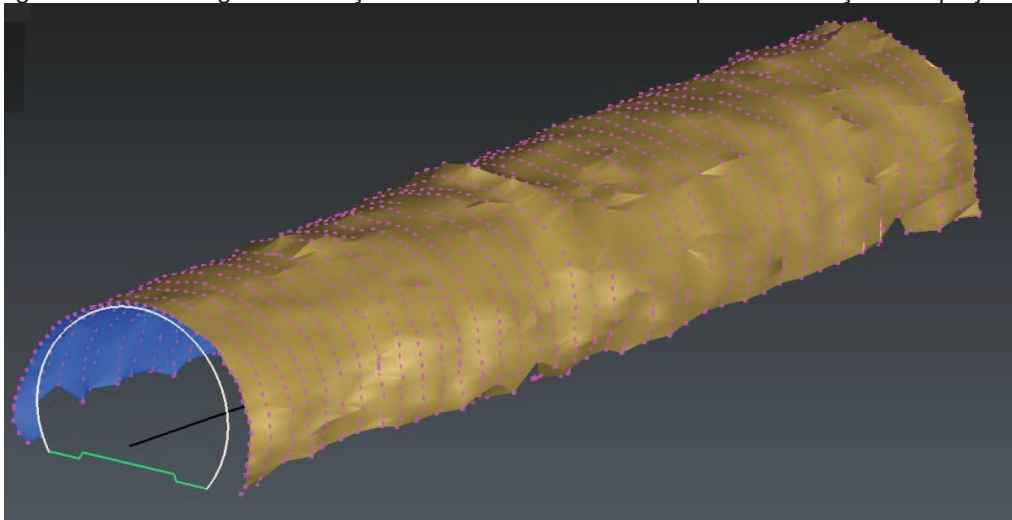
O *overbreak* pode ser quantificado sob uma perspectiva bidimensional, por área, ou sob uma perspectiva tridimensional, em volume. No primeiro caso, o *overbreak* é calculado a partir da distância entre as poligonais semicirculares correspondentes ao perímetro de projeto e o perímetro escavado.

O volume de *overbreak*, por sua vez, é obtido com a multiplicação da área de *overbreak* por uma determinada distância longitudinal no túnel, que é definida de

acordo com os interesses da análise – pode ser o avanço da escavação, ou espaçamento entre estacas pré-definidas etc.

No caso do TP5 os dados obtidos nas medições foram transferidos para um *software*, que realizou o cálculo das áreas de *overbreak* automaticamente. O *software* é denominado *3DREshaper* (*Leica System*) e possibilita o processamento de qualquer tipo de nuvem de pontos – no caso específico de túneis oferece recursos para a modelagem e avaliação da escavação tanto em 2D como 3D (Figura 23).

Figura 23 – Modelagem das seções do túnel escavado sobrepostas às seções de projeto.

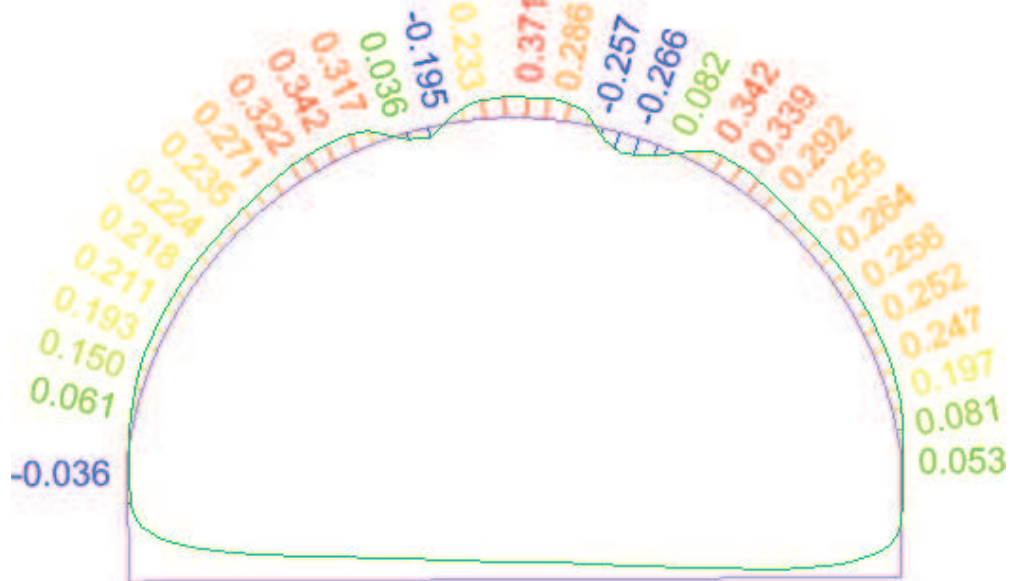


Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019).

Para a quantificação do *overbreak* foram inseridos no *software* os arquivos correspondentes ao projeto do túnel e às medições realizadas em campo com a estação total. As seções levantadas foram então sobrepostas às seções correspondentes do projeto, possibilitando a comparação entre os perfis reais e teóricos com identificação de zonas de *overbreak* e *underbreak*.

Na Figura 24 os valores positivos representam as distâncias de *overbreak* em metros, e os valores negativos representam as distâncias de *underbreak*, também em metros.

Figura 24 – Comparação entre seção transversal teórica e real.



Fonte: 3DReshaper (2019).

Os dados disponibilizados para esse estudo somam 1463 valores de *overbreak*, medidos em metros quadrados.

#### 4.4 ANÁLISES DO OVERBREAK

Como citado na metodologia desse trabalho, a análise quantitativa dos dados foi realizada sob o ponto de vista estatístico. Primeiramente, fez-se uma análise exploratória por meio de ferramentas descritivas, utilizadas para sumarizar os dados de *overbreak* e identificar seus principais atributos. Em seguida, investigou-se a correlação entre os dados de *overbreak* e os dados de RMR, e por fim, diante dos resultados, discutiu-se as possíveis causas do *overbreak* gerado no TP5.

Cabe ressaltar que os dados de *underbreak no TP5* não fazem parte do escopo desse trabalho, e por isso não foram considerados.

##### 4.4.1 Análise exploratória dos dados

Como descreve Field (2009), o primeiro passo da análise de dados é explorá-los, checando hipóteses básicas sobre eles, determinando algumas estatísticas descritivas e traçando gráficos. Sendo assim, a análise dos dados de *overbreak* no TP5

parte do cálculo de medidas de tendência central (média, moda e mediana), medidas de variabilidade (amplitude, variância e desvio padrão), e da elaboração de um histograma.

As medidas de tendência central e de variabilidade são exibidas na Tabela 6. Dos resultados obtidos, observa-se que a dispersão dos dados (desvio padrão) não é alta se comparada à média, demonstrando que a média é uma boa representação do conjunto.

Tabela 6 – Medidas estatísticas do *overbreak* no TP5.

<b>Medidas</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Média	9,78
Mediana	9,50
Moda	8,05
Mínima	1,67
Máxima	34,92
Amplitude	33,25
Variância	10,80
Desvio padrão	3,29

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

Segundo Torman *et al.* (2012), um histograma é composto por retângulos justapostos em que no eixo horizontal está a variável de interesse dividida em faixas de valores (classes), e no eixo vertical a frequência das faixas correspondentes. Desse modo, um histograma permite a análise da distribuição de frequências, isto é, quantas vezes os valores se repetiram dentro de um conjunto de dados (Field, 2009).

As distribuições de frequência são modelos utilizados para representar o comportamento de um determinado evento, em função da frequência da sua ocorrência. A partir desse modelo, é possível obter a distribuição de probabilidades, ou seja, as probabilidades de ocorrência associadas a cada faixa de valores da variável.

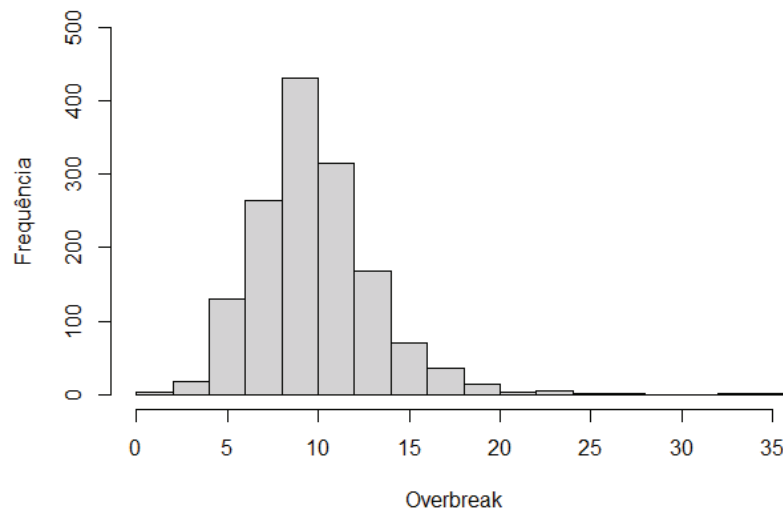
A distribuição normal, também conhecida como Distribuição de Gauss ou Gaussiana, é uma das mais importantes distribuições na estatística, e sua principal propriedade é a simetria em torno da média – que coincide com a moda e a mediana – e curva em forma de sino.



Pelo gráfico da Figura 25, elaborado a partir de 1463 dados, é possível observar que a frequência de *overbreak* está concentrada do lado esquerdo da escala, se distribuindo de forma assimétrica, semelhante ao histograma b da Figura 26. Sendo assim, o conjunto de dados de *overbreak* não apresenta distribuição normal, o que também pode ser verificado pela proporção de seus valores.

Em uma distribuição normal, a proporção de valores sob a curva está dentro de até três desvios padrão positivo e negativo da média (Lopes *et al.*, 2013). Além disso, cabe mencionar que na prática de engenharia a distribuição normal só é válida para valores positivos. Desse modo, a partir de um cálculo rápido utilizando os valores da média e desvio padrão da Tabela 6, é possível verificar que esses critérios não são atendidos.

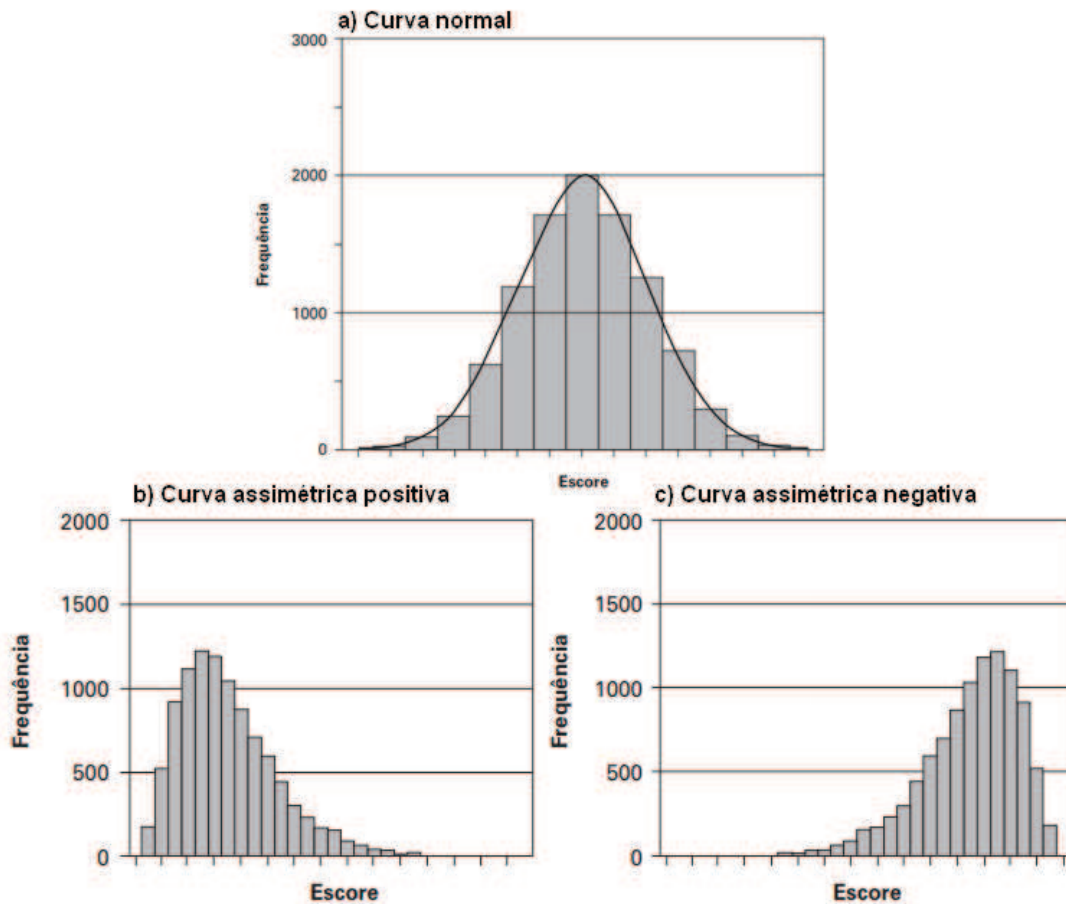
Figura 25 – Histograma com os dados de *overbreak* (m<sup>2</sup>) gerado no TP5.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

A distribuição assimétrica do gráfico da Figura 25 indica que no TP5 os valores mais baixos de *overbreak* são os mais frequentes, e que mais da metade dos registros estão localizados no intervalo de 8 a 12 m<sup>2</sup> (duas barras maiores).

Figura 26 – Distribuições de frequência simétrica e assimétricas.



Fonte: Field (2009). Adaptado.

Ademais, nota-se que ocorrências acima de 20 m<sup>2</sup> são pouco frequentes, dispersas e afastadas da média. Segundo Field (2009), valores atípicos como esse são denominados *outliers*, e costumam distorcer a média e inflacionar o desvio padrão. *Outliers* podem representar erros de processamento de dados ou de coleta, e devem ser corrigidos ou excluídos. No entanto, os *outliers* podem ser valores corretos que, por algum motivo, diferem dos demais dados do conjunto, podendo representar casos particulares que merecem estudos pontuais para suas causas.

Nesse sentido, cabe mencionar que a maior área de *overbreak* registrada foi 160,52 m<sup>2</sup>, mas por ser um valor discrepante dos demais, provavelmente por algum tipo de erro de registro, já que esse valor de *overbreak* é maior que qualquer uma das áreas

das seções, optou-se por excluí-lo da análise. Sendo assim, o valor máximo adotado foi 34,92 m<sup>2</sup>.

#### **4.4.2 Correlação entre *overbreak* e RMR**

Como descrito no item 2.3.1, o *overbreak* pode ser ocasionado por fatores geológicos/geomecânicos e construtivos. O grau de associação entre o *overbreak* e cada um desses fatores pode ser determinado por meio da análise de correlação bivariada, uma ferramenta estatística que fornece a medida de associação entre duas variáveis.

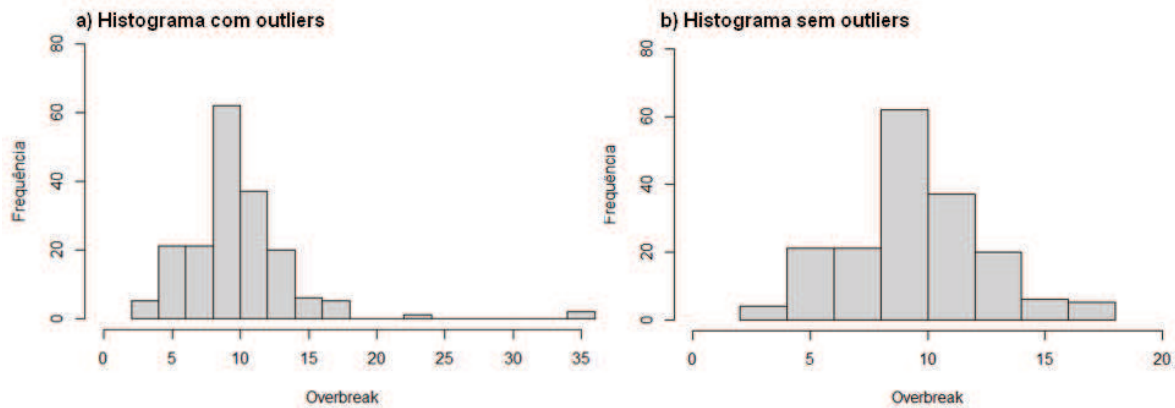
Desse modo, pode-se avaliar qual fator geológico/geomecânico e qual fator construtivo tem mais influência na geração de *overbreak* em um determinado túnel, uma vez que as medidas de correlação entre essas variáveis são únicas para cada obra. Para esse trabalho, a análise será restrita à correlação entre os dados de *overbreak* e os dados de RMR (fator geomecânico), levantados no TP5.

##### **4.4.2.1 Seleção de amostras**

A totalidade de dados de *overbreak* registrados no TP5 constitui o que em estatística é qualificado como população. Tendo em vista as diversas dificuldades para observar o conjunto de 1464 dados que compõe essa população, optou-se por selecionar um subconjunto de valores representativos, denominado de amostra.

A seleção da amostra de dados de *overbreak* foi feita de forma sistemática, isto é, não aleatória, utilizando como critério os valores associados às estacas inteiras, ou mais próximas das estacas inteiras em alguns casos. Sendo assim, foram selecionados 178 dados, retirados do conjunto total periodicamente a cada 20 metros, aproximadamente (distância entre estacas inteiras). A distribuição de frequências do conjunto amostral é exibida no histograma da Figura 27.

Figura 27 – Histogramas com os dados amostrais de *overbreak* (m<sup>2</sup>) gerado no TP5.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

Inicialmente, o histograma dos dados amostrais de *overbreak* mantém as mesmas características do histograma do conjunto total: distribuição assimétrica positiva, com mais de 50% dos dados dentro da faixa de *overbreak* entre 8 e 12 m<sup>2</sup>, e presença de *outliers*.

O histograma b da Figura 27 mostra a distribuição amostral sem os *outliers*, em que já é possível identificar uma distribuição que se assemelha à distribuição normal, com ponto de frequência máxima situado mais ao centro da distribuição. Sem os *outliers*, o conjunto amostral de *overbreak* passou a ter 176 dados.

Ademais, esse conjunto amostral de dados atende aos critérios de proporção de valores citados no item 4.4.1, uma vez que o limite inferior da distribuição não extrapola o máximo de três desvios padrão da média e é maior que zero.

A amostra de dados de RMR, por sua vez, foi selecionada em função da amostra de dados de *overbreak*. Uma vez que os intervalos de medição do *overbreak* e dos mapeamentos das frentes de escavação não são os mesmos, optou-se por “amarrar” os dados de RMR provenientes dos mapeamentos aos dados de *overbreak*, considerando a estaca anterior mais próxima. Por exemplo, a estaca 10785+19,80 do RMR foi associada à estaca 10786 do *overbreak*.

Outros exemplos podem ser conferidos na Figura 28, que exibe um recorte da tabela localizada no Apêndice A, onde são elencados todas os 176 pares de “amarrações”, utilizados para a análise de correlação.

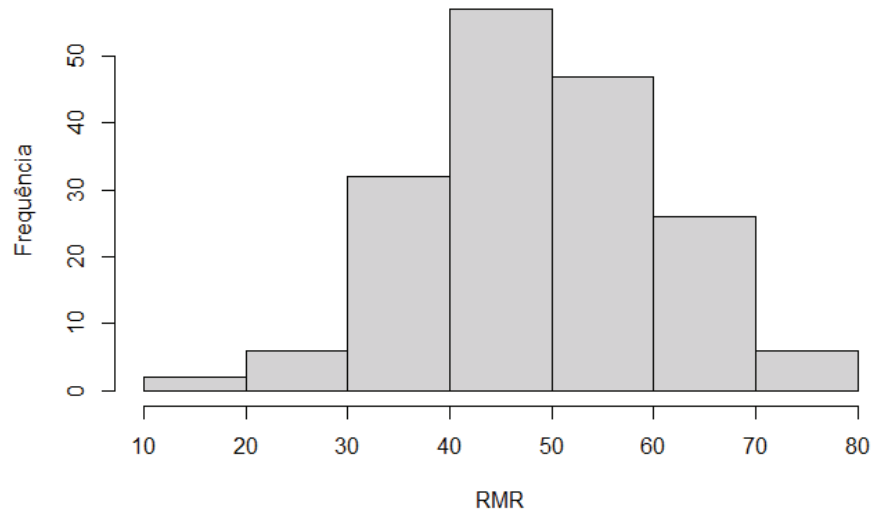
Figura 28 – Recorte da tabela do Apêndice A, que elenca os dados amostrais de RMR e *overbreak*.

<b>Estacas do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>
10786	13,92	10785+19,80	39
10785	13,07	10784+19,00	47
10784	6,58	10784	31
10783	9,50	10782+17,02	63
10782+4,00	6,71	10781+19,74	51
10780+18,00	8,13	10780+15,57	53
10780	6,24	10779+19,46	58
10778+18,00	8,84	10778+18,00	33
10778	13,13	10777+18,40	61
10777	8,57	10776+19,16	57
10776	10,98	10775+18,00	47
10775	13,03	10774+18,55	38

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

O histograma do conjunto amostral de RMR é exibido na Figura 29, e apresenta uma distribuição bem próxima à normal.

Figura 29 – Histogramas com os dados amostrais de RMR gerado no TP5.



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

Segundo Torman *et al.* (2012), a normalidade de variáveis aleatórias é exigida para muitos métodos de inferência estatística, incluindo o método de Correlação Linear de Pearson, em que o teste de significância do coeficiente de correlação apenas é válido se ambas as variáveis aleatórias tiverem distribuição normal.

Apesar de as amostras terem apresentado distribuições próximas à normal, a análise de gráficos está sujeita à subjetividade e, por isso, é interessante realizar a verificação da normalidade dos dados por meio de testes de hipótese, que são métodos matematicamente mais rigorosos. Essa verificação é detalhada a seguir.

#### 4.4.2.2 Verificação de normalidade

Entre os testes disponíveis para a análise da distribuição dos dados está o teste de Shapiro-Wilks, considerado o melhor teste de aderência à normalidade (Lopes *et al.*, 2013). Nesse teste são consideradas duas hipóteses:

Hipótese nula  $H_0$ : a variável aleatória adere à distribuição Normal;

Hipótese alternativa  $H_1$ : a variável aleatória não adere à distribuição Normal.

A regra de decisão está associada ao valor-p ou *p-value* dos testes, que deve ser comparado ao nível de significância adotado: se o valor-p do teste for menor que o nível de significância, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, não se pode admitir que a variável em questão tenha distribuição normal (Torman *et al.*, 2012). Na Tabela 7 são apresentados os resultados do teste de Shapiro-Wilks realizado no software *RStudio* com o conjunto de dados de *overbreak* e RMR, considerando nível de significância de 5% (intervalo de confiança de 95%).

Tabela 7 – Resultados do teste de normalidade para as variáveis *overbreak* e RMR.

Variável	Valor-p (Teste Shapiro-Wilks)
<i>Overbreak</i>	0,1017
RMR	0,1911

Fonte: Autora.

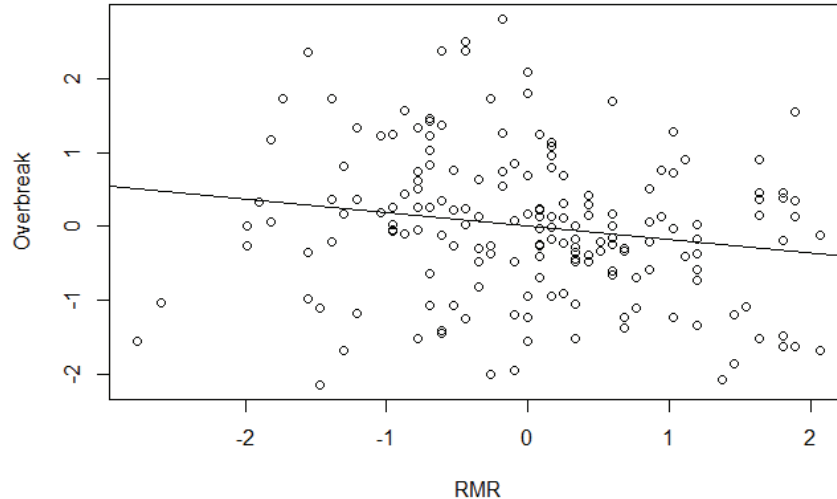
Os resultados demonstram que ambas as variáveis tem valor-p maior que 0,05 (significância) e, portanto, não diferem da distribuição normal.

#### 4.4.2.3 Teste de Correlação de Pearson

Inicialmente, o comportamento conjunto de duas variáveis quantitativas pode ser analisado geometricamente a partir de coordenadas cartesianas em um gráfico de dispersão. Nesse tipo de gráfico é possível visualizar a distribuição de uma variável em relação à outra, a existência e agrupamentos de variáveis e *outliers*, e a ocorrência de tendências lineares ou não lineares, que é analisada por meio da disposição (x,y) dos pontos em torno de uma reta.

O gráfico de dispersão das variáveis estudadas é apresentado na Figura 30. O *overbreak* é considerado uma variável dependente, por isso seus valores são dispostos no eixo y; já o RMR enquanto uma variável independente tem seus valores dispostos no eixo x.

Figura 30 – Gráfico de dispersão das variáveis RMR (eixo x) e *overbreak* (eixo y).



Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração: Autora.

As análises de correlação possibilitam descobrir com precisão o quanto uma variável interfere no resultado de outra, isto é, o grau de relação entre elas (Guimarães, 2012). Para duas variáveis intervalares que seguem uma distribuição normal, é comum a utilização do Coeficiente de Correlação de Pearson (Field, 2009; Guimarães, 2012).

O coeficiente da Correlação de Pearson, representado pela letra “r”, é adimensional e assume valores entre -1 e 1. Se a relação entre as variáveis resultar em  $r = 1$ , diz-se que há correlação perfeita positiva; se  $r = -1$  a correlação é perfeita negativa, ou seja, enquanto uma variável aumenta a outra diminui; caso  $r = 0$  a relação é difusa ou não linear (Guimarães, 2012).

Utilizando o software *RStudio*, as amostras descritas no item 4.4.2.1 foram testadas para a Correlação de Pearson. O resultado obtido é mostrado na Figura 31.



Figura 31 – Resultados da correlação de Pearson obtidos no software *RStudio*.

```
Pearson's product-moment correlation

data: dados`RMR padronizado` and dados`overbreak padronizado`
t = -2.4254, df = 174, p-value = 0.01631
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.32019263 -0.03382222
sample estimates:
COR
-0.1808376
```

Fonte Autora.

O valor negativo indica que o *overbreak* está inversamente relacionado com o RMR, isto é, a magnitude de *overbreak* é maior para seções em que o maciço apresenta menores valores de RMR; ou, em maciços com classificação RMR maior o *overbreak* resultante da escavação com explosivos é menor. No entanto, o valor da correlação em si é considerado fraca, pois está mais próxima de zero do que de 1 (Figura 32).

Figura 32 – Intensidades de correlação negativa e positiva para o Coeficiente de Correlação de Pearson.



Fonte: Oliveira (2019).

A partir dos resultados supracitados, pode-se afirmar que no TP5 os valores de *overbreak* não são relacionados aos valores de RMR, pois essas variáveis apresentam uma correlação baixa. No entanto, isso não significa necessariamente que o RMR, isto é, que o conjunto de características e condições do maciço, não cause o *overbreak*, mas apenas que eles não estão diretamente correlacionados. Cabe ressaltar que o teste de Correlação Pearson comprova se há uma variação concomitante entre duas variáveis, não significando, *a priori*, que uma é a causa da outra.

Existem muitas outras variáveis, não consideradas no estudo, que podem afetar o comportamento da variável dependente (*overbreak*). Os aspectos de algumas dessas variáveis são abordados no item 4.4.3.

Os resultados obtidos também estão associados aos procedimentos estatísticos aplicados para a análise. Segundo Guimarães (2012), a vantagem da técnica de amostragem sistemática, utilizada nesse estudo para a seleção dos dados amostrais de *overbreak*, está na facilidade da determinação dos elementos da amostra. No entanto, há a desvantagem associada à possibilidade de a variável de interesse conter ciclos de variação, especialmente se o período desses ciclos coincidir com o intervalo de retirada dos elementos da amostra (Guimarães, 2012).

#### **4.4.3 Avaliação das possíveis causas do *overbreak***

Apesar de as análises estatísticas terem indicado baixa correlação entre o *overbreak* e o RMR para o TP5, é preciso considerar que na determinação do RMR são definidos pesos iguais aos parâmetros geomecânicos na somatória e que, entretanto, um (ou mais de um) dos parâmetros que compõe o RMR pode ter maior influência na magnitude do *overbreak*. Sendo assim, essas variáveis precisam ser analisadas individualmente, de modo que seja verificado qual (ou quais) tem maior correlação com esse fenômeno.

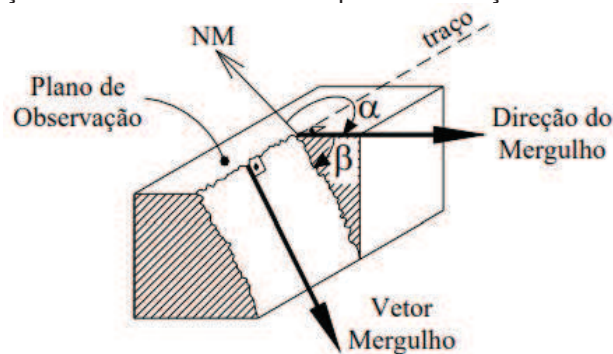
Do ponto de vista geológico, o *overbreak* pode estar relacionado à resistência da rocha intacta, ao RQD, ao espaçamento ou às condições das discontinuidades. Na prática da engenharia de túneis, esse conjunto de parâmetros é denominado de RMR “linha”, pois desconsidera os parâmetros que estão vinculados às características da obra em questão, que são: condições hidrogeológicas e orientação das discontinuidades em relação ao eixo do túnel.

As condições hidrogeológicas, de modo geral, são relevantes no caso de alta pressão de água no maciço. Por outro lado, como alguns autores mencionam, a orientação das discontinuidades em relação ao eixo do túnel é um dos fatores que mais influenciam no *overbreak* (Jang e Topal, 2013; Mohammad *et al.*, 2015).

De acordo com Hemphill (2013), as descontinuidades são superfícies naturais de fratura em maciços rochosos, e seu tipo depende da sua origem de formação. São exemplos: superfície de estratificação (*bedding plane*), foliação (*foliation*), diaclase (*joint*) e falha (*fault*).

Como ilustra a Figura 33, a orientação das descontinuidades é definida por dois ângulos, denominados mergulho (*dip*), o qual varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , e direção de mergulho (*strike*), que varia de 0 a  $360^\circ$  (Maia, 2003). Descontinuidades que possuem os mesmos parâmetros geométricos são denominadas como uma família. Sendo assim, o número de famílias é uma informação importante no que se refere à caracterização do maciço em relação às descontinuidades.

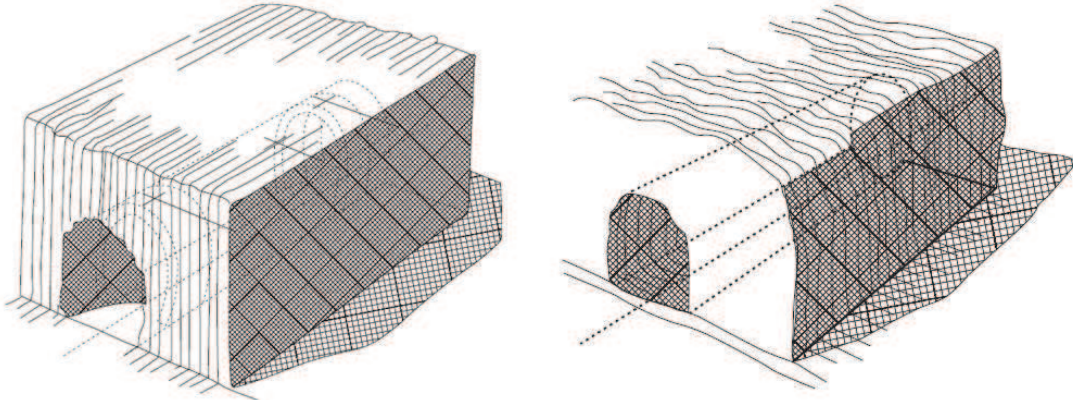
Figura 33 – Orientação da descontinuidade em que  $\alpha$  é a direção do mergulho e  $\beta$  o mergulho.



Fonte: Maia (2003).

A relação entre a orientação das descontinuidades e o eixo do túnel pode ser paralela ou perpendicular, como ilustra a Figura 34. Conforme afirma Bieniawski (1973), em geral o *overbreak* é menor quando o eixo do túnel é aproximadamente perpendicular à direção de mergulho, e maior quando eles são aproximadamente paralelos (Jang e Topal, 2013).

Figura 34 – Túnel paralelo à direção de mergulho (esquerda), e perpendicular à direção de mergulho (direita).



Fonte: Hemphill (2013).

Ademais, a escavação no sentido do mergulho tende a ser menos favorável ao *overbreak* que no sentido contrário ao mergulho, conforme exhibe as informações da Figura 35.

Figura 35 – Efeito a orientação nas descontinuidades na classificação RMR.

Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Fonte: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2020).

Em se tratando de parâmetros construtivos, considerando que a utilização de sistemas de operação computadorizados como o TCAD garante uma maior precisão da

perfuração, pressupõe-se que o *overbreak* gerado está associado essencialmente às condições de conicidade de escavação, pois os desvios de furação acidentais são muito pequenos.

No entanto, dentro do aspecto técnico o *overbreak* pode estar associado às características dos planos de fogo, que variam pouco de um para outro, principalmente em relação à razão de carga e à sequência de detonação. Não obstante, a utilização da técnica de pós-fissuramento pode ser questionada, uma vez que a alternativa de pré-fissuramento apresenta um mecanismo menos propício à propagação de ondas de choque e, por consequência, pode vir a gerar menos danos ao maciço.

Outros fatores técnicos também podem estar associados ao *overbreak* no túnel em estudo, como o tipo dos explosivos, no que se refere à velocidade de detonação, e à temperatura e pressão dos gases liberados.

Para além das análises supracitadas, buscou-se investigar a magnitude do *overbreak* em relação às áreas das seções transversais de projeto. Com isso, verificou-se que as seções de maior área apresentaram um maior percentual médio de *overbreak* associado, como pode ser observado na Tabela 8 .

Tabela 8 – Medidas estatísticas do *overbreak* em relação às áreas teóricas das seções transversais.

Área (m <sup>2</sup> )	<i>Overbreak</i> (m <sup>2</sup> )			
	Máximo	Mínimo	Mediana	Média
118,95	13,90	3,43	8,89	8,37
121,08	34,92	3,64	9,38	9,76
123,23	22,94	3,25	10,26	10,61

Fonte: Construtora Queiroz Galvão (2019). Elaboração Autora.

Pressupõe-se que esse resultado seja justificado devido às tensões induzidas pela escavação. Sabe-se que a escavação de um túnel altera o estado de tensões inicial do maciço, provocando diversos mecanismos geomecânicos, entre eles a convergência da seção transversal.

A convergência do túnel pode levar à movimentação e queda de blocos, gerando cavidades características de *overbreak*. Nesse sentido, quanto maior a

abertura do túnel maior é a alteração nas tensões pré-existentes e, portanto, maior pode ser a sobreescavação.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa desse trabalho foi desenvolvida por meio de análises qualitativas, com foco na descrição dos processos de escavação, de controle e medição do *overbreak*, e quantitativas, com auxílio de ferramentas estatísticas para investigação de padrões e tendências de ocorrência do *overbreak*, bem como o nível de relacionamento da variável com o parâmetro geológico RMR.

No que se refere ao ciclo de escavação, constatou-se que a operação foi realizada em nove principais etapas: tratamento do maciço, perfuração e carregamento dos furos com explosivos, detonação, ventilação, limpeza grossa, bate-choco, limpeza fina, mapeamento geomecânico e instalação de suporte primário.

O controle do *overbreak* foi realizado por meio da técnica de pós-fissuramento, com furos de contorno pouco espaçados, pouco carregados e com pequenos diâmetros. A medição, por sua vez, foi realizada em duas etapas: 1) levantamento das seções transversais por meio de um mecanismo de varredura a laser com uma estação total robótica tipo Leica TS12 de alta precisão; 2) comparação das seções transversais levantadas com as seções de projeto em um *software* denominado *3DREshaper*, que calculou as áreas de *overbreak* automaticamente.

Em relação às análises estatísticas, verificou-se que a maioria dos registros de *overbreak* estão dentro do intervalo de 8 a 12 m<sup>2</sup>, e poucos registros ultrapassam o valor de 20 m<sup>2</sup>.

A correlação entre o *overbreak* e o RMR resultou negativa e fraca, indicando que as variáveis estão inversamente relacionadas, mas que não apresentam um alto grau de relacionamento. A correlação fraca entre o *overbreak* e o RMR foi um resultado de certa forma inesperado, pois a bibliografia aponta que essas variáveis normalmente estão fortemente relacionadas.

Apesar da baixa correlação supracitada, avalia-se que o *overbreak* pode ter maior relação com um (ou mais de um) dos parâmetros que compõe o RMR, e que, para tanto, a análise de correlação entre *overbreak* e RMR deve partir de uma análise individual dos parâmetros que compõe essa classificação geomecânica.

Ademais, em se tratando dos parâmetros construtivos, foi descartada a possibilidade de *overbreak* decorrente de desvios de furação acidentais, visto que a utilização de sistemas de automação e monitoramento como o TCAD contribui para uma maior precisão das perfurações em termos de profundidade, alinhamento e angulação. Entretanto, o *overbreak* técnico ainda pode ser associado às escolhas do plano de fogo, no que diz respeito à sequência de disparos, razão de carga e técnica de detonação controlada.

Ainda em uma outra análise, foi avaliada a influência da área da seção transversal na magnitude do *overbreak*, verificando-se que em seções de maior área o percentual de *overbreak* médio associado é maior.

De modo geral, com base no levantamento bibliográfico e nos resultados da pesquisa pode-se afirmar que o *overbreak* é um fenômeno resultante de interações complexas entre parâmetros construtivos, geológicos e geométricos. Em se tratando da correlação do *overbreak* com o RMR, conclui-se que há um caminho longo a ser percorrido para a obtenção de resultados completos, que considerem todos os vieses da análise.

Por fim, acredita-se que os objetivos propostos foram alcançados e, nesse sentido, espera-se que esse trabalho possa servir como uma referência para futuros estudos sobre o *overbreak* em túneis.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuação do presente trabalho, recomenda-se o aprofundamento das análises de correlação entre o *overbreak* e outros parâmetros geológicos, bem como a investigação da correlação entre o *overbreak* e parâmetros construtivos, como por exemplo os ângulos de desvio das perfurações perimetrais da seção, referentes à

condição de conicidade da escavação – os valores desse parâmetro podem ser obtidos nos relatórios emitidos pelo *software* TCAD.

Para a realização das análises propostas, sugere-se a construção de uma base de dados mais sólida, que pode ser elaborada a partir de uma pesquisa documental minuciosa, ou mesmo a partir da coleta em campo durante as obras.

Ademais, como extensão desse trabalho recomenda-se também o desenvolvimento de modelos preditivos. A previsão do modo de ocorrência do *overbreak* tende a ser uma medida eficiente para a minimização dos seus impactos, pois pode ser utilizada como um recurso estratégico na tomada de decisão em relação ao plano de fogo. Os modelos de previsão podem ser elaborados a partir de métodos experimentais, simulações numéricas ou ainda técnicas de Inteligência Artificial (IA).

Os modelos experimentais são elaborados com o emprego de regressões multivariadas lineares ou não lineares, em que o *overbreak* assume o posto de variável dependente enquanto seus parâmetros explicativos são considerados como variáveis independentes. Alguns autores que desenvolveram modelos de previsão de *overbreak* nesses moldes foram: Jang e Topal (2013), Mohammad et al. (2015), Mottahedi *et al.* (2017) e Mohammadi (2017).

Já as simulações numéricas, como o próprio nome sugere, permitem avaliar com precisão as características e o comportamento de um sistema real de escavação de um túnel e a forma como ocorrem as modificações no mesmo. Nesse caso, a ocorrência de *overbreak* é prevista por meio de um modelo computacional que replica as condições de um maciço e a ação dos explosivos sobre ele. Esse tipo de modelo foi empregado por Darai e Zare (2018), para a previsão do *overbreak* gerado em um túnel rodoviário localizado no Islã.

As técnicas de IA, por sua vez, emulam o raciocínio humano na solução de problemas que envolvem imprecisões, incertezas e carência de dados (Zadeh, 1994). Portanto, os modelos de previsão de *overbreak* que utilizam técnicas de IA são mais sofisticados e complexos, mas altamente eficientes na abordagem de problemas que envolvem a mecânica de maciços rochosos – meios heterogêneos e anisotrópicos, conseqüentemente de difícil interpretação.



As técnicas de IA mais empregadas em modelos preditivos são as Redes Neurais Artificiais (RNAs), que constituem sistemas de Aprendizagem de Máquina (*Machine Learning*), e a Lógica Fuzzy. Alguns autores que desenvolveram modelos de previsão de *overbreak* utilizando essas técnicas de IA foram: Jang e Topal (2013), Mohammad et al. (2015), Mottahedi *et al.*(2017).

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. B. **Noções básicas sobre metodologia de pesquisa**. DTGI-ECI. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://mba.eci.ufmg.br/downloads/metodologia.pdf>

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. **Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support**. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 106.

BASTOS, M. J. N. A.. **A Geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1998.

BIENIAWSKI, Z. T., **Engineering classification of jointed rock masses**. Civil

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering rock mass classifications**. John Wiley & Sons, New York, 251 p. 1989.

CAMPANHÃ, C. A.; BOSCOV, P. **Manual NATM**. Manual Técnico Figueiredo Ferraz/CBPO. 1994. 111p.

CHAKRABORTY, A. K.; RAINA, A.K.; RAMULU, M.; CHOUDHURY, P. B; HALDAR, A.;

SAHOO, P.; BANDOPADHYAY, C. **Development of rational models for tunnel blast prediction based on a parametric study**. Geotechnical and Geological Engineering 22: 477-496. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 2004.

CHAPMAN, D., METJE, N., STARK, A. **Introduction to Tunnel Construction**. Spon Press. 2010.

CLARKE, T. A. **A review of tunnel profiling methods**. International Review Paper. 1996.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. **Plano Básico Ambiental: Linha 5 – Lilás – Trecho Largo Treze – Chácara Klabin com pátio Guido Caloi**. 2010. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/obras/pdf/linha-5-lilas/pba-anexo.pdf>

CONCESSIONÁRIA TAMOIOS. **A Rodovia**. Disponível em: <https://www.concessionariatamoios.com.br/a-rodovia/a-rodovia>

DARAEI, A.; ZARE, S. **Prediction of overbreak depth in Ghalaje road tunnel using strength factor**. International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.04.013>

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER/SP). **Instrução de Projeto IP-DE-C00/002: Projeto de Túnel**. São Paulo: DER/SP, 2005c. Disponível em: [ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-C00-002\\_A.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-C00-002_A.pdf)

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual De Custos De Infraestrutura De Transportes**. Volume 10 - Conteúdo 07 - Obras de Arte Especiais. 2017.

DICK, R. A.; FLETCHER, L. R.; D'ANDREA, D. V. **Explosives and Blasting Procedures**. ABA Publishing Company, Washington, USA. 1986. Engineer in South Africa 15. 1973.

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO. **Classificação de maciços rochosos – Capítulo 5**. Geologia da engenharia. Disponível em: [https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap\\_5\\_GE.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_5_GE.pdf)

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels: Civil Elements**. Washington, D.C.: FHWA, dec. 2009. Disponível em: [https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/tunnel\\_manual.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/tunnel_manual.pdf).

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). U.S. Department of Transportation. **Rock Blasting and Overbreak Control**. Virginia: FHWA, Dec. 1991. 430 p. [.pdf].

FIELD, A. **Descobrimos a estatística usando o SPSS**. São Paulo: Artmed, 2009.

FODERÀ, G.M. VOZA, A.; BAROVERO, G.; TINTI, F.; BOLDINI, D.; **Factors influencing overbreak volumes in drill-and-blast tunnel excavation**. A statistical analysis applied to the case study of the Brenner Base Tunnel – BBT. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 105. Nov., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103475>

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

GUIMARÃES, P. R. B. **Métodos quantitativos estatísticos**. 1.ed. rev.. Curitiba, PR : IESDE Brasil, 2012.

HEMPHILL, Gary B. **Practical Tunnel Construction**. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. 2013.

IBARRA, J. A.; MAERZ, N. H.; FRANKLIN, J. A. **Overbreak and underbreak in underground openings Part 2: and implications**. Geotechnical Geological Engineering, 1996; 14:325–40.

INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA). **Guidelines on Contractual Aspects of Conventional Tunnelling**. ITA Working Group n°19 – Conventional Tunnelling. ITA Report n° 013. Avignon: ITA, May, 2013. 15 p. [.pdf].

INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (ITA). **General Report on Conventional Tunnelling Method**. ITA Working Group Conventional Tunnelling. ITA Report n° 002. Avignon: ITA, April, 2009. 27 p. [.pdf].

JANG, H.; TOPAL, E. **Optimizing over break prediction based on geological parameters comparing multiple regression analysis and artificial neural network**. International Journal of Mining and Technology. 2013.

JIMENO, Lopez. **Manual de túneles y obras subterráneas**. Madrid, 1997. 1078 p. [.pdf].

KOLYMBAS, Dimitrios. **Tunneling and Tunnel Machines**. In Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53). 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

LEICA GEOSYSTEMS AG. **Leica FlexLine tunnel application**. 2016. (9m44s). Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=m2dq-uR7Bf8&ab\\_channel=LeicaGeosystemsAG](https://www.youtube.com/watch?v=m2dq-uR7Bf8&ab_channel=LeicaGeosystemsAG)

LOPES, M. M.; BRANCO, V. T. S. C.; SOARES, J. B. **Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação**. TRANSPORTES v. 21, n. 1, 2013, p. 59–66. ISSN: 2237-1346 (online). DOI:10.4237/transportes.v21i1.566.

MAERZ, N. H.; IBARRA, J. A.; FRANKLIN, J. A. **Overbreak and underbreak in underground openings Part 1: Measurement using the light sectioning method and digital image processing**. Geotechnical and Geological Engineering, 14(4), 307–323. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00421946>

MAIA, A. **Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha**. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/311908053\\_Metodos\\_Probabilisticos\\_Aplicados\\_a\\_Estabilidade\\_de\\_Taludes\\_e\\_Cavidades\\_em\\_Rocha](https://www.researchgate.net/publication/311908053_Metodos_Probabilisticos_Aplicados_a_Estabilidade_de_Taludes_e_Cavidades_em_Rocha)

- MANDAL, S. K.; SINGH, M. M. **Evaluating extend and causes of overbreak in tunnels.** Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 24, Issue 1, January 2009, Pages 22-36. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.01.007>
- MARTINHO, José Fernando. **O uso de explosivos na escavação de túneis: implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folhas de cálculo.** Dissertação de mestrado – Universidade do Porto, Portugal, 2012.
- MOHAMMAD, M.; HOSSAINI, M. F.; MIRZAPOUR, B.; HAJIANTILAKI, N. **Use of fuzzy set theory for minimizing overbreak in underground blasting operations - A case study of Alborz Tunnel, Iran.** International Journal of Mining Science and Technology, 25(3), 439–445. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.03.01>
- MOHAMMADI, H.; BARATI, B.; CHAMZINI, A. Y. **Prediction of blast-induced overbreak based on geomechanical parameters, blastings factors and the area of tunnel face.** Geotechnical and Geological Engineering Vol. 36, pages 425–437. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0336-3>
- MOTTAHEDI, A.; SERESHKI, F.; ATAEI, M. **Development of overbreak prediction models in drill and blast tunneling using soft computing methods.** *Engineering with Computers.* 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0520-3>
- MURAKAMI, Cláudio A. **Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis.** Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2001.
- NEUENSCHWANDER, M.; MARULANDA, A. **Measuring the excavation and lining in the Emerald Book.** Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art. Taylor & Francis Group, London, 2019. Disponível em: [https://tunnelbuilder.it/uploads/CMS/Documents/Week2019\\_WTC\\_Emerald%20Book\\_ch480.pdf](https://tunnelbuilder.it/uploads/CMS/Documents/Week2019_WTC_Emerald%20Book_ch480.pdf)
- NIEBLE, Carlos M. **Desmontes cuidadosos com explosivos: aspectos de engenharia e ambientais.** Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2017.
- OLIVEIRA, Bruno. **Coeficientes de correlação.** Oper. 23, agosto, 2019. Disponível em: <https://operdata.com.br/blog/coeficientes-de-correlacao/>
- PAES, A. T. **Por dentro da estatística.** Einstein: Educação Contínua em Saúde. 2009; 7(1 Pt 2): 3-4. Disponível em: [http://apps.einstein.br/revista/arquivos/PDF/1173-ECv7n1\\_3-4.pdf](http://apps.einstein.br/revista/arquivos/PDF/1173-ECv7n1_3-4.pdf)
- PIRES, Ana C. G.; ALELVAN, Giovanna M.; ASSIS, André P. **Influência do método construtivo de túneis convencionais em seus aspectos contratuais.** 10º Simpósio

Internacional de Qualidade Ambiental. Disponível em: [http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/\\_arqTrabalhos/trab\\_20160905195310000000995.pdf](http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160905195310000000995.pdf)

SANTOS, R. P. (2017). **Um conceito de tuneladora com jato de água e fio diamantado como princípio de corte de rochas brandas**. Tese de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

SATICI, Özgür. (2000). **Drilling and blasting as a tunnel excavation method**. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2991.2400>

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

ST J TOSE, S. **A review of the design criteria and practical aspects of developing a successful pre-split**. Proceedings International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, Cape Town, South Africa, 3–6 April 2006. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 525–546.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. **Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação**. Revista HCPA. 2012;32(2):227-234. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/158102/000856645.pdf?sequence=1>

VAN ELDERT, J., 2017. **Measuring of Over-Break and the Excavation Damage Zone in Conventional Tunneling**. World Tunnel Congress. Bergen, Norway, 2017.

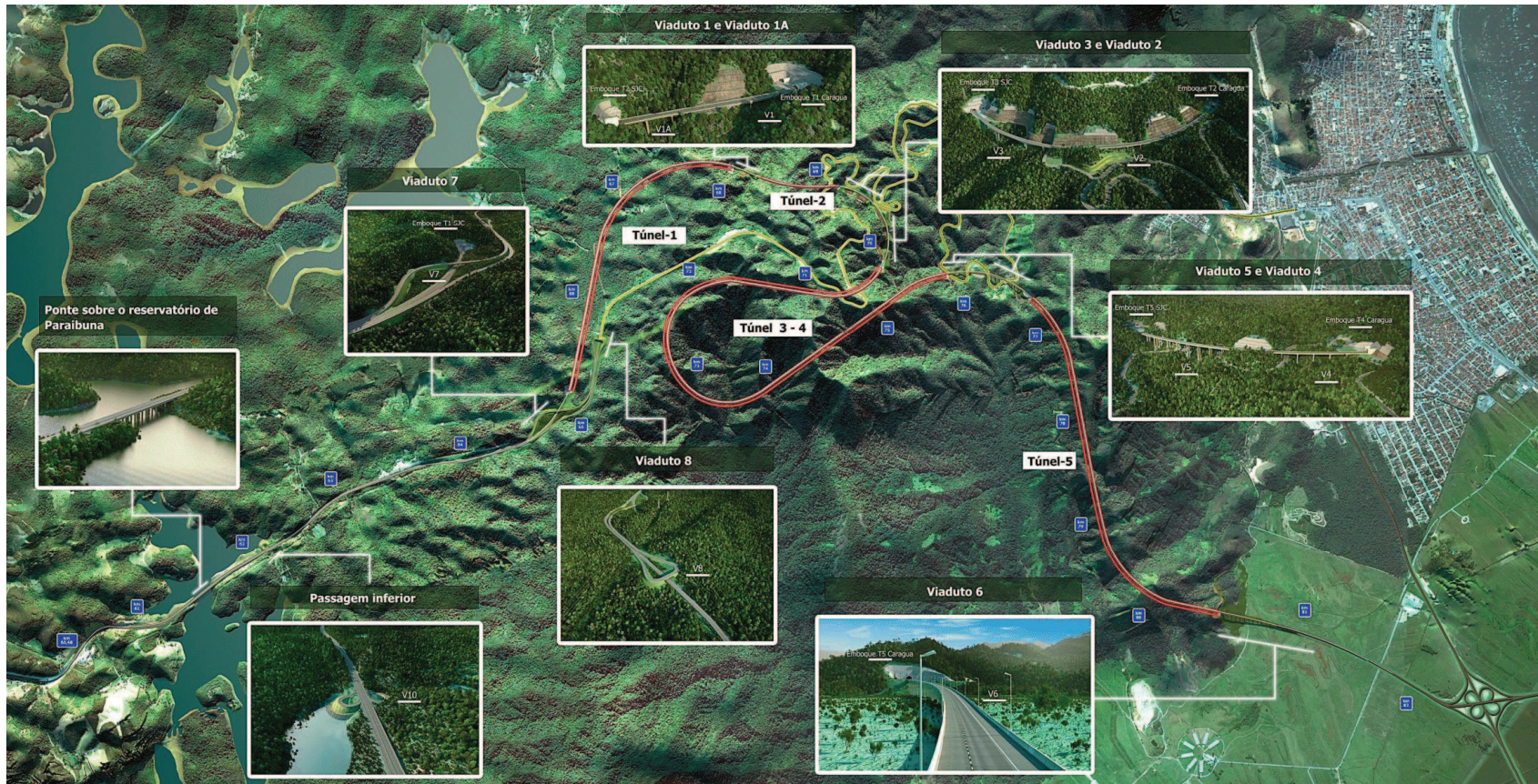
VERMA, H. K.; SAMADHIYA, N. K.; SINGH, M.; GOEL, R. K.; SINGH, P. K. **Blast induced rock mass damage around tunnels**. Tunnelling and Underground Space Technology, 71, 149–158. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.019>

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

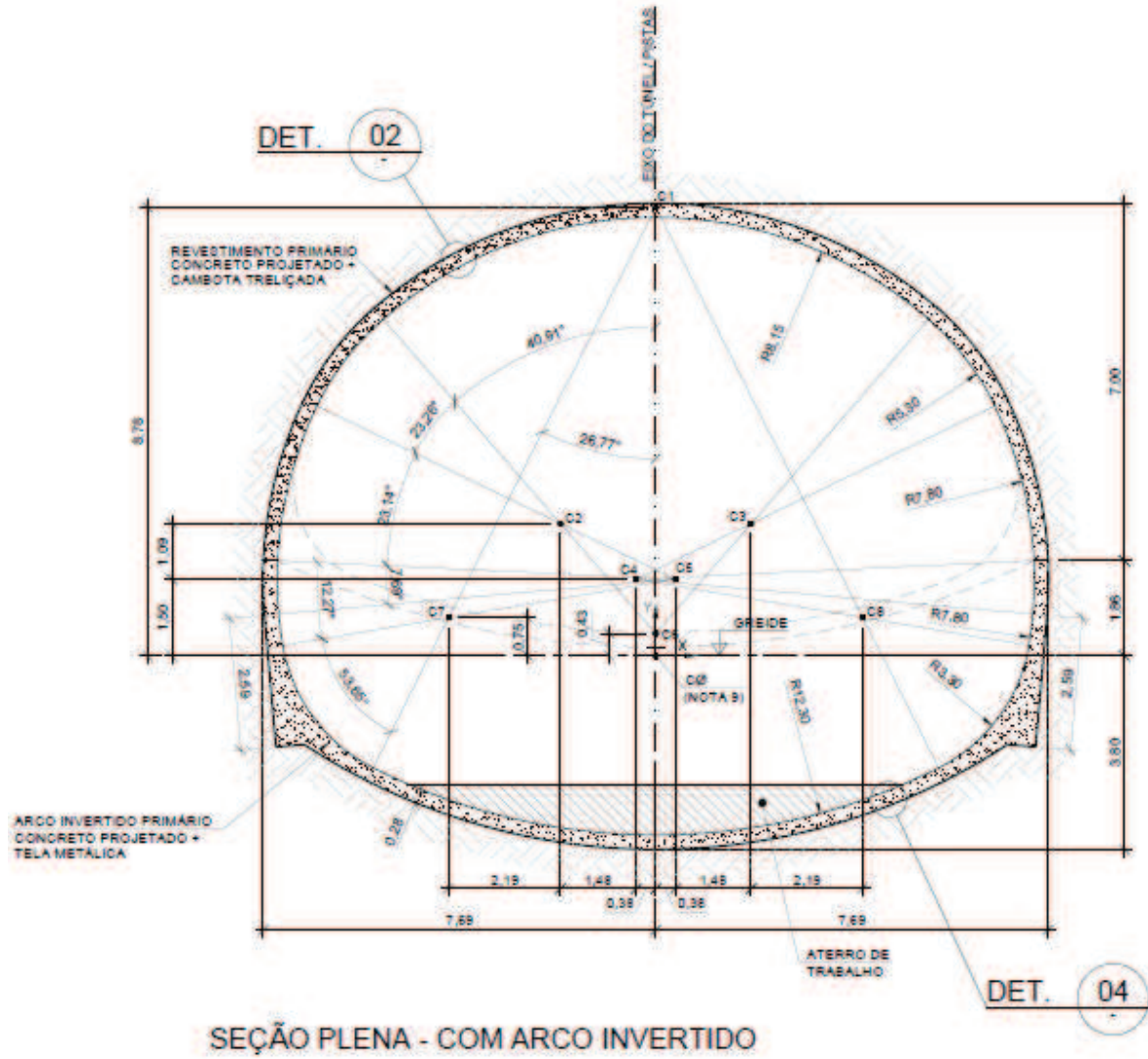
ZADEH, L.A. **Soft computing and fuzzy logic**, Softw. IEEE 11 (1994) 48–56. Disponível em: <http://projectsweb.cs.washington.edu/research/projects/multimedia5/JiaWu/review/Cite2.pdf>

# ANEXOS

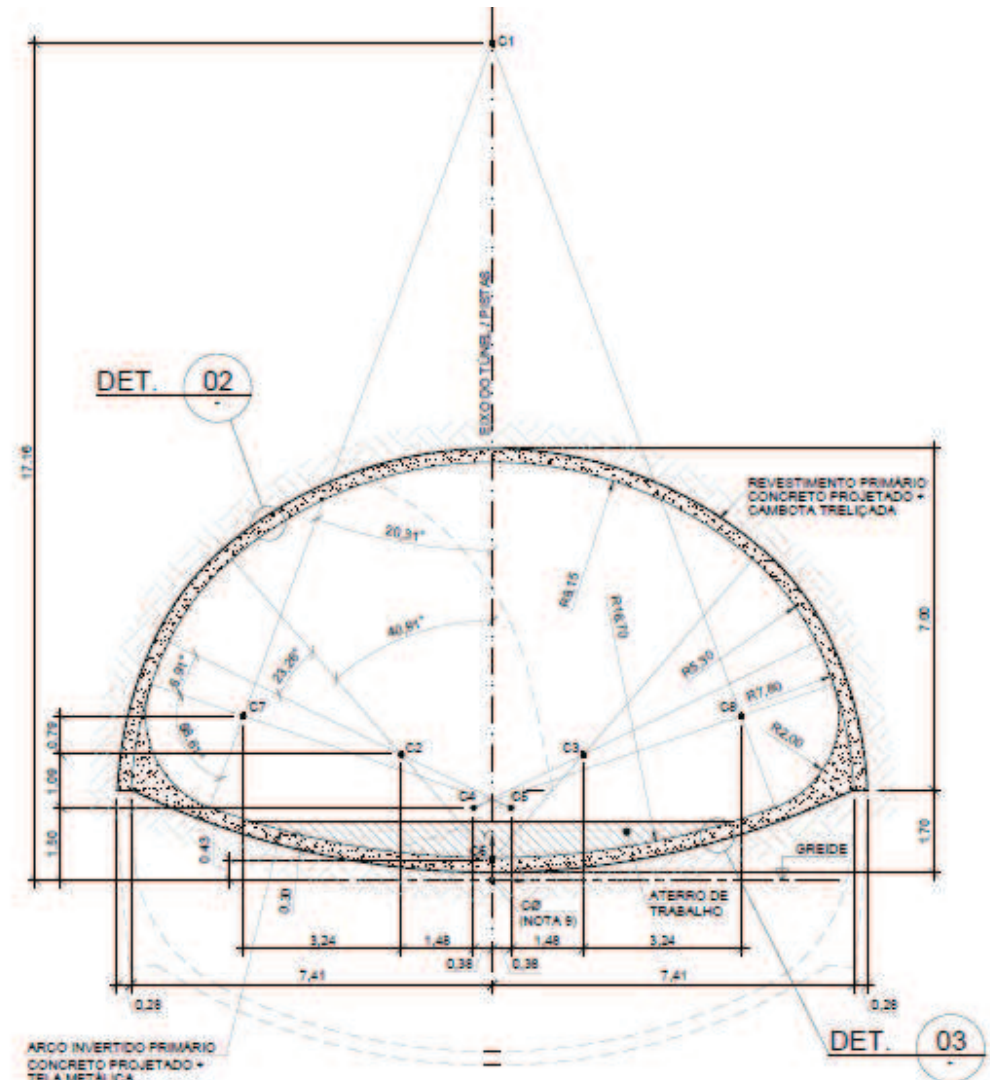
## ANEXO I: MAPA DO EMPREENDIMENTO DE DUPLICAÇÃO DA RODOVIA TAMOIOS (SP-99)



ANEXO II: SEÇÕES TIPO S1 E S2

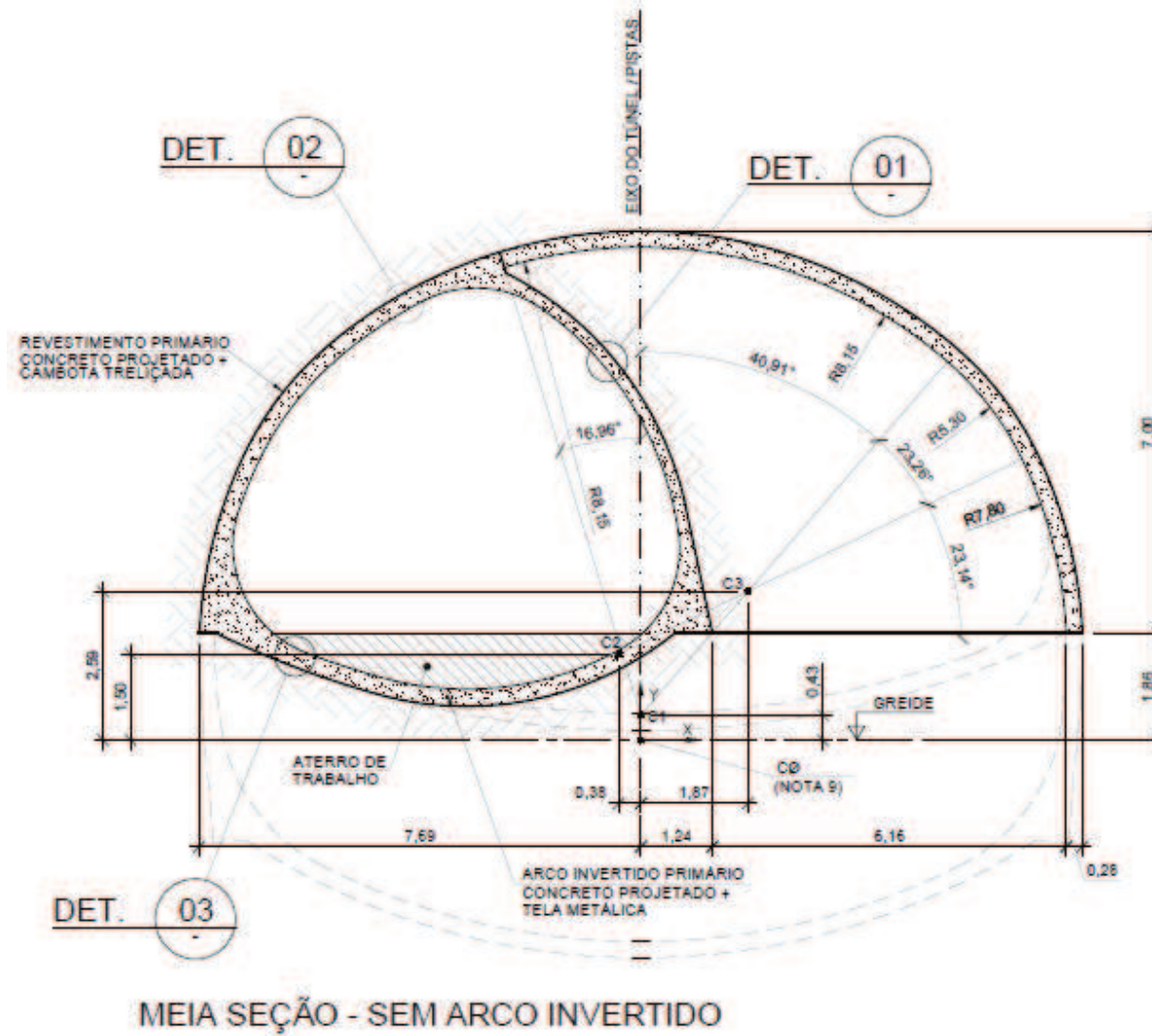




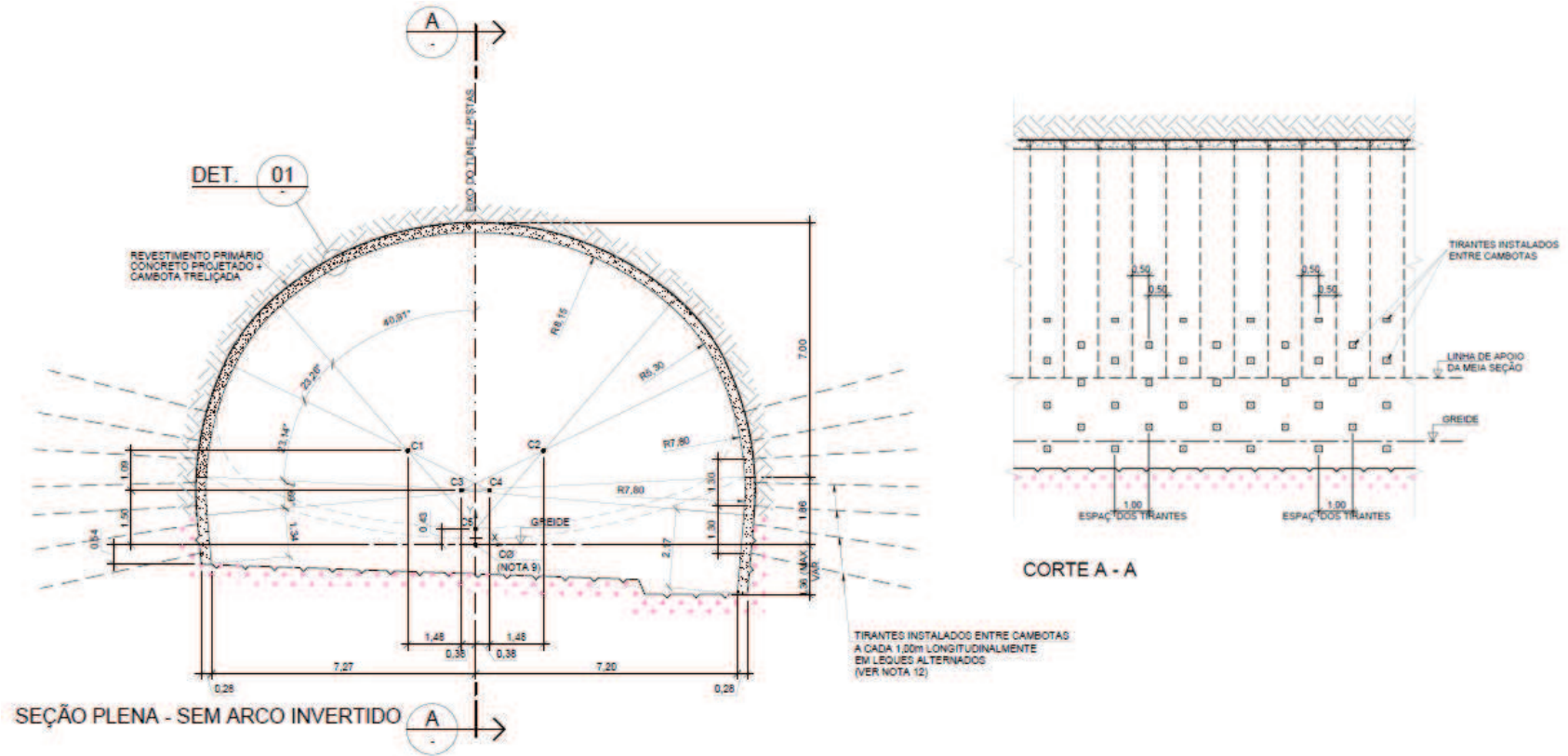


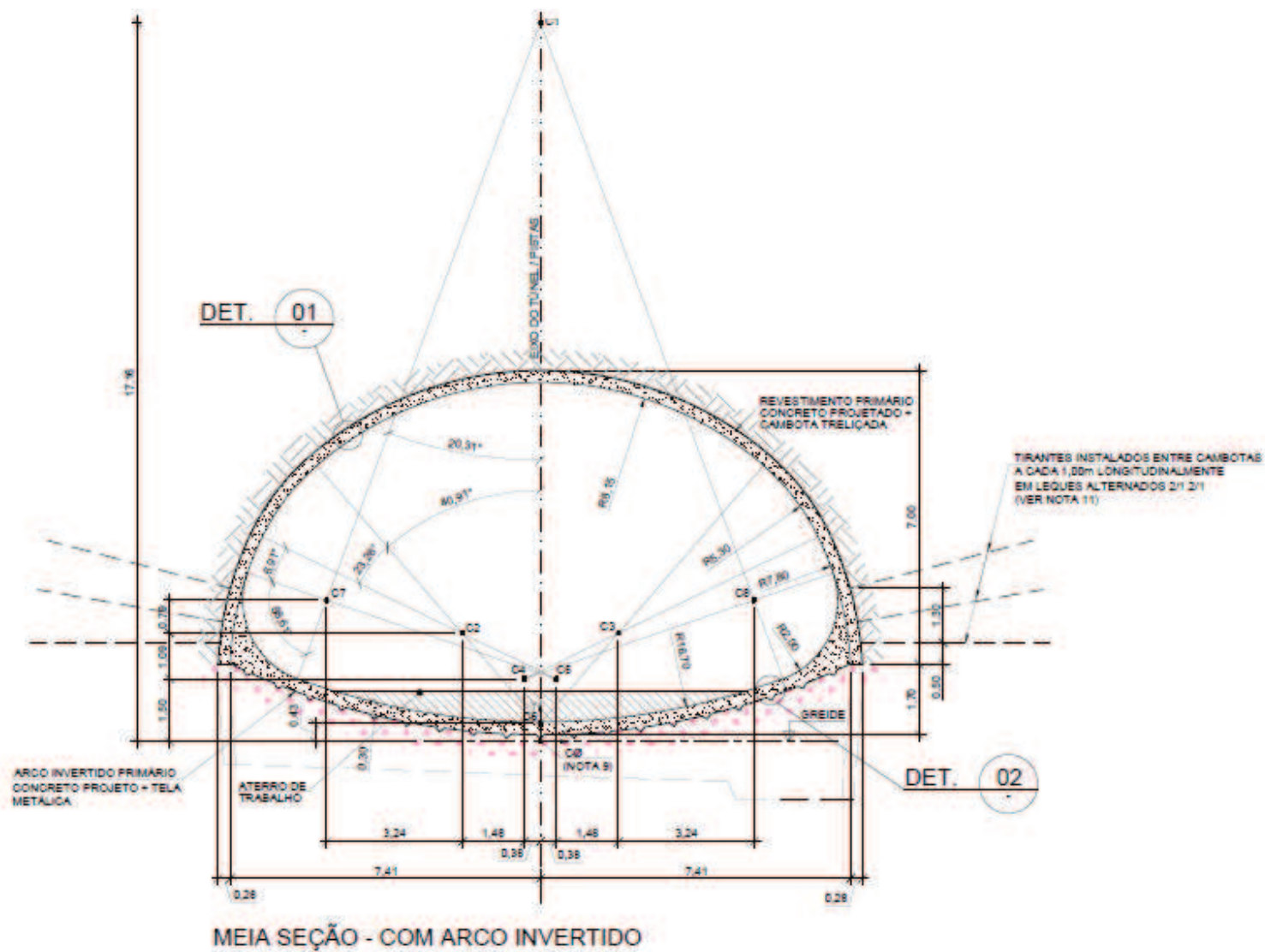
MEIA SEÇÃO - COM ARCO INVERTIDO

## ANEXO III: SIDE DRIFT SEÇÃO TIPO S1

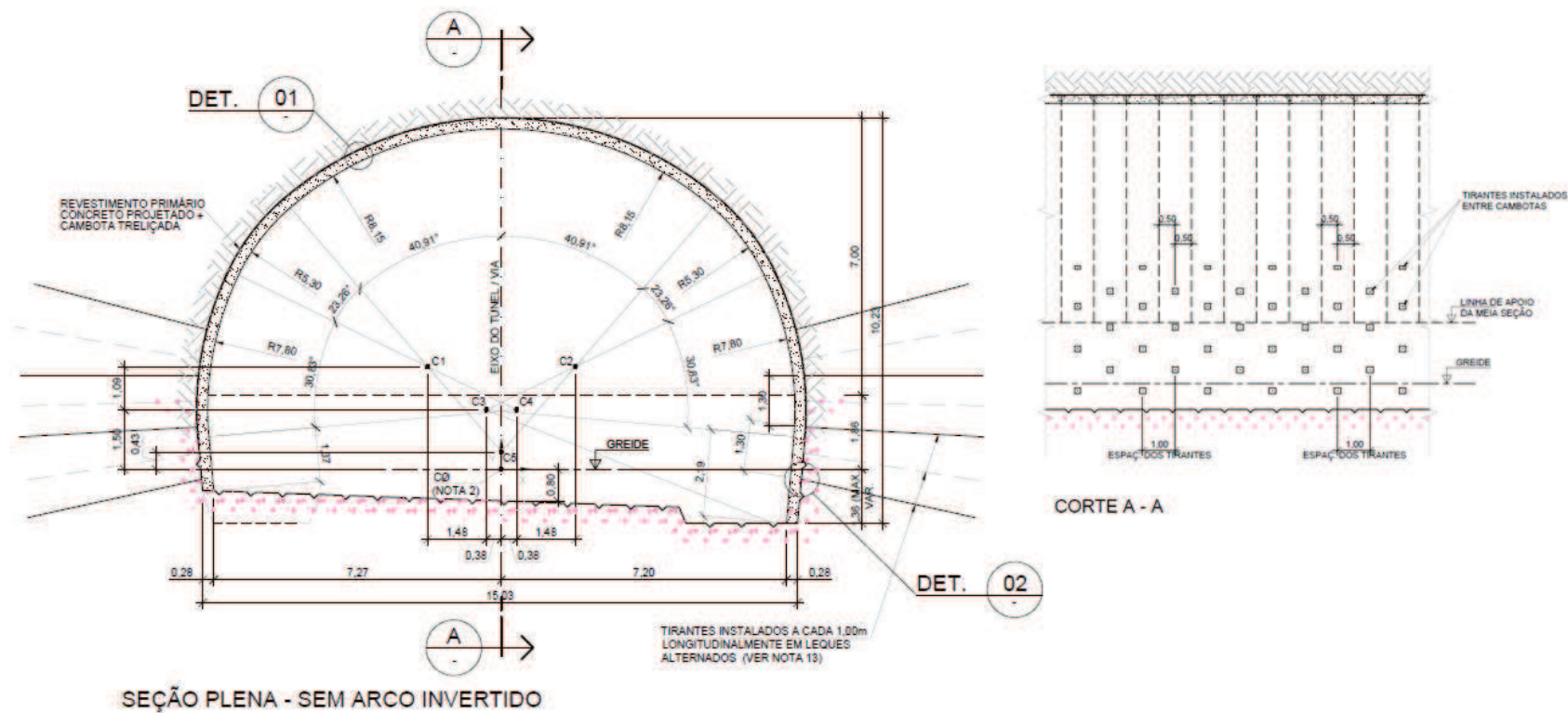


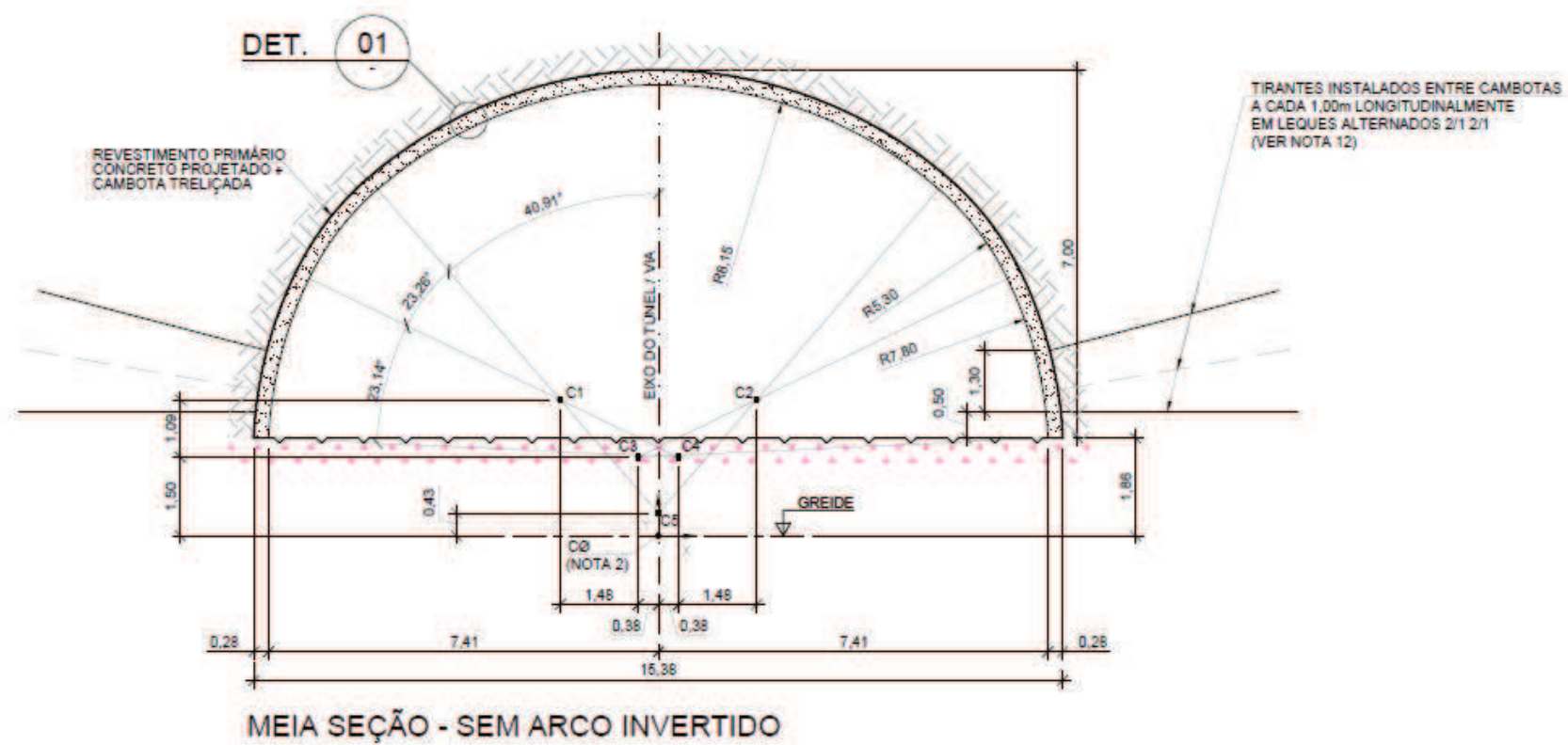
### ANEXO IV: SEÇÃO TIPO M1



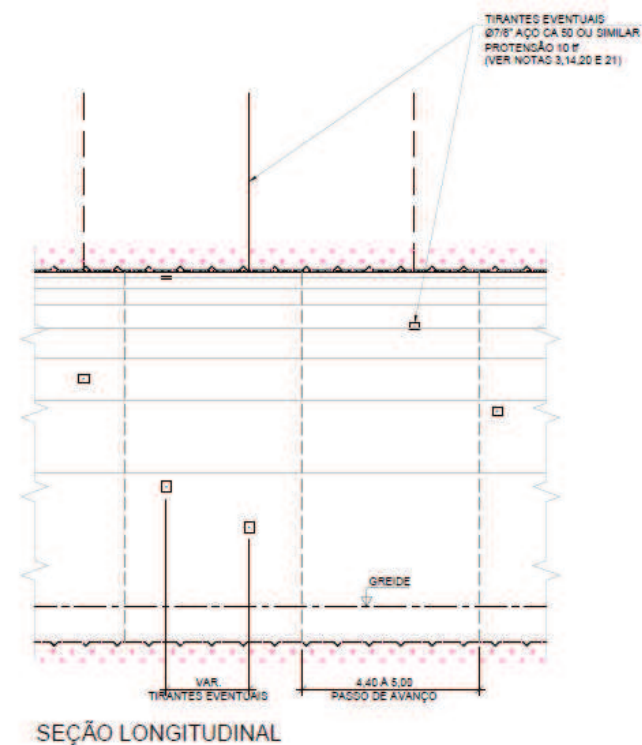
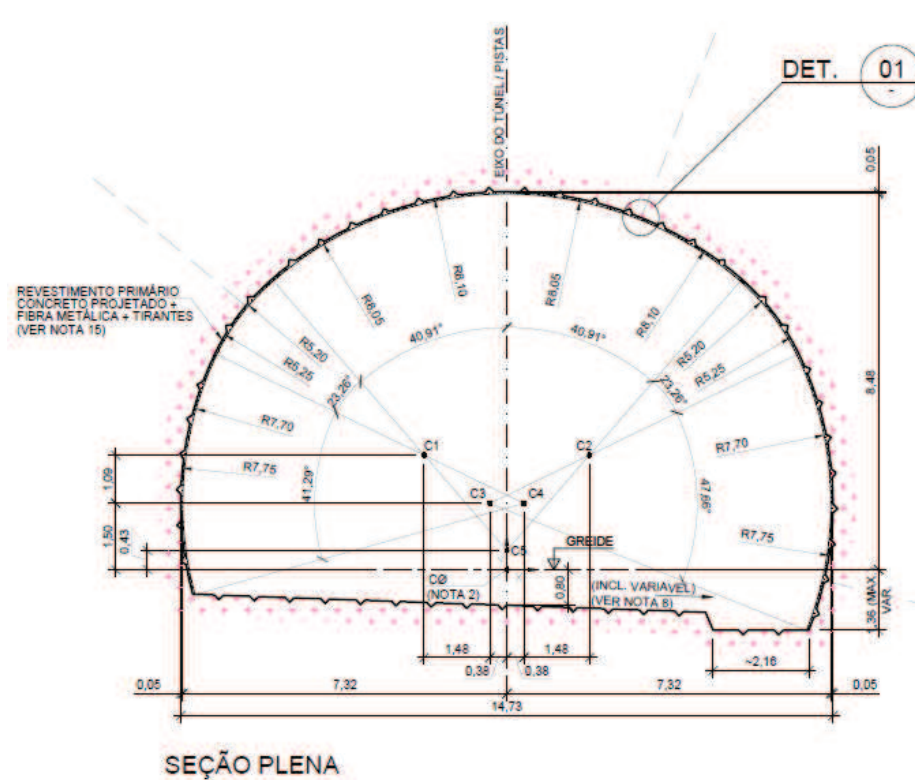


ANEXO V: SEÇÃ TIPO M2

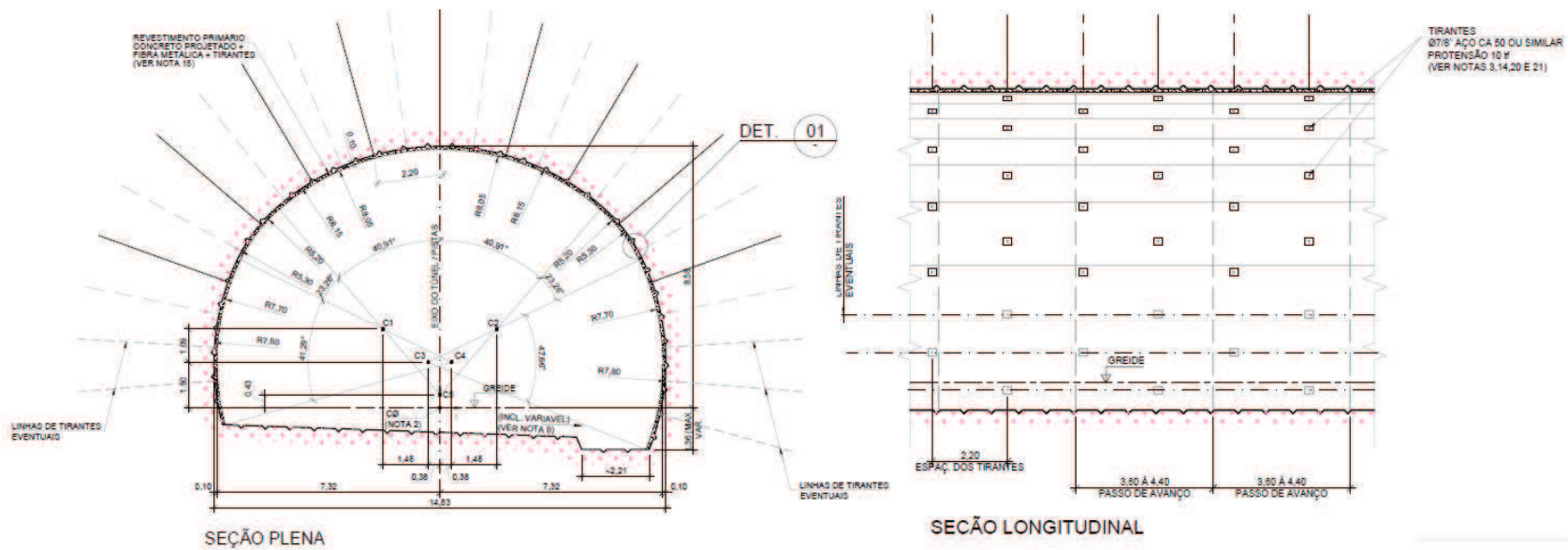




ANEXO VI: SEÇÃO TIPO R1



ANEXO VII: SEÇÃO TIPO R2









ANEXO X: PROJETO DE ENFILAGENS

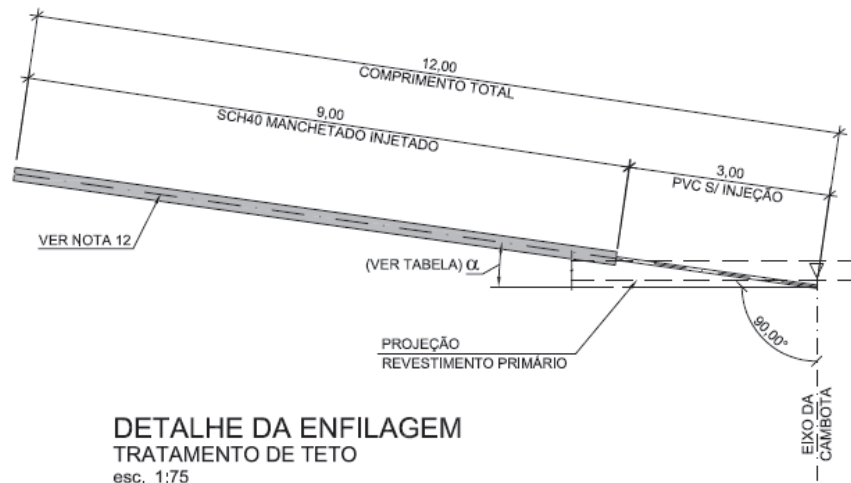
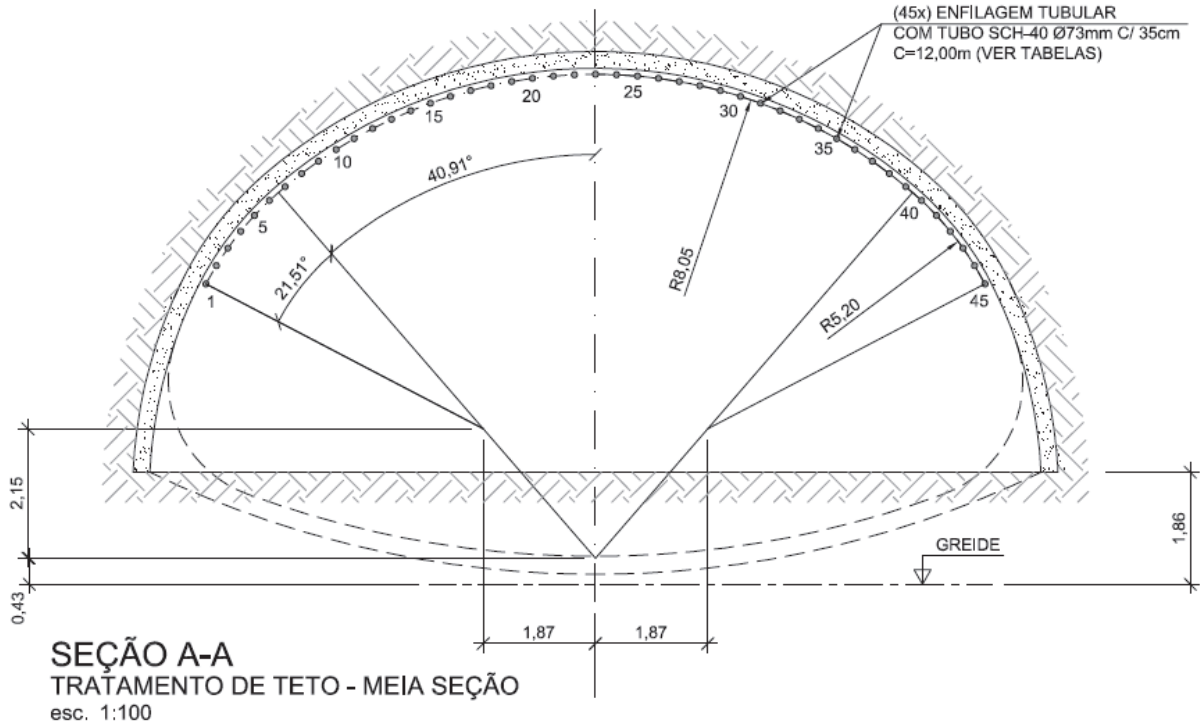
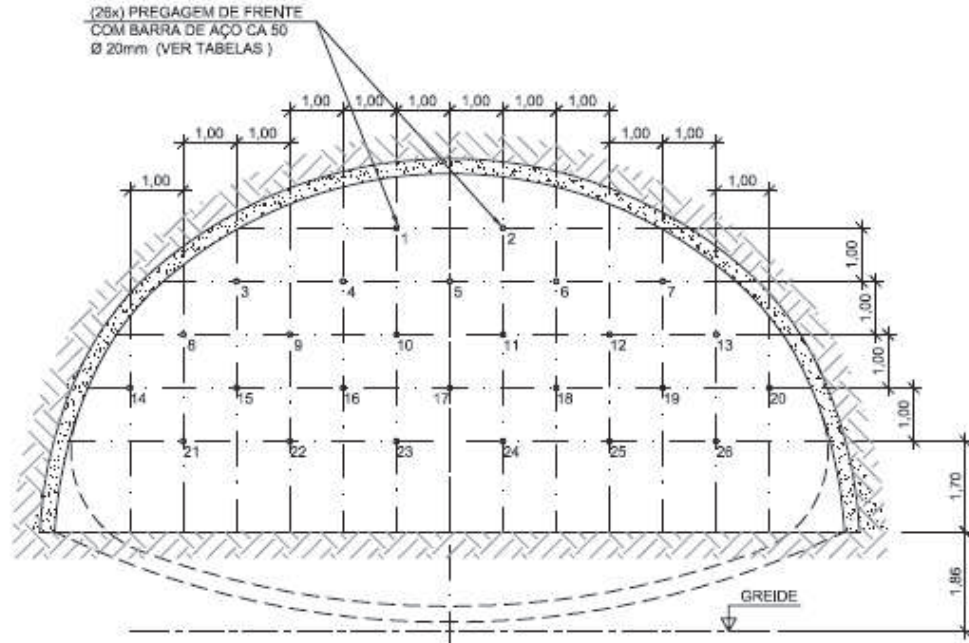


TABELA			
TRATAMENTO DE TETO - MEIA SEÇÃO			
LINHA	COMPRIMENTO (m)		ÂNGULO $\alpha$
	SEM INJEÇÃO	INJETADO	
1 ao 45	3,00	9,00	10,00°

ANEXO XI: PROJETO DE PREGAGENS



**SEÇÃO A-A**  
 TRATAMENTO DE FRENTE - MEIA SEÇÃO  
 AVANÇO TÍPICO  
 esc. 1:100

TABELA TRATAMENTO DE FRENTE - MEIA SEÇÃO SEÇÃO A-A - AVANÇO TÍPICO		
LINHA	COMPRIMENTO (m)	ÂNGULO* $\alpha$
1 ao 26	9,70	1,00°

\* (VER NOTA 3)

## APÊNDICES

### APÊNDICE A: AMOSTRA DE OVERBREAK E RMR

Estaca do <i>Overbreak</i>	<i>Overbreak</i> (m <sup>2</sup> )	Estaca do Mapeamento	RMR	Estaca do <i>Overbreak</i>	<i>Overbreak</i> (m <sup>2</sup> )	Estaca do Mapeamento	RMR	Estaca do <i>Overbreak</i>	<i>Overbreak</i> (m <sup>2</sup> )	Estaca do Mapeamento	RMR
10786	13,92	10785+19,80	39	10765	12,04	10764+18,00	68	10744	13,90	10743+17,30	71
10785	13,07	10784+19,00	47	10764	11,50	10763+19,40	61	10743	10,42	10742+15,60	71
10784	6,58	10784	31	10763+2,00	9,80	10762+19,60	60	10742	11,64	10741+15,80	60
10783	9,50	10782+17,02	63	10762+2,00	9,83	10762+0,1	71	10741	11,56	10740+17,85	47
10782+4,00	6,71	10781+19,74	51	10761	8,89	10760+15,50	70	10740	6,33	10739+17,01	43
10780+18,00	8,13	10780+15,57	53	10760	4,59	10759+16,63	73	10739	10,05	10738+17,10	43
10780	6,24	10779+19,46	58	10759	4,74	10758+18,39	71	10738	9,92	10737+17,60	56
10778+18,00	8,84	10778+18,00	33	10758	9,08	10757+19,60	73	10737	9,64	10736+18,24	48
10778	13,13	10777+18,40	61	10757	5,13	10756+16,82	70	10736	13,26	10735+19,00	35
10777	8,57	10776+19,16	57	10756	7,32	10755+17,24	63	10735	9,61	10734+18,60	28
10776	10,98	10775+18,00	47	10755	8,46	10754+16,75	55	10734	8,24	10733+15,00	50
10775	13,03	10774+18,55	38	10754	5,85	10753+17,80	49	10733	8,74	10732+18,00	50
10774	3,80	10774	48	10753	8,32	10752+17,92	54	10732	6,31	10731+14,00	41
10773	3,25	10772+19,20	32	10752	5,95	10751+17,94	66	10731	9,27	10730+19,30	38
10772+2,00	4,94	10772+2,00	17	10751	7,44	10750+18,35	58	10730	11,83	10729+19,78	41
10771+8,00	6,42	10771+7,33	19	10750	5,56	10749+19,44	63	10729	8,40	10728+17,30	31
10770	5,34	10769+19,18	42	10749	3,43	10749	65	10728	10,35	10727+18,89	27
10768+18,00	5,96	10768+15,50	48	10748	10,75	10747+16,90	70	10727	8,67	10726+19,00	26
10768	7,71	10768+16,20	59	10747+2,00	4,08	10746+19,11	66	10726	5,83	10725+19,86	44
10767	5,07	10766+16,87	68	10746	10,54	10745+15,40	70	10725	10,47	10724+19,75	35
10766+6,00	8,90	10766+3,90	63	10745	4,75	10744+16,80	70	10724+2,00	10,15	10723+18,50	38

<b>Estaca do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>	<b>Estaca do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>	<b>Estaca do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>
10723	8,56	10722+18,35	45	10698	11,28	10697+12,40	45	10676+2,00	12,19	10675+14,80	51
10722+2,00	3,64	10721+14,29	46	10697	10,17	10696+17,35	41	10675	12,70	10674+15,30	51
10721+2,00	7,40	10720+19,40	50	10696	14,39	10695+13,40	29	10674	9,46	10673+15,90	53
10720	11,87	10719+15,30	48	10695	9,90	10694+13,20	34	10673	9,81	10672+17,40	45
10719	8,65	10718+17,50	46	10694+2,00	12,81	10694+0,10	28	10672	13,54	10671+17,55	41
10718+2,00	9,44	10717+19,30	56	10693	11,78	10692+15,20	34	10671	10,67	10670+17,01	39
10717	8,99	10716+15,75	56	10692	10,47	1691+18,00	33	10670	13,63	10669+19,30	41
10716	6,80	10715+11,70	52	10691	10,08	10690+16,60	50	10669+2,00	12,39	10668+18,90	41
10715	8,47	10714+17,70	57	10690	10,29	10689+18,05	52	10668	9,28	10667+18,40	40
10714+2,00	5,86	10713+17,90	61	10689+2,00	9,84	10688+19,30	54	10667	12,95	10666+15,90	41
10713+2,00	8,25	10712+18,70	62	10688	8,92	10687+15,30	51	10666+2,00	22,94	10665+16,80	39
10712	8,92	10711+19,14	53	10687	10,72	10686+15,50	68	10665	16,25	10664+12,54	44
10711+2,00	9,23	10710+19,60	38	10686	9,85	10685+17,70	68	10664+2,00	9,36	10663+19,50	50
10710+16,00	14,39	10710+13,50	33	10685	10,49	10684+16,66	68	10663+8,00	9,93	10663+4,59	49
10706	6,23	10705+18,02	32	10684	8,33	10683+17,56	63	10662	12,96	10661+19,54	37
10705	4,58	10704+16,82	34	10683	5,44	10682+13,6	57	10661	10,17	10660+15,24	40
10704+2,00	9,45	10703+18,60	26	10682	12,53	10681+19,40	51	10660	9,79	10659+19,07	51
10703	16,20	10702+19,90	31	10681	8,06	10780+6,70	53	10659	6,30	10658+16,46	67
10702	6,05	10701+17,30	35	10680	6,37	10679+17,30	53	10658	7,73	10657+18,11	63
10701	11,56	10700+18,20	40	10679	8,60	10678+19,20	53	10657	6,70	10656+19,79	49
10700	11,19	10699+18,30	40	10678	10,24	10677+17,01	54	10656	9,41	10655+18,39	51
10699	13,25	10698+18,40	40	10677	8,74	10676+18,10	56	10655	9,12	10654+16,58	39

<b>Estaca do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>	<b>Estaca do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>	<b>Estaca do Overbreak</b>	<b>Overbreak (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estaca do Mapeamento</b>	<b>RMR</b>
10654	34,92	10653+17,19	45	10633	16,63	10632+17,31	44	10612	8,05	10611+19,78	48
10653	5,27	10652+18,05	42	10632	14,63	10631+14,61	49	10611+12,000	7,08	10611+4,58	45
10652	10,40	10651+9,50	42	10631	9,81	10630+19,31	50	10610+2,000	10,65	10609+15,93	54
10651	9,51	10650+16,38	44	10630	9,75	10629+17,66	52	10609	5,03	10608+17,08	40
10650	5,04	10649+19,04	53	10629	8,77	10526+18,56	52	10608	8,66	10607+18,30	50
10649	8,38	10648+15,32	53	10628	8,84	10627+17,25	59	10607	8,34	10606+15,90	46
10648	7,66	10647+17,47	56	10627	9,31	10526+12,06	61	10606	4,93	10605+12,00	49
10647	7,54	10646+19,53	56	10626	11,43	10625+13,66	52				
10646	12,02	10645+16,27	62	10625	11,74	10624+16,06	51				
10645	9,49	10644+17,80	38	10624	10,90	10623+17,11	59				
10644	10,11	10643+19,80	44	10623	5,86	10622+18,21	57				
10643	13,39	106417,57	42	10622	17,50	10621+15,41	47				
10642	11,39	10641+13,87	49	10621	9,58	10620+18,36	59				
10641	9,97	10640+17,84	37	10620	14,33	10619+19,86	56				
10640	8,65	10639+19,73	43	10619	8,80	10618+17,60	55				
10639	13,02	10638+10,47	50	10618	10,50	10617+17,80	33				
10638	7,56	10637+16,65	41	10617	10,87	10616+14,50	40				
10637	11,63	10636+18,54	43	10616	14,39	10615+17,50	46				
10636	16,29	10635+12,91	42	10615	9,05	10614+16,05	42				
10635	10,10	10634+19,66	50	10614	8,05	10613+17,60	54				
10634	15,46	10633+15,86	49	10613	8,05	10612+18,05	45				