



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ESTUDO DE CASO: ESCAVAÇÃO E TRATAMENTO PARA EMBOQUE DE TÚNEL EM ROCHA UTILIZANDO O MÉTODO NATM - REGIÃO PORTUÁRIA, CENTRO DO RIO DE JANEIRO/RJ

André Magalhães Mascarenhas

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof^a. Elaine Garrido Vazquez

RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO de 2014

ESTUDO DE CASO: ESCAVAÇÃO E TRATAMENTO PARA EMBOQUE DE TÚNEL EM ROCHA UTILIZANDO O MÉTODO NATM - REGIÃO PORTUÁRIA, CENTRO DO RIO DE JANEIRO/RJ

André Magalhães Mascarenhas

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Elaine Garrido Vazquez
Profª. Adjunta, POLI/UFRJ (Orientadora)

Gustavo Vaz de Mello Guimarães
Engº. Civil, M. Sc, POLI/UFRJ

Ana Catarina Jorge Evangelista
Profª Associada, D. Sc, POLI/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO de 2014

Mascarenhas, André Magalhães

Estudo de caso: escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o método NATM - Região Portuária, Centro do Rio de Janeiro/RJ / André Magalhães Mascarenhas. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

VII, 64p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Elaine Garrido Vazquez.

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 53 – 55

1. Introdução. 2. Fundamentação teórica. 3. Aplicação do NATM / D&B em emboque com seção plena em rocha. 4. Considerações Finais.

I. Vazquez, Elaine Garrido. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Estudo de caso: escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o método NATM - Região Portuária, Centro do Rio de Janeiro/RJ

***Dedicado em memória do meu querido avô
Juvenal Barretto de Magalhães (1925 - 2014)***

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Paulo, por ser sempre meu maior exemplo de força, perseverança, determinação e superação para vencer todas as batalhas impostas pela vida, que me inspirou na conquista deste título de graduação.

À minha mãe, Licia, por todo o amor e por me ajudar a manter o foco, me incentivar e me apoiar de forma incondicional ao longo da vida.

Ao meu irmão, Vitor, por ser tão companheiro e amigo me ajudando a ter força para enfrentar a vida da forma mais leve e agradável possível.

À Sarah, por todo o companheirismo, a amizade, carinho e amor.

À professora Elaine, orientadora deste projeto de graduação, pelo seu empenho e dedicação no trabalho procurando sempre promover o melhor aos alunos da Escola Politécnica da UFRJ.

Aos grandes amigos que o curso me proporcionou encontrar Anália Torres, André Borges, Frederico Bandeira, Gabriel Vieira, Guilherme Taves, Lais Prado, Luis Felipe Torquato, Luiz Fernando Damasceno, Marcela Potting e Raul Governo, por terem feito parte do dia-a-dia desta conquista, dentro e fora da faculdade.

Aos amigos de Salvador, Caio Dantas, Caio Kremer, Melina Marambaia e Nathália Bustani por me inspirarem e ensinarem que vale a pena cultivar as verdadeiras amizades por toda a vida.

Ao meu tio e padrinho, Enio Silva, pelo apoio e por sempre acreditar no meu potencial como profissional.

Aos meus líderes e amigos Artur Siqueira e Marcelo Julião, pelo incentivo e dedicação através do exemplo profissional que me motivam a enfrentar os novos desafios que estão a caminho.

Obrigado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Estudo de caso: escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o método NATM - Região Portuária, Centro do Rio de Janeiro/RJ

André Magalhães Mascarenhas

Fevereiro / 2014

Orientador: Elaine Garrido Vazquez

O presente trabalho tem como objetivo descrever procedimento executivo de escavação e tratamento do emboque de um túnel em rocha fundamentado nos conceitos da metodologia de construção de túneis NATM (*New Austrian Tunneling Method*). A dissertação conta com uma revisão bibliográfica onde se apresenta o tema de forma teórica, abordando os princípios e conceitos que regem as escavações, os mecanismos de controle e instrumentação, procedimentos para escavações em rocha e equipamentos necessários para a sua realização, tendo como a mais importante fonte de pesquisa a obra “*O ABC das escavações em rocha*” Geraldi, 2011. Através do estudo de caso da obra de construção da Via Binária, no Rio de Janeiro, apresenta-se de forma prática como um dos emboques em rocha foi executado preliminarmente à escavação do túnel.

Palavras-chave: NATM, emboque de túnel, escavação em rocha.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

Case study: tunnel's rock entrance treatment and excavation using the NATM method – Harbour Zone, Downtown, Rio de Janeiro/RJ

André Magalhães Mascarenhas

February / 2014

Advisor: Elaine Garrido Vazquez

This paper aims to describe an executive procedure for the excavation and treatment of a tunnel's entrance in rock based on the concepts of the methodology for tunneling constructing NATM (New Austrian Tunneling Method). The thesis includes a literature review which presents the theme of theoretically, addressing the principles and concepts that lead the excavations, the control mechanisms and instrumentation, procedures for excavation in rock and equipment and materials necessary for its realization, being the most important source of the research the book "O ABC das escavações de rocha" Geraldi, 2011. Through the case study of the construction of Via Binária, in Rio de Janeiro, this work presents, in a practical way, how the rock tunnel's entrance was executed before the tunnel excavation.

Keywords: NATM, tunnel's entrance, rock excavation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	1
1.2.	OBJETIVO.....	4
1.3.	JUSTIFICATIVA	4
1.4.	METODOLOGIA EMPREGADA	5
1.5.	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	6
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1.	METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DE TÚNEIS	7
2.1.1.	ANTIGOS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS.....	7
2.1.2.	NATM – <i>NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD</i>	8
2.1.3.	EMBOQUES DOS TÚNEIS	11
2.1.4.	INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS E CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS PELO NATM	12
2.1.5.	INSTRUMENTAÇÃO	16
2.1.6.	SISTEMAS DE ESCORAMENTO ASSOCIADOS AO CONCRETO PROJETADO	19
2.1.7.	PARCIALIZAÇÃO DA SEÇÃO.....	23
2.2.	ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS EM ROCHA	24
2.2.1.	CLASSIFICAÇÃO DAS ESCAVAÇÕES DE ROCHA.....	24
2.2.2.	DESMONTE DE ROCHA SUBTERRÂNEO.....	25
2.2.3.	DESMONTE DE ROCHA: D&B – DRILL AND BLAST.....	26
2.2.4.	EQUIPAMENTOS USUALMENTE EMPREGADOS NAS ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS EM ROCHA.....	29
2.2.5.	PLANO DE FOGO E DETONAÇÃO	34
2.2.6.	CONTROLE DE VIBRAÇÃO / SISMOGRAFIA.....	37
3.	APLICAÇÃO DO NATM / D&B EM EMBOQUE COM SEÇÃO PLENA EM ROCHA.....	39
3.1.	CARACTERÍSTICAS DO EMBOQUE RB1 - POÇO PRAÇA MAUÁ	40
3.2.	CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO	40
3.3.	CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DO MACIÇO	42
3.4.	TRATAMENTO DO EMBOQUE ANTES DA ESCAVAÇÃO	42
3.5.	PARCIALIZAÇÃO DA SEÇÃO.....	44
3.6.	ESCAVAÇÃO D&B E EQUIPAMENTOS EMPREGADOS.....	46

3.7. PLANO DE FOGO E DETONAÇÃO	47
3.8. ISOLAMENTO E EVACUAÇÃO DA ÁREA	49
3.9. CONTROLE DE VIBRAÇÃO / SISMOGRAFIA	49
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
REFERÊNCIAS ELETRÔNICAS	55
ANEXO 1	57
ANEXO 2	60
ANEXO 3	61
ANEXO 4	62

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O túnel começa com a necessidade de superar um obstáculo natural, geralmente maciço montanhoso. Mas Além das montanhas existem outras barreiras que podem ser vencidas mediante túneis, como cursos d'água fluviais e marinhos, e zonas urbanas densamente edificadas. (ZANELATO, 2003)

Os túneis são um dos mais antigos tipos de construção que o homem já exerceu. Desde o Egito antigo são conhecidos certos túneis com aproximadamente 150m de comprimento. Os romanos tiveram intensas atividades com a abertura de túneis para transporte de água e chegaram a inventar determinadas técnicas para facilitar as escavações. (VALLEJOS, 2011)



Figura 1 – Aquedutos subterrâneos romanos.

Fonte: <http://zazulofiaa.blogspot.com.br/> , 2014.

O próximo grande desenvolvimento na tecnologia de escavação de túneis foi em Maio de 1843, com a construção do túnel sobre o rio Thames, em Londres, com 396 metros de comprimento. Este foi o primeiro túnel deste tamanho construído sob

um rio sem realizar nenhum deslocamento do curso d'água. (<http://eastriverhistory.webs.com/>, acessado em 2014)

A indústria tuneleira brasileira começou a se desenvolver na segunda metade do século XIX, mesmo antes do advento de dinamite para a escavação de túneis em rocha. Nessa fase, apenas três séculos após o início da colonização portuguesa e apenas algumas décadas após a independência, todo o trabalho era planejado e conduzido por engenheiros estrangeiros. (ROCHA, 2012)

Os primeiros túneis ferroviários no país foram abertos por volta de 1860. Mas, o trabalho de engenharia mais importante no período foi a longa série de quinze túneis que ficou conhecida como Seção 2 da Estrada de Ferro Dom Pedro II, no Japeri - Barra do Piraí, linha na Serra do Mar no Estado do Rio de Janeiro. (ROCHA, 2012)

Segundo Rocha, 2012, no início do século 20, engenheiros brasileiros estavam no comando das principais obras de túneis acontecendo no país. Para o acesso a partir de São Paulo ao Porto de Santos, o ramal de Mairinque-Santos da Estrada de Ferro Sorocabana ex (São Paulo Railway) foi construído entre 1928 e 1937. As adversas condições topográficas e os difíceis problemas técnicos exigiram a escavação de vários túneis (31, totalizando mais de 5 km)

O desenvolvimento da engenharia de túneis modernos no Brasil começou nas décadas de 1950 e 1960, com o planejamento e construção dos sistemas de metrô em São Paulo e no Rio de Janeiro, além dos inúmeros túneis viários nessa última cidade. Alguns subterrâneos de usinas hidrelétricas também já estavam sendo construídos. Segundo Carvalho (2006) nas décadas de 1960 e 1970, sobressaíram-se as obras de túneis grandes e importantes, principalmente na capital carioca. (ROCHA, 2012)

Segundo Rocha, 2012, o NATM (*New Austrian Tunnelling Method*) foi introduzido no Brasil na década de 1970 para a construção da Ferrovia do Aço entre Belo Horizonte e Rio de Janeiro e para a Rodovia dos Imigrantes, entre São Paulo e Santos. Muitos túneis NATM em solo e algumas estações foram construídas para o Metrô de São Paulo na década de 1980 e 90.

Conforme Rocha, 2012, diversas obras subterrâneas estão em diferentes estágios de desenvolvimento no Brasil. Isto é devido à estabilidade econômica duradoura, ao crescimento econômico consistente e à alta taxa de urbanização da população, entre outros fatores. Grandes áreas metropolitanas têm um déficit de infraestrutura que está diminuindo. A Tabela 1 apresenta alguns dos projetos e seu estágio de desenvolvimento.

Tabela 1 – Estágios de projetos de túneis no Brasil

Fonte: Copiado de Rocha, 2012

PROJETO	EXTENSÃO (Km)	ESTÁGIO
TAV- High Speed Railway, Rio de Janeiro - São Paulo	100,0	Licitação
Estado de São Paulo		
Metrô de São Paulo Linha 4 Extensão	1,5	Projeto executivo
Metrô de São Paulo Linha 5	11,4	Projeto executivo / Construção
Metrô de São Paulo Linha 6	35,1	Projeto Básico
Metrô de São Paulo Linha 15	11,5	Projeto Funcional
Túneis da AV. Roberto Marinho	4,5	Projeto executivo
Rodoanel Mario Covas – Seção Norte	10,0	Projeto Funcional
Estado do Rio de Janeiro		
Metrô do Rio Linha 4, Trecho 1	9,2	Projeto executivo / Construção
Riido Metro Linha 4 Trecho 2	4,3	Estudos
Rodovia BR101	3,3	Projeto Básico
Rodovia Transolimpica	5,0	Projeto Básico
Rodovia Transoeste – Túnel da Grota Funda	2,2	Fianl de Construção
Estado do Ceará		
Metrô de Fortaleza Linha 3 Leste	10,5	Projeto Básico
Estado de Minas Gerais		
Túneis rodoviários	5,0	Projeto Básico
Túneis Ferroviários	7,4	Projeto Básico
Estados do Paraná e Santa Catarina		
Túneis rodoviários	4,7	Projeto Básico
Túneis Ferroviários	35,0	Estudos
Linha 2 do Metrô de Curitiba	20,0	Projeto Básico
Estados da Bahia e Tocantins		
Transposição do Rio São Franciscos (túnieis Cuncas I e II)	19,5	Projeto executivo / Construção

Recente pesquisa, sem valor estatístico, efetuada pelo Comitê Brasileiro de Túneis, mostra que a taxa de aumento da construção subterrânea para fins de engenharia civil é notável. O volume total construído na década de 1990 era inferior a 4 milhões de metros cúbicos; nos cinco anos seguintes o volume saltou para mais de 11 milhões, com uma taxa proporcional significativa de aumento de mais de 500%. (ROCHA, 2012)

Atualmente, segundo Zanelato, 2003, os túneis respondem por mais de 90% do volume de escavações subterrâneas civis em todo o mundo. Nas últimas décadas,

os túneis totalizaram de 500 a 1000 km perfurados por ano, correspondentes a 20.000 a 40.000 m³ de volume escavado.

1.2. OBJETIVO

O presente trabalho apresenta o estudo de caso de escavação e tratamento para emboque de túnel em rocha utilizando o NATM (*New Austrian Tunneling Method*). Para contextualização do tema, serão abordadas as técnicas de escavação empregadas, materiais e equipamentos utilizados para sua realização, assim como os métodos de controle e monitoramento dos possíveis efeitos em edificações lindeiras.

Como evolução do trabalho, será apresentado um estudo de caso no qual será possível obter uma visão mais ampla e real das atividades de escavação de um emboque em rocha em uma construção, mostrando, sobretudo, a sequência de execução aplicada.

1.3. JUSTIFICATIVA

O Brasil encontra-se numa posição de desenvolvimento. Há um crescente interesse de investidores, tanto nacionais como internacionais, nas atividades econômicas do país o que expõe cada vez mais a deficiência acumulada na sua oferta de infraestruturas em geral. Adicionalmente a este fato, o Brasil será país sede da Copa do Mundo de Futebol da Fifa em 2014 e o Rio de Janeiro sediará também os Jogos Olímpicos de 2016 o que traz à tona, principalmente, os problemas de infraestrutura urbana desta cidade.

De imediato tornou-se necessária a realização de inúmeras “obras de grande porte” em todo o país e principalmente no Rio de Janeiro, sendo em sua maioria soluções de transporte como metrô, vias seletivas para ônibus e vias expressas para carros. Fomentada pela alta demanda por áreas com potencial urbano a cidade, a ideia de revitalizar a zona portuária do Rio de Janeiro virou realidade, tendo como principal marco da revitalização da região a retirada do Elevado da Perimetral. A solução viária adotada para substituir o elevador foi a construção de túneis rodoviários

cujos traçados percorrem o subsolo de uma das regiões mais antigas da cidade. A obra dos túneis da região portuária do Rio de Janeiro apresenta-se então como um dos maiores desafios de engenharia da cidade até momento, por se tratar da execução de túneis, ora escavados em solo e ora em rocha, sob o centro histórico do Rio de Janeiro. A união desta situação com o antigo interesse por soluções estratégicas para o “caos” nos sistemas de transporte das cidades brasileiras, assim como as soluções de engenharia que viabilizam estes projetos, estimulou o seu ingresso neste ramo da construção civil, justificando a escolha da referida obra para ser utilizada como estudo de caso do seu trabalho final de graduação.

1.4. METODOLOGIA EMPREGADA

O tema em questão foi pesquisado por meio de livros, teses de mestrado, artigos, manuais técnicos de empresas, através de consultas a engenheiros de obra especializados na área de túneis e de algumas pesquisas realizadas na *internet*. O trabalho apresenta uma parte teórica, onde são apresentados os principais conceitos referentes ao tema, com uma abordagem mais aprofundada, tendo como objetivo principal contextualizar e esclarecer a metodologia de escavação de túneis em rocha aqui estudada. Em seguida, apresenta-se, como estudo de caso, o procedimento executivo de escavação de uma parte de um túnel com o intuito de ilustrar a aplicação prática da metodologia apresentada.

O texto foi desenvolvido com supervisão de um orientador acadêmico, com pesquisas bibliográficas e com a vivência diária do autor na obra estudada, possibilitando a análise e a compilação das informações a seguir sobre as escavações de túneis em rocha.

1.5. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

No segundo capítulo, é apresentada uma fundamentação teórica sobre as escavações de túneis em rocha. Inicialmente é apresentada a metodologia utilizada e os conceitos empregados na escavação dos túneis propriamente dita, fazendo uma breve comparação com os antigos métodos utilizados para contextualizar o surgimento da metodologia aplicada atualmente. Em seguida são apresentados os conceitos relacionados ao desmonte de rocha subterrâneo, citando os procedimentos, equipamentos e controles aplicados no processo.

No terceiro capítulo, é apresentado um estudo de caso para ilustração e demonstração da aplicação da metodologia de escavação apresentada. O estudo é referente à construção de um dos emboques do túnel da Via Binária, localizada no centro do Rio de Janeiro, onde o autor atualmente trabalha.

Por fim, no quarto capítulo, é apresentada uma conclusão onde o autor realiza algumas considerações sobre o trabalho com relação à relevância deste para a construção civil.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre as escavações em rocha voltadas para execução de túneis relacionando aspectos teóricos de relevância na abordagem do referido tema. Os principais assuntos citados farão referência à aplicação dos conceitos do NATM (*New Austrian Tunneling Method*) e, no que diz respeito às escavações propriamente ditas, o método a ser abordado será o D&B - *Drill and Blast* (perfuração e detonação).

2.1. METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DE TÚNEIS

2.1.1. ANTIGOS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

No começo do século XX ainda eram empregados métodos de avanço desenvolvidos no século anterior que tinham os nomes dos seus países de origem: método inglês, método belga, método alemão, método americano, método austráco. (Empresas CBPO/FIGUEIREDO FERRAZ, 1994).

O avanço era feito por meio de pequenas galerias, que eram unidas na fase de alargamento. Conforme Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994, o processo era extremamente trabalhoso, complicado e perigoso, exigindo enorme quantidade de madeira para o escoramento, o que tornava impossível o emprego de equipamentos de maior porte devido ao pouco espaço restante.

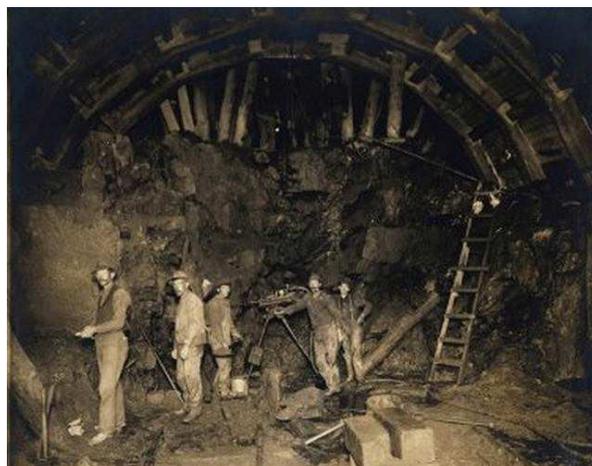


Figura 2 – Antigo escoramento de madeira

Fonte: <http://www.vintag.es/>, 2014.

O revestimento era feito por etapas, removendo o escoramento e usando alvenaria de pedras ou tijolos, chegando a ter até dois metros de espessura. Mesmo assim, o revestimento se rompia pela ação da carga do maciço, que se movimentava para fechar o espaço entre a superfície escavada e o revestimento. (Empresas CBPO/FIGUEIREDO FERRAZ, 1994).

A situação era ainda mais agravada por um fator bastante desfavorável, o tempo. Na simples abertura da plena seção de um trecho de nove metros de comprimento de um túnel ferroviário de duas vias pelo método austríaco convencional, após a abertura de galerias piloto na base e na abóbada, dispensou-se cerca de quatro semanas além de outras quatro para se completar o revestimento (alvenaria) da seção. A quantidade de escoras de madeira que se utilizava nos casos mais difíceis era tão grande que às vezes um terço ou mais da seção escavada era ocupada pelo madeiramento. (RABCEWICZ, 1974)

2.1.2. NATM – NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD

Durante a década de 1940 o Prof. Dr. techn. Ladislaus von Rabcewicz concretizou suas ideias no sentido de um sistema de escavação baseado num dimensionamento empírico após observar que todas as dificuldades e colapsos na penetração provinham da possibilidade, oferecida por todos os métodos conhecidos, de permitir relaxamentos iniciais do maciço e de deixar vazios entre os suportes e o terreno. Ele imaginou que unicamente um material suficientemente plástico, no momento da aplicação, para preencher as cavidades mais irregulares, que pudesse ser aplicado imediatamente após a escavação, e que oferecesse uma elevada resistência em poucos minutos, imobilizando a rocha ou solo em sua posição relativa, eliminaria os relaxamentos iniciais e vazios nas interfaces do material escavado com o suporte aplicado. (Empresas CBPO/FIGUEIREDO FERRAZ, 1994).

Esse material, segundo Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994, apesar de nunca ter sido aplicado amplamente com esta finalidade, existia, e era o concreto projetado aditivado com acelerador de pega. Foi assim que nasceu o NATM – New Austrian Tunneling Method (em português, novo método austríaco de execução de túneis).

Como relata o próprio Rabcewicz, 1974, embora os métodos e meios de sustentação temporária ou permanente tenham conhecido progressos fundamentais

até aquela época, os revestimentos ainda continuavam a ser construídos tão espessos quanto o eram meio século antes. A pressão de relaxação ainda era considerada por muitos como a principal força ativa a ser considerada em projetos de túneis, embora os métodos modernos de escavação praticamente tornassem possível evitar-se a relaxação da rocha circundante quase que integralmente.

O NATM foi desenvolvido entre 1957 e 1965 na Áustria. Os três contribuintes principais ao desenvolvimento do método foram Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Müller e Franz Pacher. Sua oficialização se deu no 11th *Geomechanics Colloquium* em Salzburg no ano de 1962 com o objetivo de distingui-lo do antigo método, até então utilizado no país. (<http://www.tunneltalk.com/>, acessado em 2014).

De acordo com Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994, o sistema NATM, cuja aplicação ficou, por vários anos, limitada à Europa central, Itália e Suécia, ganhou notoriedade mundial através de dois artigos publicados em Novembro e Dezembro de 1965 de autoria do Prof. Rabcewicz, na revista *Water Power*. Rapidamente a aplicação do método se alastrou pelo mundo deslocando os métodos convencionais de construção subterrânea, apesar das resistências encontradas. Ele conseguiu entrar na América do Norte, até então seguidora das ideias de Terzaghi e do uso exclusivo das cambotas metálicas, com a abertura do Barnaby Tunnel, perto de Vancouver. Chegou primeiramente ao Brasil em 1970, na Rodovia dos Imigrantes e se implantou definitivamente a partir de 1975 na execução dos 72 km de túneis da Ferrovia do Aço.

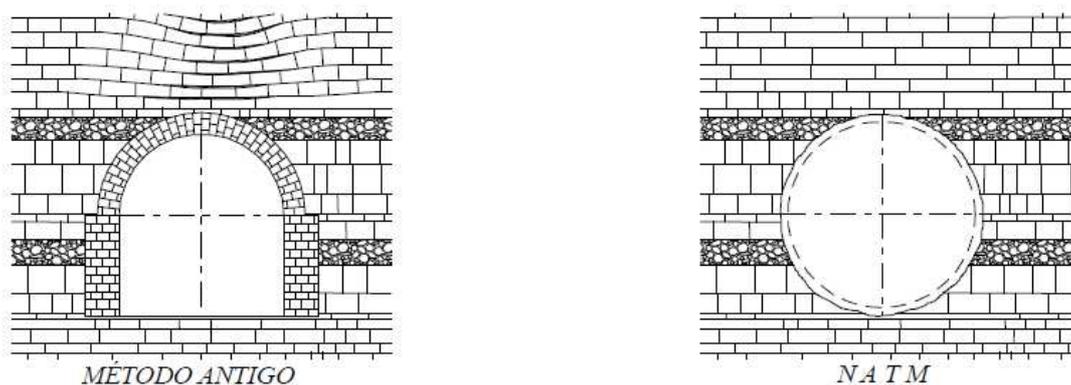


Figura 3 – Comparação métodos de escavação.

Fonte: Campanhã *et al.*, 1998.

O NATM trouxe novas visões e parâmetros geotécnicos quanto à estabilidade dos túneis. Segundo Campanhã *et al.*, 1998, seu princípio básico é fazer com que o

terreno, em vez de atuar somente como carga sobre o revestimento do túnel, ele próprio atue como um elemento colaborante da resistência da estrutura. Em outras palavras, conforme Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994, o método caracteriza-se por obter a estabilização da cavidade por meio de um “alívio de pressão controlado” e, dentro desse princípio, o maciço circundante passa “de um elemento de carga a um elemento portante”.

Segundo Campanhã *et al.*, 1998, deve-se evitar seções transversais com cantos vivos é eliminado o problema de locais com concentração de tensões, que podem levar o material do suporte à plastificação (ruptura).

Como descreve Vallejos, 2011, o NATM é uma metodologia de observação, monitoramento, acompanhamento e providências a serem tomadas na escavação subterrânea durante a construção, não sendo, portanto, um conjunto de técnicas específicas da escavação e da sustentação.

Müller listou vinte e dois princípios do NATM. A seguir constam os quinze mais importantes, segundo Murakami, 2001, nos quais o NATM está baseado.

Quadro 1 – Conceitos do NATM

Fonte: Autor, 2014

CONCEITOS DO NATM	
Conceito 1	Através do alívio de tensões, o maciço circundante ao túnel que inicialmente atua como elemento de carregamento passa a participar do suporte.
Conceito 2	Preservar a qualidade do maciço circundante tanto quanto possível com cuidados durante a escavação e aplicação do suporte, evitando o início de um processo de deterioração do maciço.
Conceito 3	Impedir a deformação excessiva do maciço de forma que ela perca a capacidade de auto-suporte passando a constituir um carregamento sobre o suporte.
Conceito 4	Trabalhando-se com deformações compatíveis com o maciço a capacidade autoportante é conservada passando este a trabalhar como um elemento portante.
Conceito 5	Caracterizar geológica e geotecnicamente o maciço de forma a se obter o máximo subsídio na definição do melhor método construtivo e para o dimensionamento do sistema de suporte e do revestimento.
Conceito 6	Adequar a parcialização da frente de escavação em função do comportamento do maciço, do tempo de auto-sustentação, da deformabilidade do material e dos equipamentos disponíveis.

Conceito 7	Utilizar o suporte adequado em termos de resistência e deformabilidade no momento certo, tirando partido da capacidade de auto-suporte do maciço.
Conceito 8	Não devem ser deixados espaços vazios entre o suporte e o maciço que permitam o desagregamento do material e conseqüente perda da capacidade de auto-suporte.
Conceito 9	Utilizar-se de elementos de suporte (concreto projetado, telas, ancoragens e cambotas) necessários e suficientes para impor tensões confinantes que equilibrem a abertura mantendo as deformações em níveis aceitáveis.
Conceito 10	Manter o fechamento do invert em distâncias compatíveis com a capacidade de carga da calota aberta e o mais próximo possível da frente de escavação.
Conceito 11	Definir uma seção de escavação com a menor área possível.
Conceito 12	Conceber formas que privilegiem o equilíbrio dos carregamentos predominantemente por esforços de compressão, ou seja, procurar formas arredondadas.
Conceito 13	Realizar o acompanhamento das deformações através de instrumentação, cujas leituras servirão para subsidiar as revisões e otimizações do processo construtivo e do projeto, além de permitir o monitoramento da segurança da obra.
Conceito 14	O acompanhamento das instrumentações deve indicar a total estabilização dos deslocamentos após a conclusão do suporte e do revestimento.
Conceito 15	Drenar o maciço sempre que a presença da água possa provocar algum dano ou mecanismo que ponha em risco a obra e o local de trabalho.

2.1.3. EMBOQUES DOS TÚNEIS

Os emboques são os pontos de onde partem as escavações dos túneis. A escolha da localização dos emboques sempre será influenciada por muitas condicionantes, devido ao fato de este ser um dos pontos estratégicos dos projetos executivos. A definição dos tipos de emboque e o seus posicionamentos tem interferência direta no cronograma e no orçamento da obra como um todo, visto que após a abertura do túnel, a escavação abrigará um metrô, uma rodovia, uma ferrovia, uma obra hidrelétrica ou uma obra de saneamento. De acordo com Geraldi, 2011, muitas obras subterrâneas foram prejudicadas por emboques mal projetados e mal construídos.

A primeira função do emboque é servir de arrimo, ou seja, a estrutura do emboque deve ser tal que não interfira na estabilidade do maciço no local, sem antes de mais nada agir no sentido inverso, isto é, deve aumentar a segurança local. (CAMPANHÃ *et al.*, 1998)

Além de garantir a segurança estrutural no local, os emboques também devem proporcionar praças de trabalho adequadas, onde possam ser instaladas todas as utilidades necessárias, sendo também um ponto de manobra de equipamentos, possíveis estocagens de material, acesso de trabalhadores e devem ter o mínimo de interferências com o meio ambiente. Desta forma, deve-se procurar atingir um ponto de equilíbrio entre as várias funções dos emboques.

Quadro 2 – Tipos de Emboque

Fonte: Autor, 2014

TIPOS DE EMBOQUE
Túnel falso
Poço de acesso
Cortina atirantada, muro de arrimo ou parede diafragma
Corte
Combinação desses tipos

Quando se trata de obras urbanas, o atendimento de todas as condicionantes referidas anteriormente torna-se mais complicado, a começar pelas praças de trabalho que tem suas áreas limitadas a espaços disponíveis na superfície, que nas grandes cidades são raros.

2.1.4. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS E CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS PELO NATM

Em se tratando de escavação de túneis é natural que a primeira atitude a ser tomada seja a execução das investigações geológicas. Segundo Geraldi, 2011, elas devem fornecer informações gerais quanto à geologia na área do empreendimento,

com definição das principais litologias (tipos de rocha) e das condições geomecânicas dos maciços, parâmetros que se constituirão nos principais condicionantes das escavações a executar.

Os estudos geológicos são, segundo Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994, executados em etapas de crescente detalhamento compatível com as fases de projeto e implantação da obra. Em termos gerais, o sucesso dos empreendimentos que envolvem escavações subterrâneas depende do conhecimento adequado das características do maciço a ser escavado, da escolha correta do método construtivo e da experiência do construtor. Os seguintes aspectos podem atuar como condicionantes do projeto e construção de túneis.

Quadro 3 – Condicionantes de projeto

Fonte: Autor, 2014

CONDICIONANTES DE PROJETO
Solo sujeito a movimentações naturais de escorregamento ou rastejo em encostas, que podem ser acelerados com a implantação de emboques, vias de acesso e áreas de bota-fora.
Horizontes compreendidos pela transição entre solo e rocha, que contém uma grande anisotropia do maciço, tais como rocha alterada, matacões, alternância de bandas de rocha sã e alterada, fraturamento muito desenvolvido, fraturas preenchidas por argila ou alteração da própria rocha.
Nível d'água e zona com elevadas pressões ou vazões d'água.
Espessura reduzida da cobertura de solo e/ou rocha.
Estruturas geológicas, tais como: contatos litológicos, estratificações, foliações, juntas, folhas, dobras, etc.
Tensões naturais.
Maciços constituídos por materiais heterogêneos, com propriedades mecânicas variáveis.
Maciços constituídos por rochas facilmente deterioráveis e expansivas.

Segundo Geraldi, 2011, para a escavação de um túnel, por exemplo, pelo quadro geológico-geomecânico revelado pelas investigações, os maciços a escavar

serão previamente classificados e compartimentados em até cinco classes de rocha, ao longo do seu traçado, como previsto no NATM, de acordo com o quadro 4. A compilação destes dados com as informações pré-existentes, segundo Murakami, 2001, servirá de suporte para planejamento e projeto das estruturas em rocha.

Quadro 4 – Classificação NATM

Fonte: Autor, 2014

CLASSIFICAÇÃO NATM	
Classe I	Maçiços 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	Maçiços de rocha sã, sem alterações, coesos e autoportantes, porém já apresentando pelo menos um plano (família) de diáclases ou de fraturas.
Classe III	Maçiços de rocha sã, fraturada, ainda com um certo grau de autossuporte e coesão, porém entrecortado por planos (famílias) de fraturas orientados segundo diferentes direções e mergulhos, podendo ocorrer faixas milimétricas a centimétricas de alterações nestas fraturas, associadas a maiores concentrações de água subterrânea.
Classe IV	Maçiços de rocha mais fraturada e apresentando faixas intercaladas de rocha alterada, com coesão mais reduzida, autossuporte e estabilidade temporários, quadro que pode se agravar na presença de água subterrânea.
Classe V	Maçiços formados por solo de alteração (saprólitos) ou rocha totalmente alterada, com pouca ou nenhuma coesão, ausência de autossuporte e estabilidade quando escavados; na presença de água subterrânea estes maciços passarão a ser classificados como de Classe VI.

Baseados neste mapeamento preliminar, os projetos são elaborados. São definidos tratamentos específicos e detalhados para cada classe do maciço. No entanto, quando do início da escavação, torna-se necessária a constante determinação da classe do maciço, à medida que o túnel avança. Tendo isso em vista, segundo Murakami, 2001, na construção de túneis, um Acompanhamento Técnico de Obra (ATO) é essencial para a realização do monitoramento de segurança e da compatibilização do projeto com as condições locais da obra. Para tanto, o ATO deve

ser realizado por profissionais capacitados, que tenham noções sobre os conceitos envolvidos na concepção e na construção de túneis. Deve-se, então, atualizar este mapeamento com investigações complementares observadas durante a escavação do túnel.

Existem métodos específicos e bem definidos para a classificação sistemática do maciço. Segundo Murakami, 2001, o sistema RMR (*Rock Mass Rating*) é uma metodologia simples e baseada em medidas/avaliações rápidas e de baixo custo. Ele foi proposto por Bieniawski em 1989 na África do Sul. A classificação é feita em função de seis parâmetros,

Quadro 5 – Parâmetros de classificação do maciço

Fonte: Autor, 2014

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO
Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
Qualidade da rocha (RQD - Rock Quality Designation)
Espaçamento entre as descontinuidades
Condições das superfícies de descontinuidade
Condições de água subterrânea
Orientação das descontinuidades em relação à estrutura

Para cada um destes parâmetros são dadas notas para o maciço, de acordo com a tabela de classificação do Bieniawski (Anexo 3). A soma dessas notas com o fator de orientação das descontinuidades fornece uma nota de 0 a 100 ao maciço rochoso. Este será então alocado em umas das cinco classes previstas pelo NATM. (NUNES, 2009).

2.1.5. INSTRUMENTAÇÃO

Um dos conceitos do NATM diz que o acompanhamento da execução por meio de leituras intensivas das instrumentações deve ser rigorosamente seguido. Como afirma Campanhã *et al.*, 1998, no NATM a auscultação de campo tem papel fundamental, pois permite medir o desenvolvimento das deformações, alívio das tensões no maciço, a interação do suporte com o maciço circundante, variação das pressões, etc.

Nas obras que são executadas em regiões urbanas, a instrumentação exerce papel fundamental, indicando os níveis de deformação das edificações e utilidades instaladas no subsolo. Através das medições, a obra pode monitorar a necessidade de melhorias no desempenho do método construtivo de forma a evitar ao máximo os danos nas edificações e utilidades provocados por distorções e recalques. (MURAKAMI, 2001)

Segundo Campanhã *et al.*, 1998, a instrumentação compreende um conjunto de aparelhos e sistemas para a observação e medição do comportamento do maciço durante a fase de escavação e eventualmente durante a vida do túnel.

A instrumentação é instalada externa e internamente ao túnel. (CAMPANHÃ *et al.*, 1998). Internamente ao túnel, a instrumentação consiste na instalação de pinos para medidas de convergência e de movimentação vertical da calota. Externamente são instalados instrumentos para medir a movimentação do maciço acima do túnel. (Empresas CBPO/FIGUEIREDO FERRAZ, 1994).

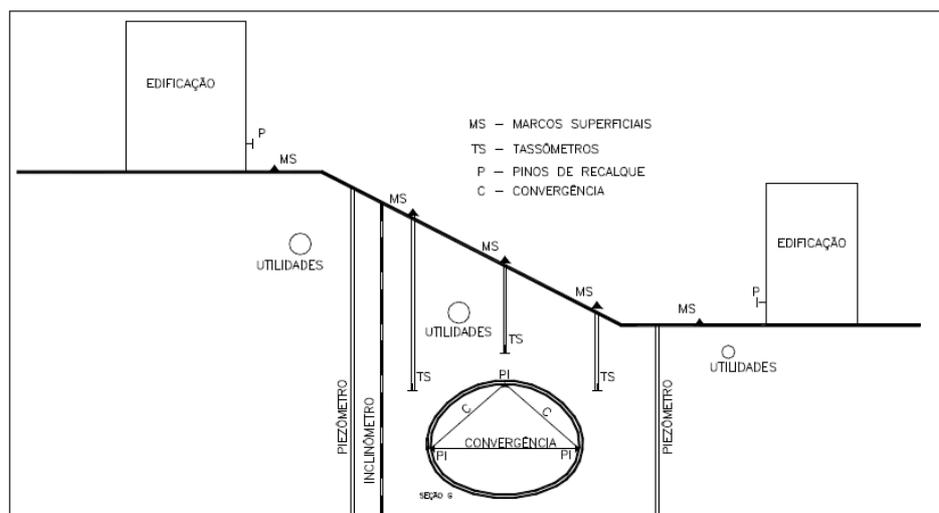


Figura 4 – Esquema geral de instrumentação.

Fonte: Murakami, 2001.

2.1.5.1. INSTRUMENTAÇÃO EXTERNA

De acordo com Geraldi, 2011, normalmente, o controle dos recalques é feito com a inspeção sistemática, preliminarmente às escavações, ao longo do traçado do túnel, através de serviço topográfico com níveis de precisão e aparelhos tipo Estação Total, que irão conferir diariamente a possível variação destes marcos, tanto nas áreas dos emboques como ao longo do eixo do túnel. Conforme Murakami, 2001, a instrumentação nos túneis compõe-se basicamente de medições de deslocamentos e piezometria que são realizados normalmente com a utilização de marcos referenciais de superfície, pinos de recalque em edificações, tassômetros (placas de recalque em profundidade) e inclinômetros. Segundo Geraldi, também na fase anterior às escavações dos emboques deverão ser instalados piezômetros e indicadores de nível d'água (INA's) posicionados em áreas próximas dos emboques e, se for o caso, ao longo do túnel, permitindo um monitoramento da variação progressiva do NA.

O quadro 6 a seguir lista alguns sistemas de instrumentação externos e descreve suas respectivas finalidades.

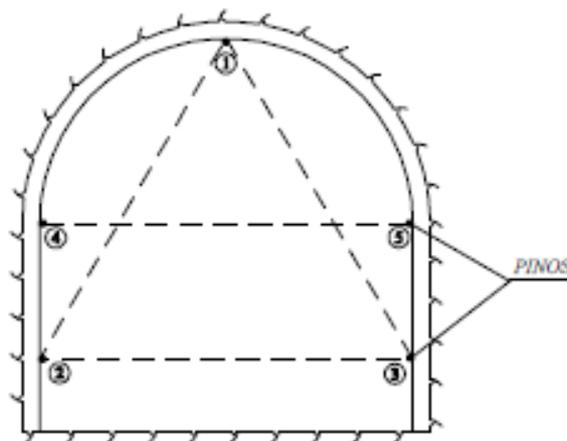
Quadro 6 – Instrumentação Externa

Fonte: Autor, 2014

SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO	FINALIDADE
Marcos superficiais	Medir os recalques superficiais do terreno por meio de nivelamento topográfico.
Tassômetros	Medir os recalques dentro do maciço.
Piezômetros	Medir a pressão d'água no maciço.
Medidores do nível d'água	Medir o nível do lençol freático, geralmente (salvo com artesianismos) dando um limite máximo da piezometria.
Inclinômetros	Detectar movimentos laterais e frontais do maciço.
Pinos nos edifícios	Medir os recalques das fundações por meio de levantamento topográfico.

2.1.5.2. INSTRUMENTAÇÃO INTERNA

A instrumentação interna é instalada à medida que a escavação avança. De acordo com Campanhã *et al.*, 1998, a da medida de convergência da seção (figura 5) é imprescindível, pois indica as deformações da superfície escavada. Estas deformações ocorrem após algumas deformações iniciais quase instantâneas não registráveis, salvo por comparações com as medidas externamente. Os valores aceitáveis dessas deformações, para cada setor geomecânico, são indicados no projeto e não podem ser ultrapassados, sob o risco de graves acidentes. Valores menores que os aceitáveis são determinados como níveis de alerta, os quais permitem a tomada de medidas preventivas e/ou corretivas antes que as deformações atinjam os valores-limite estabelecidos.



Fonte: Campanhã *et al.*, 1998

Figura 5 – Instrumentação interna, convergência de seção.

Conforme Campanhã *et al.*, 1998, enquanto as medidas de convergência indicam os deslocamentos da superfície escavada do túnel, o extensômetro permite medir os deslocamentos dentro do maciço, a distancias pré-determinadas a partir da superfície escavada. O aparelhamento consiste de barras cravadas radialmente no maciço, cujo deslocamento é medido a partir do interior do túnel por meio de distômetro ou automaticamente por meio eletrônico.

Deslocamentos dentro do maciço significam, segundo Campanhã *et al.*, 1998, um relaxamento do terreno e conseqüentemente aumento da carga sobre o revestimento. A sua verificação em tempo hábil permite a tomada de medidas para a estabilização do maciço.

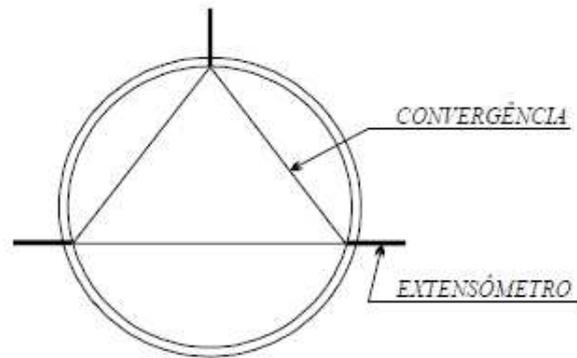


Figura 6 – Instrumentação interna, extensômetro.

Fonte: Campanhã *et al.*, 1998

2.1.6. SISTEMAS DE ESCORAMENTO ASSOCIADOS AO CONCRETO PROJETADO

Conforme Campanhã *et al.*, 1998, o concreto projetado é o elemento fundamental do NATM. Até que ele adquira a resistência necessária para suportar as cargas do maciço, é preciso contar com o tempo de auto-suporte do terreno e associá-lo a um ou mais sistemas de escoramento. Atualmente são empregados os sistemas de cambotas, tirantes, malhas de aço e fibras de aço.

2.1.6.1. CAMBOTAS

As cambotas são arcos de perfis laminados ou treliças de vergalhões de aço. Dependendo da seção do túnel, as cambotas são fabricadas em segmentos e montadas no local de aplicação por meio de parafusos por motivo de facilidade de manuseio. As cambotas são utilizadas basicamente nas escavações de túneis em solo, sendo também utilizada para os trechos de túnel em rocha com baixa ou nenhuma capacidade de autossuporte.

Como a finalidade das cambotas é suportar as cargas do terreno nas primeiras horas após a escavação, segundo Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994, é muito importante que o espaço entre o seu extradorso e o terreno seja encunhado e/ou preenchido com concreto imediatamente após a sua colocação. Em seguida é feito o preenchimento do espaço entre cambotas.

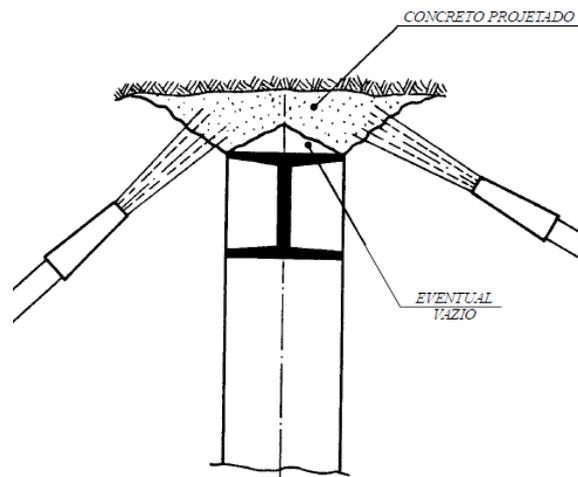


Figura 7 – Cambota de perfil.

Fonte: Campanhã *et al.*, 1998

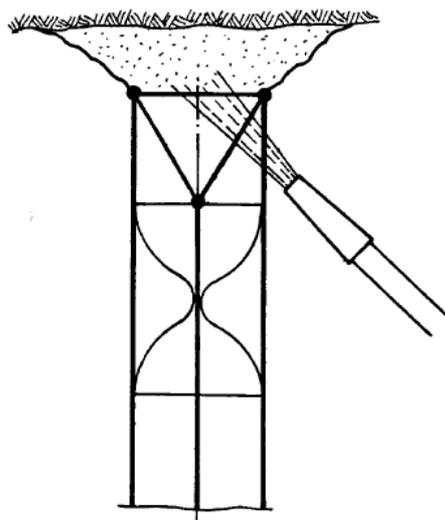


Figura 8 – Cambota treliçada.

Fonte: Campanhã *et al.*, 1998

2.1.6.2. TIRANTES

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

O tipo de tirante e os espaçamentos entre eles são determinados em função das características geológicas do maciço e do memorial de cálculo. Segundo Campanhã *et al.*, 1998, recomenda-se a aplicar uma camada de concreto projetado de 2 a 5 cm de espessura logo após a escavação e remoção dos chocos, antes de iniciar a perfuração para instalação dos tirantes.

Os tirantes para rocha são de dois tipos, tirantes tensionados e tirantes não tensionados. A ancoragem dos tirantes tensionados em sua extremidade pode ser feita por meio de resina de pega rápida.

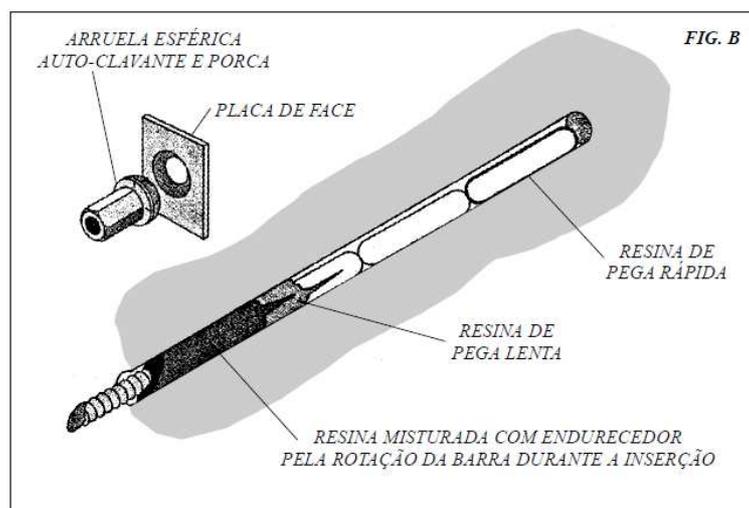


Figura 9 – Tirante com resina de pega rápida e pega lenta

Fonte: Campanhã *et al.*, 1998

Os tirantes não tensionados trabalham por atrito entre a haste do tirante e a rocha. Existem vários tipos. Num caso, por exemplo, o tirante de haste argamassada é composto de duas meias-canais de chapa de aço perfurada, enchidas com argamassa plástica de cimento. O conjunto é introduzido no furo. O vergalhão, ao ser forçado dentro da argamassa, faz a mesma se expandir pelos furos da chapa, preenchendo completamente o furo na rocha e assim “soldando” os blocos.

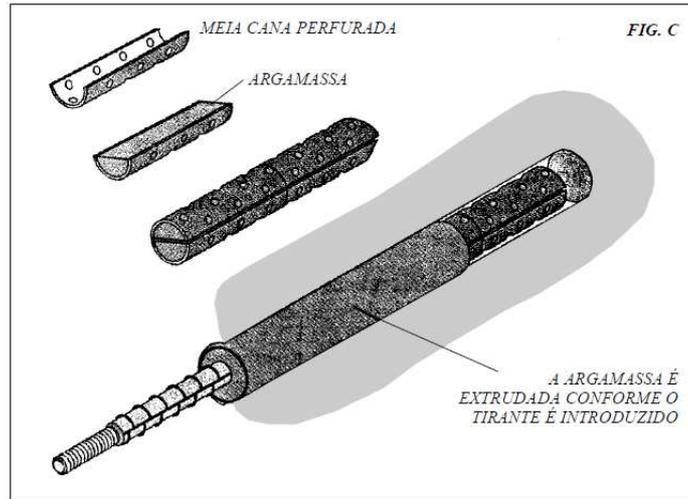


Figura 10 – Tirante de haste argamassada.

Fonte: Campanhã et al., 1998

2.1.6.3. MALHA DE AÇO

A malha de aço soldada é usada singelamente ou combinada com cambotas e tirantes, dependendo das condições geológicas do maciço. No caso de utilização com tirantes, inicialmente é projetada uma camada de 2 a 5 cm de concreto sobre a superfície escavada. Em seguida são instalados os tirantes e é colocada a malha, fixada sobre o concreto por meio de pinos ou chumbadores.

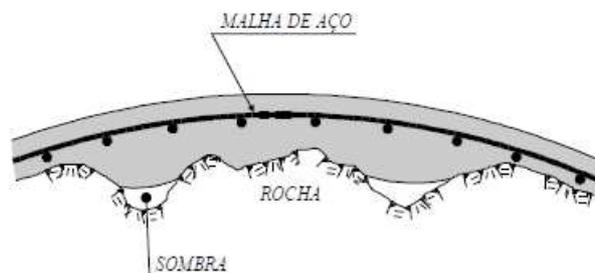


Figura 11 – Malha de aço

Fonte: Campanhã et al., 1998

2.1.6.4. FIBRAS DE AÇO

No caso da utilização das fibras de aço incorporadas ao concreto projetado viabiliza-se a execução de todas as etapas do ciclo de implantação do concreto projetado com malha de aço num único ciclo. Logo após a aplicação da camada de selagem, a camada final é executada sem interrupção. Segundo Campanhã et al., 1998, outra grande vantagem do concreto projetado com fibras de aço, principalmente em rochas, é o de permitir acompanhar as irregularidades da superfície escavada mantendo a espessura especificada em projeto.

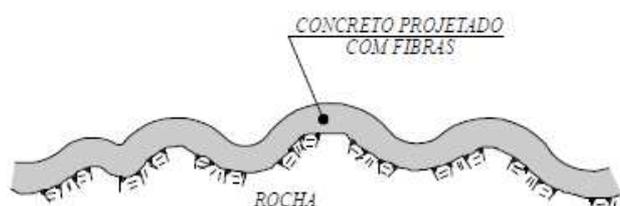


Figura 12 – Concreto projetado com fibras de aço

Fonte: Campanhã et al., 1998

2.1.7. PARCIALIZAÇÃO DA SEÇÃO

Um dos princípios do NATM diz que a melhor forma de execução de um túnel é a escavação em seção plena com o fechamento o mais rápido possível da seção. No entanto, segundo CBPO, Figueiredo Ferraz, 1994, nem sempre o melhor é o exequível, quer pela limitação de equipamentos, quer pela limitação do próprio maciço, não sendo rara a ocorrência dos dois aspectos simultaneamente. É o caso de seções com grande diâmetro onde os equipamentos convencionais não são capazes de executá-las em uma única etapa; por outro lado grandes seções, via de regra, demandam tempos de ciclo de escavação e aplicação dos suportes muito longos, tornando-os incompatíveis com o tempo de auto-sustentação do maciço no passo de avanço executado.

Uma das formas de contornar o problema, como propõe CBPO, Figueiredo Ferraz, 1994, é adotar a parcialização da seção, repartindo-a em fases construtivas guardando em cada uma os princípios básicos do NATM.

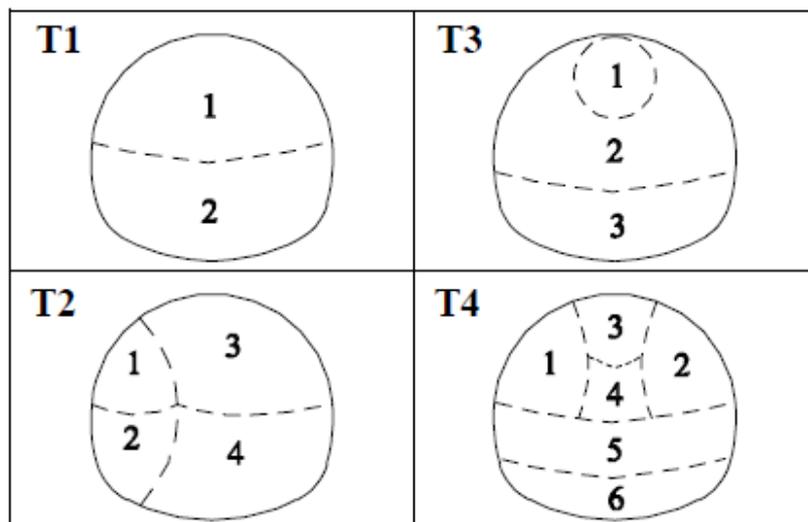


Figura 13 – Exemplos de parcialização da seção de escavação

Fonte: Campanhã *et al.*, 1998

2.2. ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS EM ROCHA

Denominam-se “escavações ou desmonte de rochas” o conjunto de metodologias, técnicas de escavação mecânica ou com o auxílio de explosivos, instrumentações e serviços auxiliares necessários para escavar, desmontar, fragmentar ou cortar maciços e blocos rochosos, atendendo a projetos de obras civis ou à produção de minérios para fins industriais. (GERALDI, 2011).

2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DAS ESCAVAÇÕES DE ROCHA

Os desmontes de rocha podem ser classificados de diversas maneiras. Considerando-se a técnica aplicada podem-se definir dois tipos principais, a escavação a frio, realizada por processos mecânicos ou utilizando materiais expansivos e a escavação a fogo com explosivos.

Quadro 7 – Técnicas de escavação de rocha

Fonte: Autor, 2013

TÉCNICA	CARACTERÍSTICA
DESMONTE DE ROCHA A FOGO	Tipo de desmonte que utiliza material explosivo. Este tipo de escavação é o foco deste trabalho.
DESMONTE DE ROCHA A FRIO	Realizadas com processos mecânicos e/ou com auxílio de materiais expansivos.

Além desta classificação podem-se relacionar as escavações ao ambiente nas quais são realizadas, subdividindo-as em: escavações a céu aberto, subterrâneas e subaquáticas. O quadro 8 descreve as aplicações mais comumente feitas para cada tipo de desmonte.

Quadro 8 – Tipo de escavação e suas aplicações

Fonte: Autor, 2013

ESCAVAÇÃO	APLICAÇÕES
A CÉU ABERTO	Desmonte em bancadas e de blocos, aberturas de cortes e trincheiras em rochas e abertura de cavas de fundação.
SUBTERRÂNEA	Abertura de galerias, túneis, cavernas, poços verticais. Este tipo de escavação é o foco deste trabalho.
SUBAQUÁTICA	Derrocagens para aumento de calado em portos, passagem de dutos sob leito de rios, remoção de ensecadeiras.

2.2.2. DESMONTE DE ROCHA SUBTERRÂNEO

Tanto na mineração como em grandes obras civis, as escavações subterrâneas vem sendo cada vez mais empregadas em todo o mundo. Segundo Geraldi, 2011, as novas metodologias se baseiam na preservação e na manutenção da estabilidade dos maciços em escavação, através da aplicação imediata de tratamentos e revestimentos primários, promovendo uma maior segurança para as escavações em andamento e, conseqüentemente, uma maior produtividade nas frentes de trabalho.

A escavação em rocha por si só configura uma atividade bastante complicada que demanda muita energia mecânica. Além disso, o fato da escavação ser subterrânea torna a logística da sua realização ainda mais complexa. Para garantir a segurança das equipes durante as escavações e maior produtividade na execução dos serviços, é imprescindível o emprego de equipamentos de grande e pequeno porte. (GERALDI, 2011)

2.2.3. DESMONTE DE ROCHA: D&B – DRILL AND BLAST

Nos dias de hoje, de acordo com Geraldi, 2011, nas escavações dos túneis em rocha ainda predominam as técnicas da metodologia tradicional, denominada mundialmente como metodologia D&B - *Drill and Blast* (perfuração e detonação). Esta metodologia é composta por várias etapas que precisam ser executadas ordenadamente, formando um ciclo de escavação bem definido.

Primeiramente a frente a escavar é perfurada com furos horizontais, normalmente paralelos e de comprimentos iguais. A distribuição destes furos é definida num plano de fogo projetado em função das condições geológicas do maciço rochoso, do avanço que se pretende obter por detonação, da área e do formato geométrico da seção de escavação. Para a perfuração são utilizadas perfuratrizes rotopercussivas hidráulicas (Jumbos), ou perfuratrizes manuais pneumáticas, com avanço automático.



Figura 14 – Perfuração da frente de escavação

Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br/>, acessado em 2014.

Os furos são então carregados com explosivos e conectados para que seja feito o acionamento da detonação. As minas, furos carregados, são detonadas em sequência que se inicia do centro (pilão) para a periferia da seção, fragmentando a rocha.



Figura 15 – Carregamento da frente de escavação

Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br/>, acessado em 2014.



Figura 16 – Detonação da frente de escavação

Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br/>, acessado em 2014.

Após a detonação da frente de escavação é necessário ventilar o túnel por insuflação de ar limpo para a exaustão dos gases provenientes dos explosivos. A seguir, os trabalhadores podem dar continuidade ao ciclo realizando a limpeza da frente, removendo-se a rocha detonada, com a utilização de equipamentos de transporte de material, conforme planejamento executivo do túnel, considerando um empolamento de 50%, conforme Geraldi, 2011.

De acordo com Geraldi, 2011, deve-se observar cuidadosamente o teto, as paredes e a própria frente que foi detonada para programar a operação de bate-choco, que é a complementação da limpeza, com a remoção cuidadosa de lascas e de blocos de rocha soltos (chocos).



Figura 17 – Limpeza da frente de escavação

Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br/>, acessado em 2014.

Segundo Geraldi, 2011, em seguida à limpeza, dá-se início à execução dos tratamentos, aplicação dos suportes e revestimentos primários (apresentados no item 2.1.5 deste trabalho), principalmente em se tratando de maciços classes III e IV.

Conforme afirmação de Geraldi, 2011, por uma questão de viabilidade econômica, a metodologia D&B predomina atualmente nas escavações de rocha em minerações e na construção civil.

2.2.4. EQUIPAMENTOS USUALMENTE EMPREGADOS NAS ESCAVAÇÕES DE TÚNEIS EM ROCHA

Principalmente no ramo das obras de infraestrutura pesada existe uma grande variedade de equipamentos disponíveis no mercado, tanto de pequeno como de grande porte. A depender do tamanho e do orçamento da obra, serão escolhidos os equipamentos a serem utilizados. Para obras com grandes extensões, que exijam prazos de execução apertados, pode-se justificar o emprego de equipamentos caros, porém de alta produtividade. No entanto, de acordo com o tamanho da obra, a utilização de certos equipamentos de grande porte pode ser inviável tanto por questões financeiras como por questões físicas. A exemplo de grandes máquinas, como as perfuratrizes rotopercussivas hidráulicas, o porte e o peso das carretas hidráulicas também devem ser levados em conta, uma vez que estes fatores provocam dificuldades frequentes no deslocamento o no posicionamento do conjunto em locais mais confinados ou de topografia acidentada. (GERALDI, 2011)

Neste item serão apresentados os equipamentos mais comumente empregados nas escavações de túneis em rocha.

2.2.4.1. MARTELO DE COLUNA

Dentre os equipamentos de perfuração percussivos destacam-se os marteletes, que são perfuratrizes manuais leves, acionadas por ar comprimido ou por motores a explosão ou elétricos. Os marteletes mais modernos possuem acionamento hidráulico. (GERALDI, 2011)

Para a execução de furos sub-horizontais ou horizontais, e até mesmo furos verticais ascendentes, as perfuratrizes manuais podem ser fabricadas com uma potência maior e equipadas com um sistema de avanço acoplado ao conjunto. Este recurso permite a sustentação e o posicionamento correto da ferramenta para a execução dos furos nestes casos específicos.

Além de realizar perfurações os martelos de coluna são utilizados na instalação de tirantes necessários para travamento do maciço.

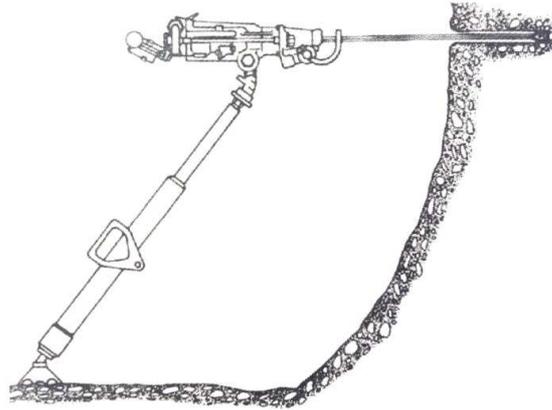


Figura 18 – Martelo de coluna

Fonte: Geraldi, 2011

2.2.4.2. PERFURATRIZ HIDRÁULICA (JUMBO)

Para a utilização de perfuratrizes rotopercussivas de maior porte, visando a uma maior velocidade de perfuração na frente de escavação, foram fabricados os primeiros conjuntos denominados *hydrabooms*. Nestes equipamentos, duas ou mais perfuratrizes, ainda pneumáticas, eram montadas em braços ou lanças dotados de movimentação independente, permitindo a execução de furos em toda a área da seção de escavação. Assim surgiam os primeiros jumbos de perfuração, que hoje são equipamentos essenciais na escavação de túneis em rocha, para se atingir altas produtividades no emprego da metodologia D&B. (GERALDI, 2011)



Figura 19 – Perfuratriz hidráulica (Jumbo)

Fonte: <http://www.portomaravilha.com.br/>, acessado em 2014.

2.2.4.3. ROMPEDORES HIDRÁULICOS

Os rompedores possuem funcionamento semelhante ao das perfuratrizes rotopercussivas, no entanto sem promover rotação na ferramenta de impacto. Ampla utilização na etapa de bate-choco das escavações de túneis utilizando a metodologia D&B. Também são utilizados para quebrar e fragmentar rochas, principalmente em maciços mais fraturados e alterados, blocos isolados e matacões provenientes da detonação das rochas, e para fragmentar maciços que estejam mais fraturados. (Mansur, 2011)



Figura 20 - Rompedor Hidráulico

Fonte: Autor, 2013

2.2.4.4. ESCAVADEIRA HIDRÁULICA

As escavadeiras hidráulicas são equipamentos com propulsão a diesel que possuem um grande braço articulado com uma concha, também articulada, na extremidade. Estas máquinas possuem grande alcance, pois podem girar em torno de um eixo central sobre suas esteiras.



Figura 21 - Escavadeira Hidráulica

Fonte: <http://brasil.cat.com/>, 2014

2.2.4.5. CARREGADEIRA DE RODAS

As carregadeiras são equipamentos sobre quatro rodas que possuem uma concha grande na frente. No entanto, por estar sobre rodas, tem maior mobilidade, podendo transportar o material por maiores distâncias.



Figura 22 – Carregadeira de rodas

Fonte: <http://brasil.cat.com/>, 2014

2.2.4.6. CAMINHÕES BASCULANTES

Os basculantes são caminhões que possuem uma caçamba acoplada na carroceria. Estes veículos são utilizados para transportar o material de escavação para seu destino final, que pode ser um bota-fora específico ou, no caso das escavações em rocha, há a possibilidade de ser encaminhado para uma central de britagem e reutilização da rocha escavada.



Figura 23 – Caminhão Basculante

Fonte: <http://www.lafaetelocacao.com.br/>, 2014

2.2.4.7. MANIPULADOR

Os manipuladores são veículos sobre rodas que possuem uma lança retrátil com uma plataforma de trabalho acoplada na sua extremidade. Dentre outras aplicações, este equipamento é utilizado para a realização do carregamento da frente de trabalho com explosivos (figura 15) e execução de tirantes na abóboda do túnel (figura 24).



Figura 24 - Manipulador

Fonte: Autor, 2013

2.2.5. PLANO DE FOGO E DETONAÇÃO

O plano de fogo é o projeto executivo para o desmonte (escavação) de rocha com uso sistemático de explosivo, onde serão definidos e apresentados preliminarmente o plano de perfuração, a qualificação e quantificação dos explosivos e os esquemas de ligação e iniciação entre os furos que serão detonados. Segundo Geraldi, 2011, as escavações de túneis em rocha que empregam a metodologia *Drill & Blast* tem como um de seus elementos básicos a projeção preliminar e os ajustes posteriores dos planos de fogo.

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

2.2.5.1. PILÃO

Nas escavações, o objetivo principal é provocar a fragmentação e o lançamento orientado da rocha para a frente livre, no entanto, nas escavações de túneis, essa frente livre não existe e terá de ser produzida para cada detonação ou avanço da frente, com a utilização de furos devidamente posicionados na seção de escavação, que juntos compõem o pilão. Dessa forma as minas do pilão serão as primeiras a serem detonadas, em seguida as minas mais próximas à frente livre aberta por ele, e assim sucessivamente. Como o pilão geralmente é posicionado no centro inferior da seção de escavação, esta se dá com a detonação em arcos concêntricos com o formato da abóboda do túnel. (figura 25)

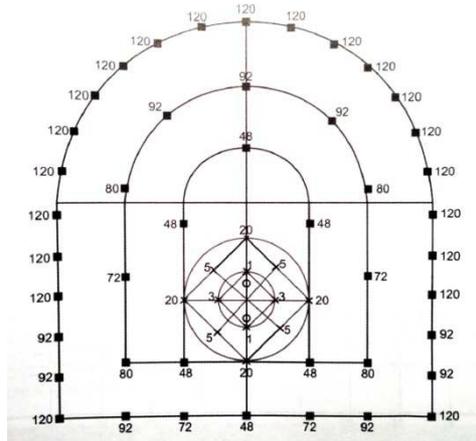


Figura 25 – Plano de fogo com arcos concêntricos

Fonte: Geraldi, 2011

2.2.5.2. INICIADORES E ACESSÓRIOS DE LIGAÇÃO

De acordo com Geraldi, 2011, em um plano de fogo devem ser definidos e quantificados todos os iniciadores e acessórios de ligação, bem como os retardos a serem utilizados. O esquema de interligação entre furos, a partir do furo de iniciação da detonação e sequencia de retardos, devem ser apresentados em “croquis”.

2.2.5.3. DISTRIBUIÇÃO DA FURAÇÃO

Conforme Geraldi, 2011, deverão ser devidamente marcados e perfurados na área correspondente à seção de escavação do túnel, um conjunto de furos horizontais, paralelos, com o mesmo diâmetro, extensão e direção perpendicular ao plano de escavação. Estes furos, normalmente paralelos ao eixo do traçado, serão distribuídos e denominados, em função de sua localização na seção de escavação, de acordo com o esquema da figura 26 a seguir.

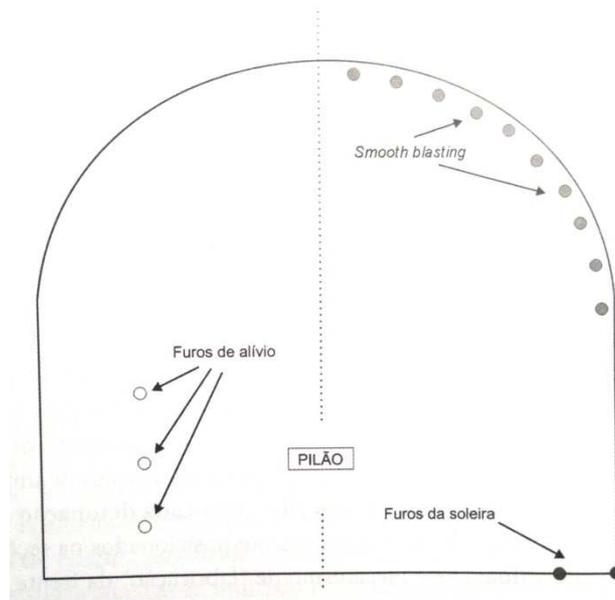


Figura 26 – Denominação dos furos

Fonte: Geraldi, 2011

2.2.5.4. RAZÃO DE CARGA (RC)

Denomina-se razão de carga a quantidade de explosivo, em gramas, que será necessária para fragmentar um metro cúbico de rocha e, de acordo com Geraldi, 2011, é um dos principais parâmetros de um plano de fogo.

Teoricamente, quanto maior a razão de carga utilizada, maior será a fragmentação da rocha, se o plano for projetado corretamente. Esta relação também se aplica a projeção da pilha de rocha que se formará na frente da bancada – quanto maior a RC, maior a projeção da rocha detonada. (GERALDI, 2011)

2.2.5.5. RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

Segundo o RTP – 03, “na elaboração do “Plano de fogo” é obrigatória a exigência de um profissional habilitado (blaster), responsável pelo armazenamento, preparação das cargas, carregamento das minas, ordem de fogo, detonação e retirada de explosivos não detonados e providências quanto ao destino adequado das sobras de explosivos.

Também segundo o RTP – 03, a quantidade de explosivos e acessórios necessários ao “Plano de fogo” deve ser restrita ao momento de detonação, evitando-se a estocagem próxima à frente de trabalho.

2.2.6. CONTROLE DE VIBRAÇÃO / SISMOGRAFIA

A metodologia de escavação adotada no projeto é a D&B (*Drill and Blast*), a qual utiliza explosivos para a fragmentação da rocha a ser escavada. As vibrações causadas pelas detonações podem causar danos ao meio ambiente, a edificações vizinhas e ao próprio maciço rochoso no qual se trabalha. Segundo Geraldi, 2011, em se tratando de uma obra urbana com muitas edificações nas áreas de influência das escavações, torna-se importante o controle das vibrações sentidas pelos prédios vizinhos no momento das detonações.

De acordo com Konya *et al.*, 1998, os parâmetros da vibração são as propriedades fundamentais do movimento que se utilizam para descrever o caráter do movimento do maciço. Estes são: deslocamento, velocidade, aceleração e frequência. A velocidade de partícula (V_p) tem sua importância ressaltada por Geraldi, 2011, como o parâmetro que vem sendo utilizado internacionalmente na medição e prevenção contra danos que podem ser causados pelas detonações.

A captação e leitura destas propriedades são realizadas por um aparelho sismográfico que lê e gera um relatório que será o parâmetro de avaliação dos efeitos das detonações. Normalmente um registro sismográfico mostrará quatro gráficos. Três descrevem as vibrações e um descreve o impacto sonoro. (KONYA *et al.*, 1998)



Figura 27 – Monitoramento de vibração, sismógrafo

Fonte: Autor, 2014

Os riscos de ocorrência de danos induzidos por vibrações do terreno devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência da velocidade de vibração de partícula de pico. Como cada tipo de estrutura apresenta uma frequência natural de vibração, pode-se estabelecer um limite de velocidade de vibração de partícula de pico (mm/s) aceitável em áreas residenciais para que não ocorram danos às mesmas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 9653 (ABNT, 1986), e posteriormente em sua revisão na NBR 9653 (ABNT, 2005), estabelece os limites de velocidade de vibração de partícula de pico para cada intervalo de frequência em áreas residenciais iniciando em 15 mm/s na frequência de 4 Hz e crescendo até 50 mm/s nas frequências superiores a 40 Hz. (FRANÇA *et al.*, 2011)

3. APLICAÇÃO DO NATM / D&B EM EMBOQUE COM SEÇÃO PLENA EM ROCHA.

O túnel da Via binária é parte do projeto de revitalização da região portuária do Rio de Janeiro, e ajudará a reestabelecer a integração desta parte do centro da cidade que se encontrava abandonada e isolada. Ao final da sua construção, o túnel ligará o final da Rua Primeiro de Março à região portuária, próximo ao antigo Moinho Fluminense. Por se tratar de uma região com alta ocupação das áreas na superfície, a primeira grande dificuldade foi a de identificar os pontos de acesso às escavações e instalação dos canteiros. Neste contexto, tem-se utilizado cada vez mais os poços de acesso verticais, pois os acessos horizontais tem se tornado menos viáveis, uma vez que ocupam mais área em planta. Além dos emboques obrigatórios, entrada e saída do túnel, foi eleita a Praça Mauá para a construção de um poço de acesso à escavação por se localizar convenientemente na região central do túnel e possibilitar a implantação de um canteiro de obras com uma praça de trabalho suficiente para viabilizar a escavação.

Naturalmente, ao fim da escavação do poço de acesso foram realizados dois emboques, um para escavação sentido Moinho Fluminense e o outro para a escavação sentido Rua Primeiro de Março, sendo este último o abordado neste estudo de caso e aqui identificado como Emboque RB1.



Figura 28 – Localização do Poço de acesso na Praça Mauá

Fonte: Autor, 2014.

3.1. CARACTERÍSTICAS DO EMBOQUE RB1 - POÇO PRAÇA MAUÁ

O método de escavação adotado para todo o túnel foi o NATM. Nos trechos em rocha, portanto, a escavação se deu pela aplicação da metodologia D&B, que envolve a utilização de explosivos e detonações sistemáticas.

O poço de acesso da Praça Mauá possui 26,00 metros de diâmetro foi escavado até a cota -38,00 metros, com profundidade total de aproximadamente 41,00 metros. O emboque sentido RB1 encontrou-se todo em rocha com cobertura maior que 5,00 m ao longo de toda a sua abóboda, o que garantiu uma melhor situação de segurança da estabilidade do maciço.

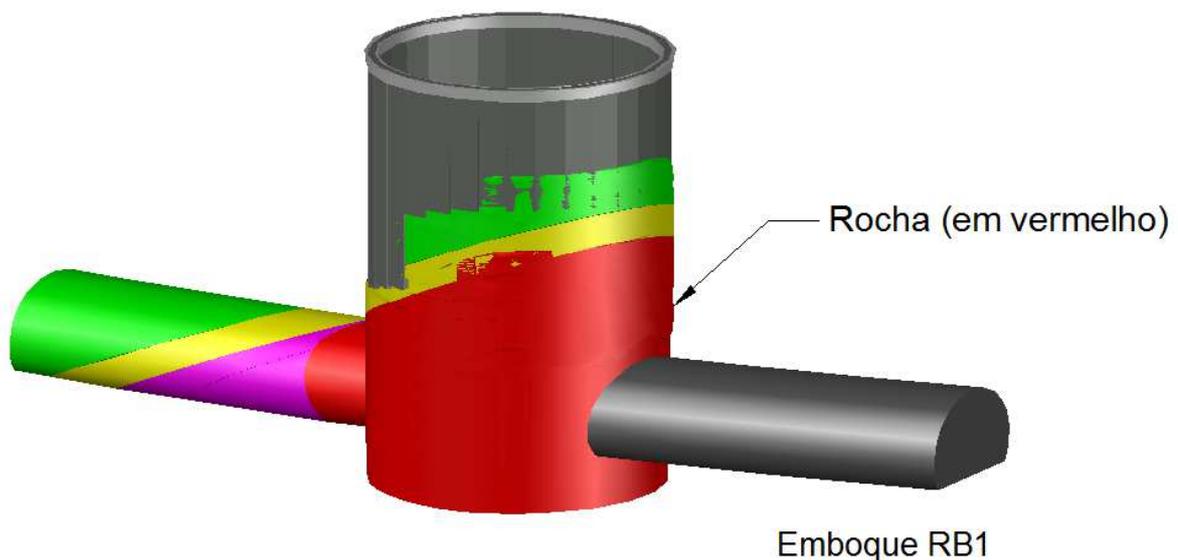


Figura 29 – Visão 3D do Poço de acesso da Praça Mauá

Fonte: Autor, 2014.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

Como se trata de uma escavação NATM a primeira ação a ser tomada é a de identificação da classe do maciço no qual se dará a escavação. Terminada a escavação do poço de acesso até a sua cota final, quando se pôde ter uma visão clara do maciço na região do emboque, foi realizada pelo ATO a classificação geomecânica do maciço rochoso (Anexo 4).

A rocha na região do emboque apresentou apenas descontinuidades localizadas. Como é possível visualizar na figura 30 a seguir, há uma fratura sub-vertical (em amarelo) próxima ao eixo da seção do túnel e uma fratura de alívio, sub-horizontal (em vermelho), perpendicular ao eixo do túnel e com mergulho em sentido contrário ao da escavação.



Figura 30 – Fraturas no maciço

Fonte: Autor, 2012.

A avaliação do ATO considerou os parâmetros previstos no método de classificação proposto por Bieniawski, que estão resumidos na tabela 2 a seguir. Como não houve a presença de famílias de fraturas, as descontinuidades foram consideradas localizadas e maiores que 20,00 metros, e, além disso, não houve presença de água na região do emboque. Apesar de ter sido penalizado pela presença de descontinuidade paralela ao eixo do túnel, o maciço foi classificado como uma rocha de classe II.

Tabela 2 – Classificação geomecânica do maciço

Fonte: Consórcio XPTO, 2012

Tabela com a classificação geomecânica do emboque RB1		
Parâmetros	Emboque RB1 (Leste)	
<i>Resistência da Rocha</i>	>250 MPa	15
<i>RQD</i>	90-100%	20
<i>Espaçamento das descontinuidades</i>	Descontinuidades localizadas	20
<i>Condição das descontinuidades</i>	Descontinuidade >20m, sem separação, superfícies ligeiramente rugosas, preenchimento duro (<5mm) paredes de rocha não alteradas.	19
<i>Presença de água</i>	Região do emboque - seca	15
<i>Orientação das descontinuidades</i>	Descontinuidade paralela ao eixo do túnel	-12
<i>Classe geomecânica</i>	Classe II	77

3.3. CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DO MACIÇO

Para o momento de escavação do emboque do túnel em questão já haviam sido instalados pinos de controle de movimentação nas edificações lindeiras, marcos superficiais para medição dos reclaques na superfície, tassômetros para medir a movimentação profunda dos maciços, além de piezômetros e indicadores de nível d'água (INA).

3.4. TRATAMENTO DO EMBOQUE ANTES DA ESCAVAÇÃO

Inicialmente foi necessário preparar o emboque para que fosse possível começar a escavação do túnel. Primeiramente foram executadas duas linhas de tirantes, no contorno da abóboda da seção, executados de forma intercalada formando uma malha “pé de galinha” espaçada de 1,00m, como ilustra o desenho esquemático da figura 29. Os tirantes, com 4,00m de comprimento, foram fixados com resina, 1,00m no fundo do furo com resina de pega rápida e os 3,00m restantes com resina de pega lenta.

À frente dos tirantes, ao longo de todo o contorno da abóboda da seção, foram fixadas duas camadas de malha de aço (Q-246) e preenchimento com concreto projetado convencional ($F_{ck} > 30\text{MPa}$).

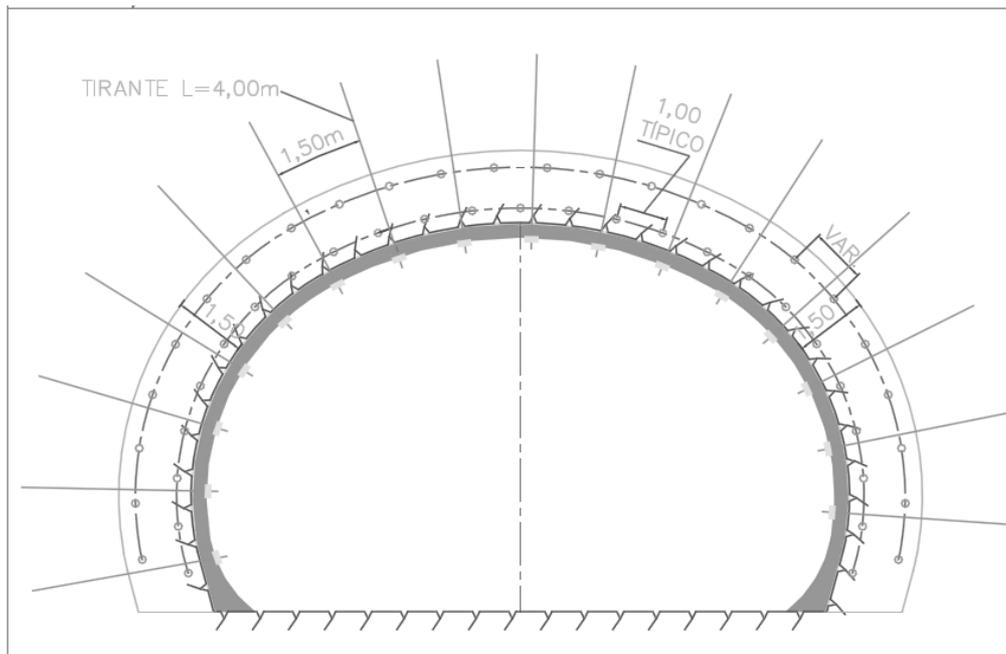


Figura 31 – Vista Frontal do tratamento do emboque RB1

Fonte: Consórcio XPTO, 2012

Nos primeiros $6,50\text{m}$ do túnel foi aplicado um tratamento sistemático com a aplicação de tirantes de resina no sentido radial do arco da seção de escavação, também com $4,00\text{m}$ de comprimento sendo $1,00\text{m}$ no fundo do furo com resina de pega rápida e os $3,00\text{m}$ restantes com resina de pega lenta. Levou-se o tratamento com malha de aço e concreto projetado por $1,00\text{m}$ para dentro do túnel. A partir deste ponto foi aplicada somente uma camada de 5 cm de concreto projetado até o final dos $6,50\text{m}$ de tratamento de emboque, conforme ilustra a figura 30.

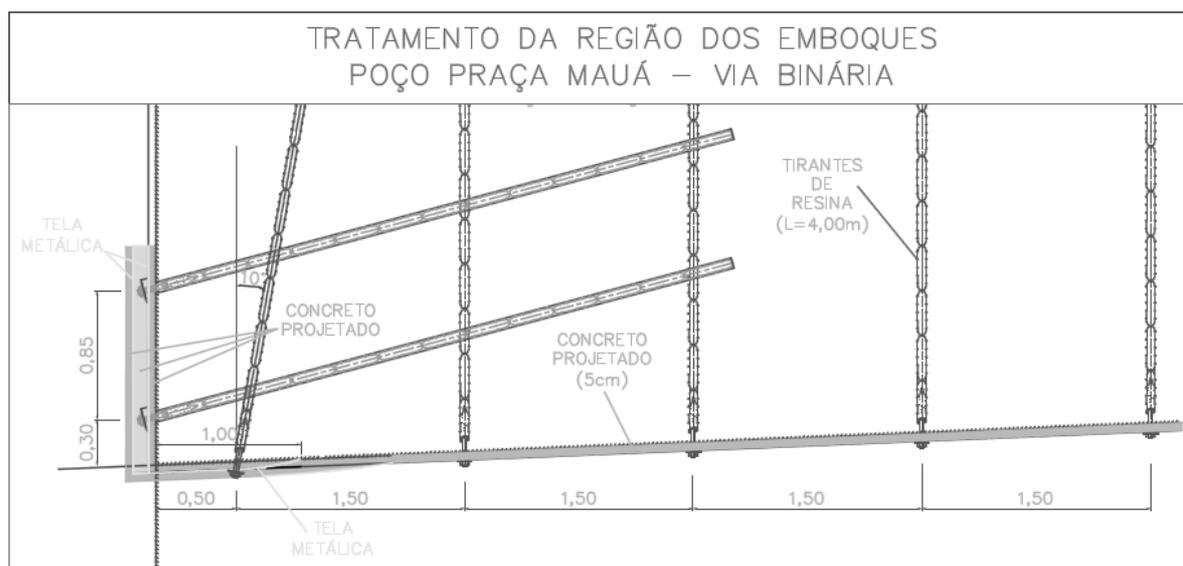


Figura 32 – Corte do tratamento do emboque RB1

Fonte: Consórcio XPTO, 2012

Para a execução da ancoragem de cada tirante tirantes, no fundo do furo utilizou-se três cartuchos de resina “pega rápida” e no trecho livre do tirante, cinco cartuchos de resina de “pega lenta”. As resinas foram misturadas por cerca de 1 minuto e, após 20 a 30 minutos de mistura, foi aplicado o torque com torquímetro ou chave de impacto na posição definida no processo de qualificação.

3.5. PARCIALIZAÇÃO DA SEÇÃO

Como o emboque em questão localiza-se no centro da cidade do Rio de Janeiro, RJ e há muitos edifícios e circulação de pessoas próximas ao canteiro de obras, optou-se por adotar um avanço bastante cauteloso do emboque. Além do fato de este ter sido o primeiro emboque no maciço, e, apesar de terem sido feitas todas as investigações geotécnicas preliminares necessárias, tomou-se esta medida por motivos de segurança, para que o maciço não fosse mobilizado de uma só vez.

A fim de minimizar os efeitos da concentração de tensões mobilizadas do maciço na região do emboque, que poderiam causar movimentações, relaxamento ou até o colapso do maciço, adotou-se então a técnica de parcialização da seção em duas etapas onde primeiro foi escavada área central da seção, chamada de galeria, e posteriormente seriam escavadas as áreas laterais, chamadas de alargamento.

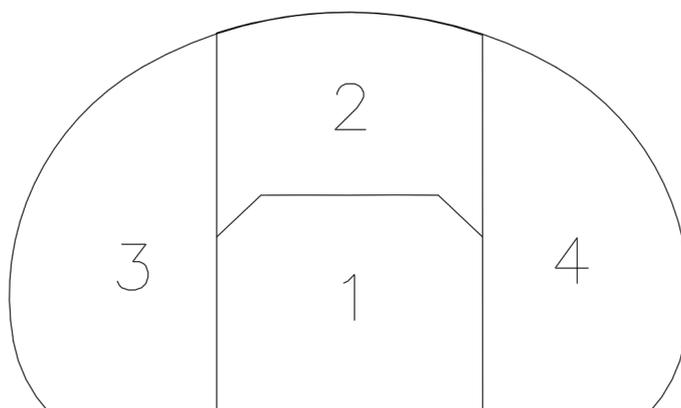


Figura 33 – Parcialização da seção de escavação.

Fonte: Autor, 2014

A escavação se deu segundo sequencia de numeração indicada na figura. Primeiro foi realizada a escavação da parte inferior da galeria, etapa 1, com avanço de 2,40m. Em seguida foi feita a escavação da etapa 2, parte inferior da galeria, e conseqüente tratamento da abóboda (atirantamento, fixação de malha de aço e

aplicação de concreto projetado). Executou-se então novamente as etapas 1 e 2 para se atingir a defasagem especificada em projeto, três avanços de 2,40m. Foram em seguida executadas as escavações das etapas 3 e 4 separadamente. A partir desta fase foram sendo executados avanços intercalados, galeria e alargamento, mantendo-se assim a defasagem de projeto entre a escavação da galeria e a escavação do alargamento. Este procedimento foi adotado até que fosse atingida a extensão de 6,50m de seção totalmente escavada com tratamento finalizado. A imagem a seguir mostra a escavação da galeria do emboque defasada do alargamento.



Figura 34 – Escavação da galeria central

Fonte: Autor, 2012

3.6. ESCAVAÇÃO D&B E EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

A furação da frente foi realizada com uma perfuratriz rotopercussiva hidráulica de três braços. Como o emboque do túnel localiza-se num poço com acesso limitado, algumas das etapas do ciclo de escavação tornam-se um pouco mais difíceis. Todos os materiais e equipamentos, tanto de pequeno como de grande porte, precisam ser transportados ao fundo do poço diversas vezes por dia.



Figura 35 – Furação com Jumbo

Fonte: Autor, 2012

O material escavado, após a fragmentação promovida pelo plano de fogo, passa a conter muitos vazios. Na obra, para fins de dimensionamento e planejamento, foi adotada uma estimativa de empolamento de 50% para a rocha. Devido ao grande volume de material produzido pela detonação, ponto crítico do ciclo da escavação passa a ser a limpeza do material escavado. Para ser retirado da frente de escavação, o material era retirado da cabeceira com uma escavadeira que o despejava numa caçamba. O transporte vertical da rocha fragmentada foi realizado pelo içamento com um pórtico rolante, destas caçambas metálicas içadas por um guindaste que o despejam em caminhões basculantes que, por sua vez, finalizam o transporte levando o material para um bota-fora.



Figura 36 – Vista aérea do poço com pórtico para içamento de cargas

Fonte: <http://www.skyscrapercity.com/>, acessado em 2014

3.7. PLANO DE FOGO E DETONAÇÃO

Como a escavação da seção foi parcializada, o plano de fogo (Anexo 3) também precisou ser dividido para cada etapa de detonação, como ilustra a figura 33. Na primeira etapa, como não havia frente livre para a detonação, fez-se necessária a colocação de um pilão no centro. Para a detonação das etapas seguintes não houve mais a necessidade de executar pilões, pois no momento das suas detonações já havia as frentes livres abertas pela primeira etapa.

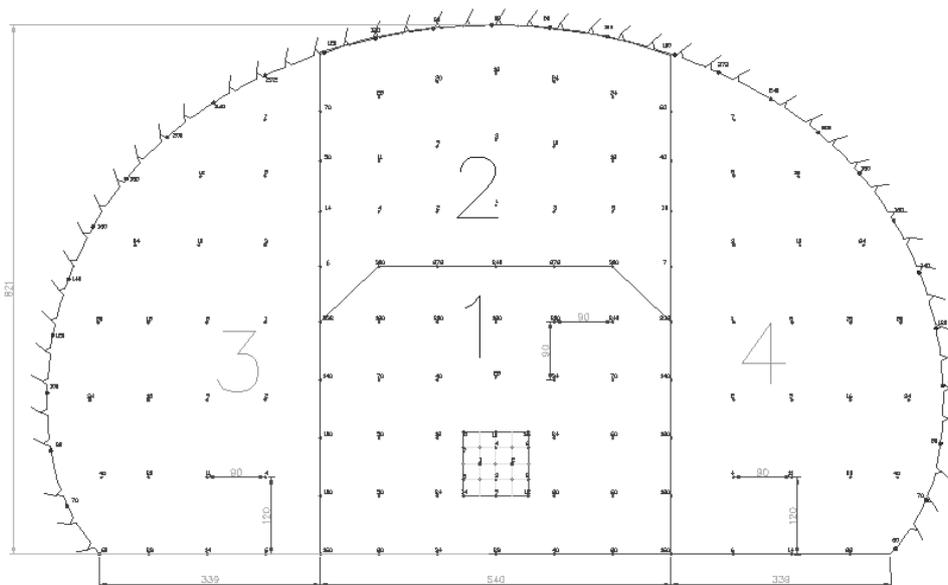


Figura 37 – Plano de fogo da seção, por etapas.

Fonte: Consórcio XPTO, 2012.

Como o pilão tem função de abertura de frente livre para a detonação de toda a seção, algumas medidas foram tomadas para facilitar o seu arrancamento (fragmentação). A distância entre os furos foi reduzida e foram utilizados quatro cartuchos de explosivos por furo (totalizando 1,48 kg/furo), como mostra a tabela 3. Foram executados sete furos vazios, (furos de alívio), como indica o detalhe do pilão (figura 38).

Tabela 3 – Detalhes do plano de fogo

Fonte: Consórcio XPTO, 2012.

1ª Etapa - Plano de Fogo Básico							
Área da seção (m ²)	23,30						
Profundidade de perfuração(m)	2,40						
Diametro de perfuração(mm)	45,00						
Diametro de perfuração(mm) - Furos Vazios	127,00						
Avanço projetado(m)	2,10						
Volume por detonação(m ³)	48,93						
Razão de Carga (kg/m ³)	1,42						
Perfuração Total(m)	156,00						
Perfuração específica (m/m ³)	3,19						
CME - Carga máxima por espera (kg/m ³) - Tempo 24	2,96						
Consumo específico de iniciadores - NONEL (PC/m ³)	1,19						
Perfuração e Detonação							
POSIÇÃO	Nº FUROS	EXPLOSIVO	BITOLA	PESO CART	CART/ FURO	Kg/ FURO	TOTAL (Kg)
PILÃO	14	lbeigel	1.1/4" x 16"	0,3700	4	1,48	20,72
PILÃO VAZIO	7	lbeigel	1.1/4" x 16"	0,3700	0	0	0
SAPATEIRA	7	lbeigel	1.1/4" x 16"	0,3700	3	1,11	7,77
CONTORNO	0	lbeigel	1" x 8"	0,1200	0	0	0
ALIVIO	37	lbeigel	1.1/4" x 16"	0,3700	3	1,11	41,07
TOTAL	65						69,56

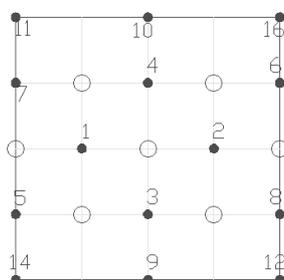


Figura 38 – Detalhe do Pilão

Fonte: Consórcio XPTO, 2012.

Para conter a projeção de material de escavação e impedir que ocorressem ultralançamento de rocha, foi necessário realizar a cobertura da frente a escavar com uma camada de pneus conectados por correntes de ferro e com uma pilha de material de granulometria fina por cima. Esta medida de segurança foi tomada para todas as detonações realizadas no emboque.

3.8. ISOLAMENTO E EVACUAÇÃO DA ÁREA

A próxima etapa, isolamento e detonação, é realizada pela equipe de isolamento de área que dará início aos procedimentos de isolamento e evacuação da área de segurança.

3.9. CONTROLE DE VIBRAÇÃO / SISMOGRAFIA

A utilização do D&B em zonas urbanas pode trazer consequências indesejáveis. As vibrações causadas pela detonação da rocha, que se propagam pelo maciço, são sentidas nas edificações próximas à região da escavação. Como o emboque em questão localiza-se sob o centro da cidade do Rio de Janeiro, naturalmente as detonações passariam a fazer parte do cotidiano da população que habita o entorno. As detonações também provocam grandes deslocamentos de massas de ar, que são sentidos nas regiões próximas e podem trincar janelas e fachadas de vidro.

Com o intuito de minimizar esses efeitos das vibrações, foram adotados alguns procedimentos para a realização das escavações na região. Para diminuir o pico de vibração no momento da detonação, esta foi dividida em etapas, o que permitiu a utilização de uma carga máxima por espera (CME) relativamente baixa. Adotou-se também um passo de avanço mais curto para que fosse utilizada uma menor quantidade de explosivos por metro cúbico, ou seja, a diminuição da razão de carga (RC). Para diminuir os efeitos causados pelo grande deslocamento de ar foi evitada a utilização de cordéis na ligação dos explosivos.

Antes de cada detonação três sismógrafos eram instalados em três edificações diferentes, próximas à região da detonação. Para a primeira detonação do emboque RB1, etapa 1 do plano de fogo, realizada no dia 18/10/2012, os aparelhos

sismográficos foram posicionados segundo indicação na figura 39. Fazendo uma análise dos relatórios sismográficos desta detonação, que constam no anexo 4, pôde-se observar que todos os aparelhos as frequências de vibração ficaram abaixo do limite aceitável para a vibração de estruturas sensíveis (linha 3 do gráfico). Adicionalmente, os valores indicativos da velocidade da partícula de pico (*Peak Vector Sum*), estão todos abaixo dos limites estipulados pela NBR 9653 (ABNT, 2005).



Figura 39 – Prédios nos quais foram instalados os sismógrafos.

Fonte: Autor, 2014.

Após cada detonação o relatório sismográfico, que fornece todos os parâmetros sobre vibrações e deslocamentos de ar, era avaliado pelos engenheiros, consultores e equipe de ATO. Caso algum destes parâmetros estivesse fora dos padrões adotados, uma nova avaliação do plano de fogo era feita para readequá-lo à segurança.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução econômica do Brasil tem possibilitado a implementação de muitos projetos. O país está se desenvolvendo, possibilitando maior atuação do setor da construção civil, seja no desenvolvimento de novos empreendimentos imobiliários, seja na construção de novas fontes de energia, como usinas hidrelétricas, na materialização de projetos de infra-estrutura, como: sistemas de abastecimento de água, esgoto e drenagem na ampliação de cidades, e na realização de projetos de sistemas de transporte.

Aliado ao desenvolvimento econômico, as grandes cidades têm crescido muito, porém desordenadamente. Nas últimas décadas, pode-se assistir um aumento significativo da necessidade de desenvolvimento das redes de transporte no país. Conectando as grandes cidades, as rodovias estão tendo as suas pistas ampliadas e muitas outras tem sido construídas. Nos centros urbanos surgem cada vez mais novas avenidas e novas linhas de metrô. Os novos sistemas de transporte tem criado razoável demanda por obras enterradas, particularmente de túneis, que viabilizem a implantação dos projetos.

Nos meios urbanos as construções de túneis se justificam por se tratarem de obras enterradas que não demanda ocupação de grandes áreas na superfície, que são cada vez mais escassas. Nas rodovias, com o aumento do rigor na definição dos traçados das vias, por questões ambientais e de segurança, a opção por túneis torna-se cada vez mais adequada.

No Brasil, os túneis rodoviários possuem, em sua grande maioria, não mais que 2km, não justificando assim a implantação de equipamentos para execução mecanizada. Desta forma, o método NATM tem sido amplamente utilizado na escavação de túneis, tanto para solo como para rocha.

Para o caso da escavação de túnel subterrâneo em rocha pelo NATM, quando se realiza desmontes de rocha a fogo, a atividade também gera impactos negativos como vibrações, impactos sonoros e os próprios riscos inerentes à obras subterrâneas que podem afetar a integridade dos que se encontram nas proximidades. Com o avanço da tecnologia, inovações vêm surgindo na área da escavação de rochas, com o desenvolvimento de novos explosivos, equipamentos e acessórios, com objetivo de aumentar a produtividade e reduzir impactos negativos. Diante dessa situação, percebe-se a importância do conhecimento e esclarecimento de tal atividade

que ocorre nos canteiros de obra dessas construções, de modo a reduzir impactos negativos gerados.

Este trabalho se limitou à análise e descrição das escavações mais voltadas para rocha, em especial para desmontes subterrâneos, por esta ser a situação do estudo de caso escolhido. No entanto, o tema escavações subterrâneas, englobando as escavações em solo traz a tona muitas outras discussões ricas.

Os desmontes aparecem não só nas construções de túneis, como também em diversas obras, usinas hidrelétricas, mineração e obras de saneamento. Desse modo, o assunto é de grande importância para a formação de um engenheiro civil, tendo em vista a possibilidade de se deparar, ao longo de sua carreira, com situações em que esse tipo de serviço se faça necessário.

Em geral, esse tema é bastante conhecido por engenheiros de minas. O trabalho, no entanto, buscou apresentar informações que, na opinião do autor, fossem relevantes para engenheiros civis e estudantes de engenharia civil.

O autor sugere que trabalhos futuros apresentem como foco a segurança na atividade escavação, requisito esse importante a todas as atividades da construção civil e cada vez mais exigido nas obras atuais. O foco da durabilidade e desgaste de equipamentos de perfuração apresenta grande potencial para novos estudos, mostrando a importância da correta afiação dos equipamentos permitindo suas maiores durabilidades e maiores produtividades em campo.

Dessa forma, pode-se concluir que o trabalho, apresentando teorias sobre o a escavação em rocha para a execução de túneis e sua aplicação em um estudo de caso desenvolvido pelo autor, enquanto estagiário, possibilitou ao leitor conhecer peculiaridades de uma atividade de grande importância para a construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campanhã, Carlos Augusto e Boscov, Pedro. **NATM - Túneis em Terreno Pouco Consistentes**. Manual Técnico, 1998.

CBPO e Figueiredo Ferraz (Empresas). **O NATM – Novo Método Austríaco de Execução de Túneis “New Austrian Tunneling Method”**. Manual técnico, 1994

França, Vasconcelos, Chimpliganond, *et al*, 2011. “Estudo das vibrações geradas por detonações feitas na obra civil da eclusa 2 de Tucuruí.” **Revista Brasileira de Geofísica**. 29(1) pp. 57-70

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

Konya, Calvin J. e Albarrán N., Enrique, 1998. **Diseño de Voladuras**. Editora Ediciones Cuicatl. Cidade do México, México.

Murakami, Cláudio Atushi, 2001. **Noções básicas para o acompanhamento técnico de obras de túneis**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP.

Rabcewicz, Ladislaus von. Novembro, 1964. “The New Austrian Tunnelling Method – Part One”. **Water Power**. pp. 453-467

Rabcewicz, Ladislaus von. Dezembro, 1964. “The New Austrian Tunnelling Method – Part Two”. **Water Power**. pp. 511-515

Rabcewicz, Ladislaus von. Novembro, 1964. “The New Austrian Tunnelling Method – Part Three”. **Water Power**. pp. 19-24

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

RTP – 03 – **Recomendação Técnica de Procedimentos – Escavações, Fundações e Desmontes de Rocha**, Fundacentro, 2002.

Villas-Bôas, Bruno Mansur, 2011. **Estudo de Caso: Desmonte de Rocha para a Execução de Estruturas da UHE Santo Antônio – RO**. Projeto de Graduação - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

Zanelato, Elieser Antônio, 2003. **Escavação de Túneis – Métodos Construtivos**. Projeto de Graduação da Universidade Anhembi Morumbi, SP.

REFERÊNCIAS ELETRÔNICAS

Caterpillar. **Máquinas – Relação de Produtos.**

Disponível em: < <http://brasil.cat.com/cda/layout?m=37840&x=12/> >. Acessado em: Fevereiro de 2014.

CDURP - Companhia de Desenvolvimento Urbano da Região do Porto do Rio de Janeiro. **Vídeos sobre a metodologia construtiva dos túneis do Porto Maravilha.**

Disponível em: < <http://www.portomaravilha.com.br/web/esq/videos.aspx/> >. Acessado em: Fevereiro de 2014.

Lafaete – Locação de Equipamentos. **Equipamentos – Relação de Produtos.**

Disponível em: < <http://www.lafaetelocacao.com.br/pt/equipamentos/caminhao-basculante/> >. Acessado em: Fevereiro de 2014.

(Dr.) Sauer Group, 20 de Janeiro de 2004, Herndon, VA, USA. **NATM/SEM Construction Method.**

Disponível em: < <http://www.dr-sauer.com/technical-info/natm/> >. Acessado em: Janeiro de 2014.

Soares, Rafael. **Porto Maravilha – Revitalização da Zona Portuária do Rio.**

Disponível em: < <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=98664329/> >.

Acessado em: Fevereiro de 2014.

Wallis, Shani. Outubro de 2011. **Salzburg marks 50 years of NATM.**

Disponível em: < <http://www.tunneltalk.com/Conferences-Oct12-Salzburg-marked-50-years-of-NATM.php/> >. Acessado em: Janeiro de 2014.

Willis, Zachery. **Tunneling History and the East River Tunnels.**

Disponível em: < <http://eastriverhistory.webs.com/transportation/tunnelhist.htm/> >.

Acessado em: Fevereiro de 2014.

ANEXO 1

Tabelas de classificação do maciço pelo método proposto por Bieniawski (1989)

Tabela - Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) - "Rock Mass Rating - RMR".

Parâmetros		Coeficientes				
1	Resistência da rocha intacta	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial MPa
	Point Load					
2	Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa
	Pesos	15	12	7	4	2
3	R.Q.D.	90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %
	Pesos	20	17	13	8	3
4	Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Pesos	20	15	10	8	5
5	Condição das descontinuidades (ver Tabela 3)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm
	Pesos	30	25	20	10	0
5	Presença de água	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
		0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Condições gerais	Completamente seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água
Pesos	15	10	7	4	0	

Tabela - Classificação da condição das descontinuidades - RMR (1989).

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Tabela - Efeito da orientação das descontinuidades - RMR (1989).

Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção 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

Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

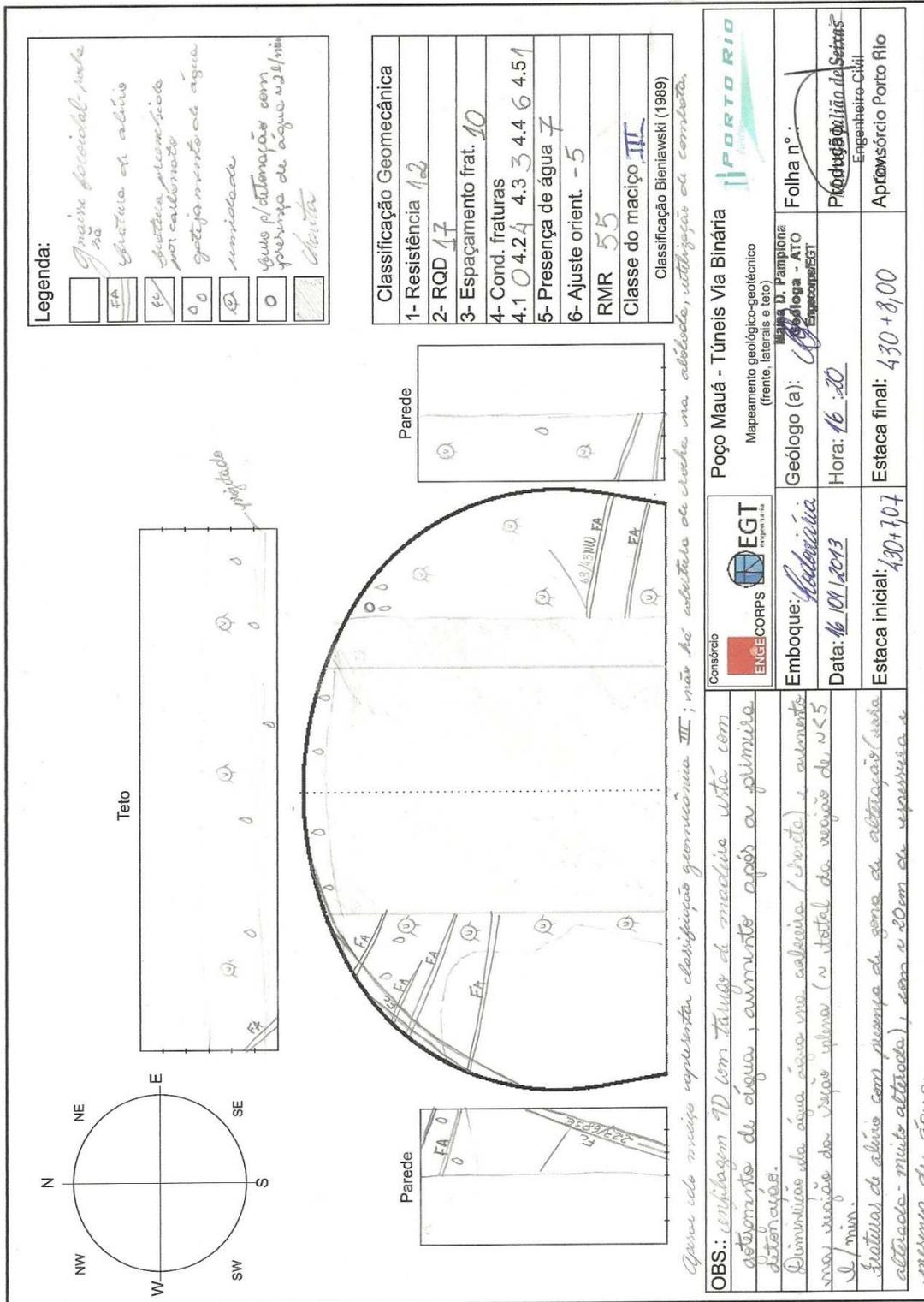
Tabela - Classes de maciços - RMR (1989).

Peso global	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão da massa rochosa (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	> 45	35-45	25-35	15-25	<15

ANEXO 2

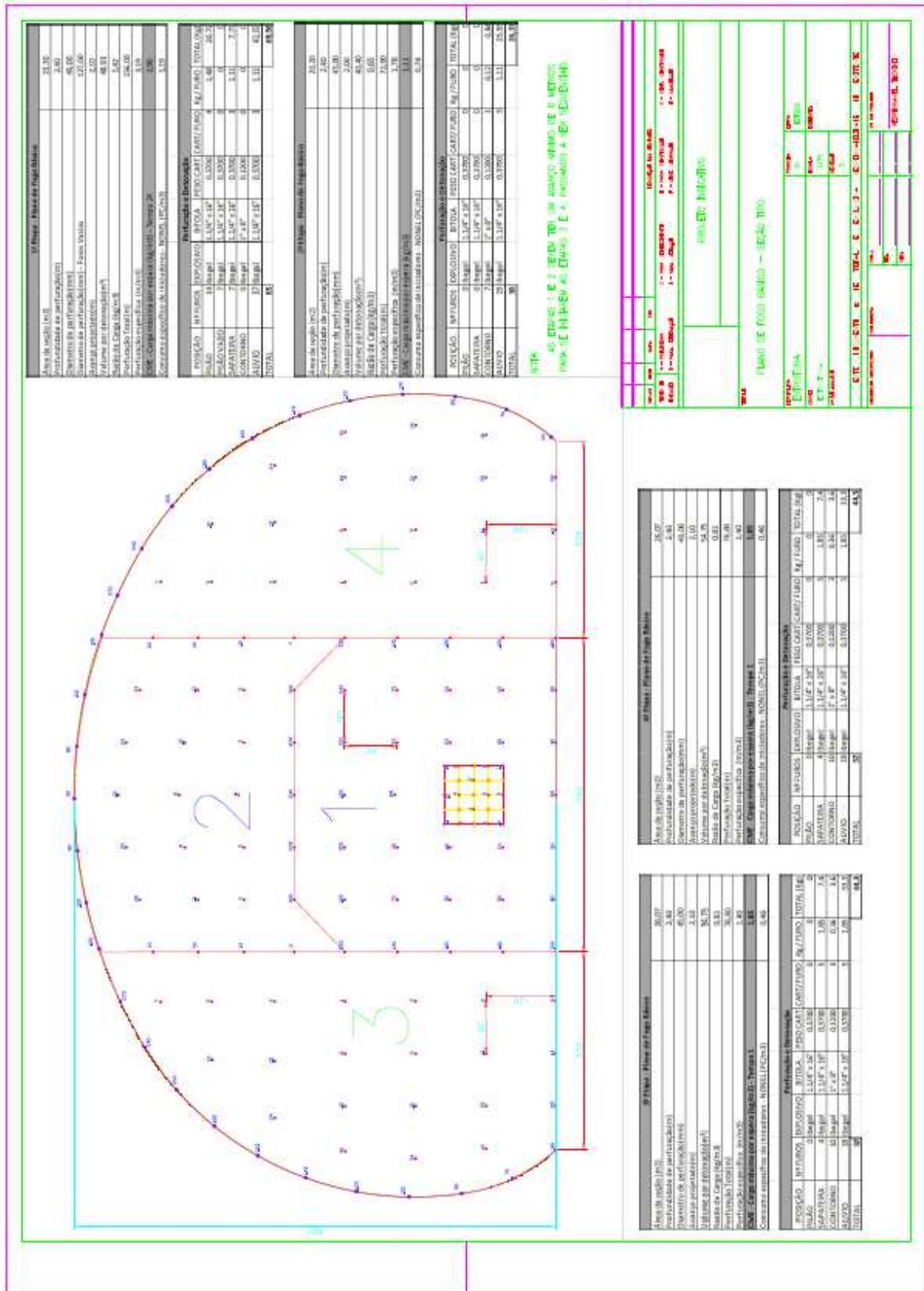
Relatório de mapeamento da frente a escavar.

(Fonte: Consórcio XPTO, 2012)



ANEXO 3

Plano de Fogo indicativo do emboque RB1 do Túnel da Via Binária – Original impresso separadamente em folha tamanho A3 (Fonte: Consórcio XPTO, 2012)



ANEXO 4

Relatórios de sismografia da detonação da 1ª Etapa do Plano de Fogo do emboque RB1 do Túnel da Via Binária. (Fonte: Consórcio XPTO, 2012)

Relatório sismográfico do Prédio 05:

GeoSonics Inc. Seismic Analysis Velocity Waveform Analysis

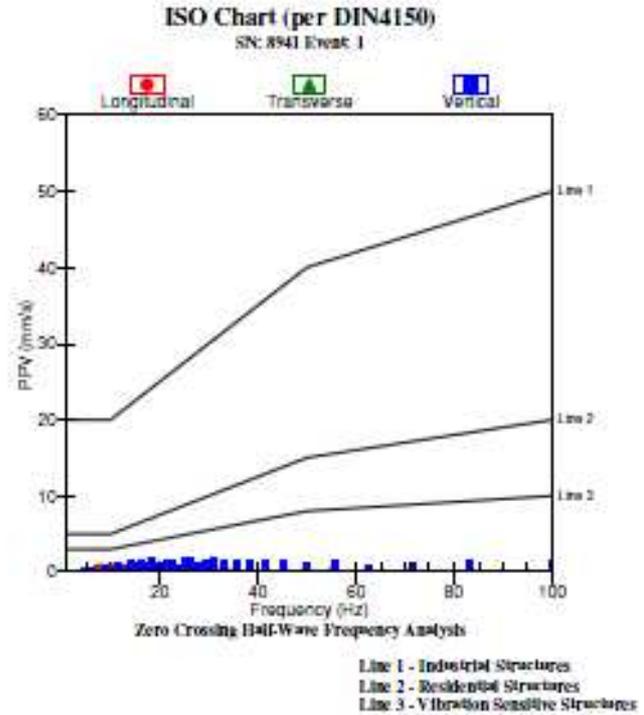
Serial No: 8941 v471
 Date: 10/18/2012 05:02:36
 Event No: 1
 Record Time: 5.0 s
 Client:
 Operation: POÇO PRACA MAIOA
 Location: PREDIO-05 5 AND
 Distance:
 Operator: EIDSON
 Comment:
 Seismic Trigger: 0.51 mm/s
 Sound Trigger: 136 db

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	0.89	0.51	1.65
FREQ (Hz)	20.0	17.9	18.5
PD (dBS)	2.18	0.78	1.09
PPA (g)	0.033	0.026	0.072
Peak Vector Sum:	1.65 mm/s		
Peak Air Pressure:	136 db		
	0.01820 PSI @ 41.7 Hz		

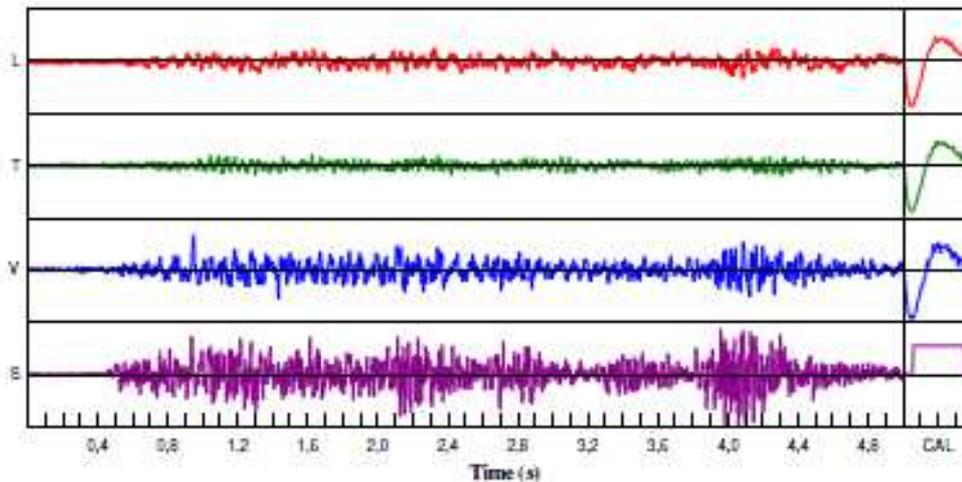
Additional Info:

Shaketable Calibrated: 05/09/2012
 By: GeoSonics Inc.
 359 Northgate Drive
 Warminster, PA 19086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2599

Velocity Waveform Graph Scale:
 Time Scale: 0.100 s
 Seismic Scale: +/- 2.95 mm/s
 Sound Scale: +/- 0.0181 PSI



Velocity Waveform SN: 8941 Event 1



Relatório sísmográfico do Prédio 07:

GeoSonics Inc. Seismic Analysis
Velocity Waveform Analysis

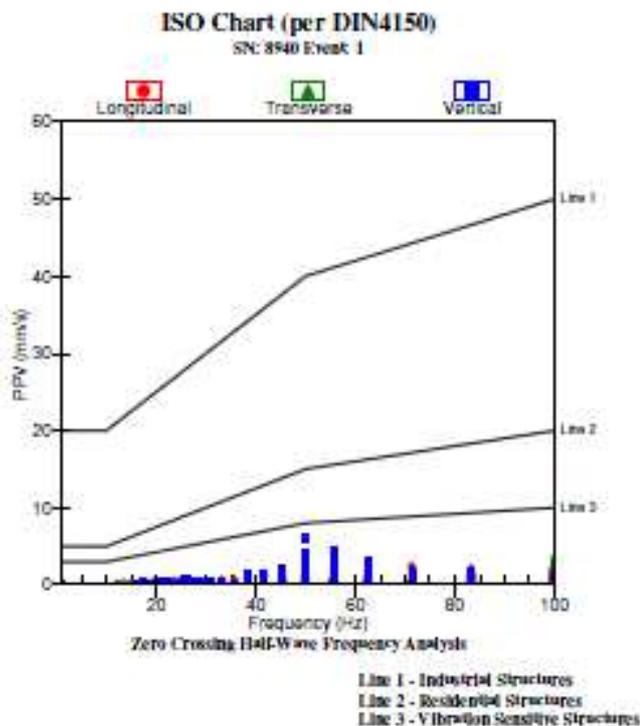
Serial No: 8940v4.71
 Date: 10/18/2012 05:02:41
 Event No: 1
 Record Time: 5.0 s
 Client:
 Operation: POÇO PRACA MAIA
 Location: PRÉDIO 07
 Distance:
 Operator: GILVAN
 Comment:
 Seismic Trigger: 0.51 mm/s
 Sound Trigger: 136 db

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	2.86	3.68	6.29
FREQ (Hz)	125.0	125.0	70.0
PD (0.1mm)	1.40	0.64	1.76
PPA (g)	0.189	0.260	0.202
Peak Vector Sum:	6.54 mm/s		
Peak Air Pressure:	136 db		
	0.01845 PSI @ 38.5 Hz		

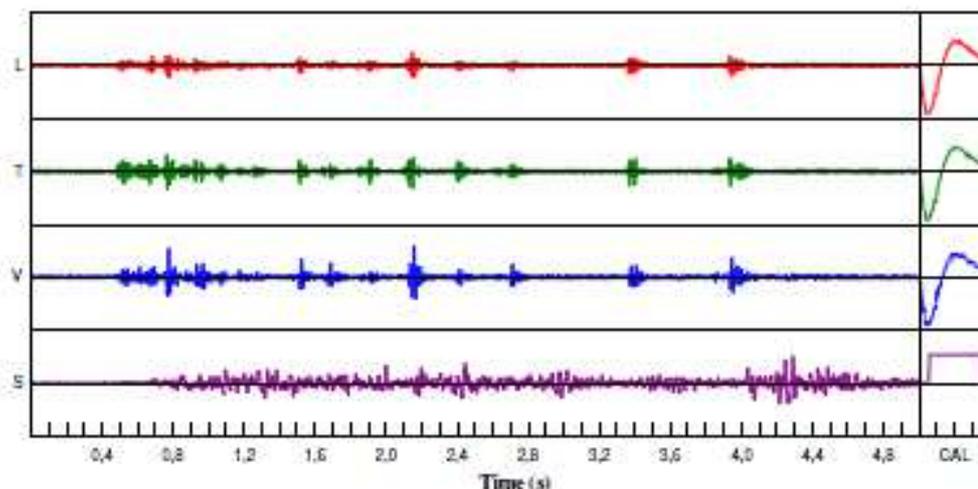
Additional Info:

Shakeable Calibrated: 05/08/2012
 By: GeoSonics Inc.
 359 Northgate Drive
 Warminster, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

Velocity Waveform Graph Scale
 Time Scale: 0.100 s
 Seismic Scale: +/- 0.124 mm/s
 Sound Scale: +/- 0.0763 PSI



Velocity Waveform
 SN: 8940 Event 1



GeoSonics Inc. Seismic Analysis Velocity Waveform Analysis

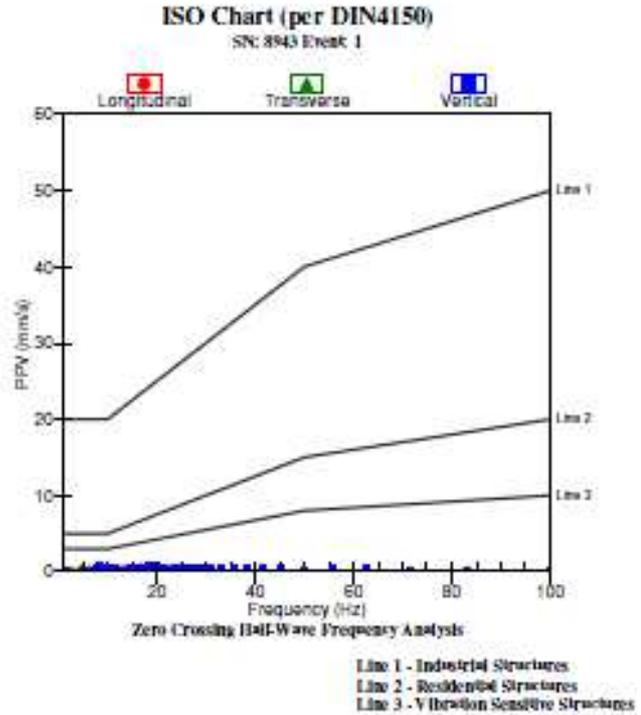
Serial No: 8943v471
 Date: 10/18/2012 05:01:55
 Event No: 1
 Record Time: 5.0 s
 Client:
 Operation: POÇO PRACA MAIDA
 Location: PRÉDIO 10
 Distance:
 Operator: RICARDO
 Comment:
 Seismic Trigger: 0.51 mm/s
 Sound Trigger: 116 db

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	0.57	0.52	0.70
FREQ (Hz)	16.7	20.8	18.5
PD (0.1mm)	0.43	0.28	0.70
PPA (g)	0.017	0.013	0.026
Peak Vector Sum:	0.89 mm/s		
Peak Air Pressure:	135 db		
	0.0171 PSI @ 31.3 Hz		

Additional Info:

Shakeable Calibrated: 05/09/2012
 By: GeoSonics Inc.
 350 Northgate Drive
 Warminster, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

Velocity Waveform Graph Scale
 Time Scale: 0.100 s
 Seismic Scale: +/- 1.25 mm/s
 Sound Scale: +/- 0.0181 PSI



Velocity Waveform SN: 8943 Event: 1

