

**IGOR LINO SIQUEIRA
LUIZ AUGUSTO OLIVEIRA ROSA**

**ESTUDO DE CASO DO MÉTODO CONSTRUTIVO DO
TÚNEL 01, NO LOTE 01 DA FERROVIA NORTE-SUL (FNS)
NA CIDADE DE ANÁPOLIS-GO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: MESTRA ISA LORENA SILVA BARBOSA

ANÁPOLIS / GO: 2015

IGOR LINO SIQUEIRA
LUIZ AUGUSTO OLIVEIRA ROSA

**ESTUDO DE CASO DO MÉTODO CONSTRUTIVO DO
TÚNEL 01, NO LOTE 01 DA FERROVIA NORTE-SUL (FNS)
DA CIDADE DE ANÁPOLIS-GO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:

ISA LORENA SILVA BARBOSA, Mestra (UniEvangélica)
(ORIENTADOR)

ADRIANO CARVALHO DE SOUZA, Mestre (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

CÉSAR AUGUSTO PAIVA GONÇALVES, Mestre (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 23 de NOVEMBRO de 2015.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por renovar a nossa fé.

Aos meus pais, familiares e amigos.

Aos colegas das turmas pelas quais passamos, pela amizade.

Aos professores, pela paciência, incentivo e profissionalismo.

Aos funcionários da CONCREMAT Engenharia e Tecnologia S/A. e VALEC Engenharia Construções e Ferrovias S/A. pelo auxílio e disponibilização dos dados para realização do trabalho e a todos que contribuíram nesse início de caminhada.

Igor Lino Siqueira

Luiz Augusto Oliveira Rosa

Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é mais preciso dominar a força, mas a razão. É preciso antes de mais nada, querer.

(Amyr Klink)

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso elucida as etapas construtivas de uma obra geotécnica subterrânea (túnel), construída pela construtora Queiroz Galvão na cidade de Anápolis – Goiás, entre o período de 2003 à 2009. A obra está integrante da Ferrovia Norte Sul, situada no Lote 01, gerenciada pela Valec Engenharia Construções e Ferrovias S/A. O projeto de pesquisa teve como intuito fazer parte do acervo bibliográfico, sobre obras geotécnicas subterrâneas de escavações, baseadas no método NATM, possibilitando a utilização deste material pelo corpo docente e discente da área de Engenharia Civil da UniEvangélica. O escopo do trabalho constitui-se inicialmente em uma revisão bibliográfica sobre o método NATM, abordando em sequência os estudos preliminares realizados para implementação da obra em Anápolis. Finalizando o projeto com a apresentação de todas as etapas construtivas acompanhadas pelos elaboradores desta pesquisa.

Palavras-chave: Túnel Ferrovia Norte-Sul, NATM e Escavação de Túneis

ABSTRACT

This course conclusion work elucidates the construction stages of an underground geotechnical work (tunnel), built by the construction company Queiroz Galvão in the city of Anápolis - Goiás, between the period 2003 to 2009. The work is an integral of the North South, located in lot 01, managed by Valec Engineering Construction and Railroads S / A. The research project was intended to be part of the collection of books on underground geotechnical works of excavations, based on NATM method, allowing the use of this material by faculty and students of Civil Engineering area UniEvangélica. The scope of work is up initially on a literature review on the NATM method, analyzing in sequence the preliminary studies for the project implementation in Anápolis. Finishing the project with the presentation of all construction stages accompanied by manufacturers of this research.

Keywords: Tunnel North-South Railway, NATM and Dig tunnels

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emboque norte do túnel 01 no lote 01 da FNS	17
Figura 2 - Emboque sul do túnel 01 no lote 01 da FNS	17
Figura 3 - Escoramento com estacas pranchas.....	22
Figura 4 - Escavação com o “Shield”	23
Figura 5 - Carga sobre o revestimento	24
Figura 6 - Exemplo de parcialização de seção	26
Figura 7 - Análise de pressões atuantes no revestimento	27
Figura 8 - Esquema Construtivo do NATM	30
Figura 9 - Cambota Aço-Metálica	32
Figura 10 - Enfilagem	32
Figura 11 - Tratamento de Enfilagem com Bulbo contínuo.....	33
Figura 12 - Tratamento de seção para agulhamento	34
Figura 13 - Concreto Projetado Via Seca.....	37
Figura 14 - Sondagem	45
Figura 15 - Topógrafo e Estação Total	48
Figura 16 - Local do Emboque Norte	48
Figura 17 - Local do Emboque Sul	49
Figura 18 - Piezômetro	50
Figura 19 - Instrumentação, leitura de convergência.....	51
Figura 20 - Drenagem superficial emboque Norte	52
Figura 21 - Taludes emboque sul	52
Figura 22 - Grampeamento de Telas	52
Figura 23 – Concreto projetado	53
Figura 24 - Enfilagem (Viga Portal) Emboque Sul	53
Figura 25 - Armação da Viga Portal Emboque Norte.....	54
Figura 26 - DHP`s (Drenos Horizontais Profundos)	54
Figura 27 - Instalação de explosivos	55
Figura 28 - Preparando Explosivos	55
Figura 29 - Preparação para Detonação	56
Figura 30 - Projeção de Concreto	56
Figura 31 - Armação da Cambota Treliçada	57
Figura 32 - Topografia Acompanhando Armação de Cambotas	57

Figura 33 - Detalhe da Tela	58
Figura 34 - Projeção de Concreto para Acabamento	58
Figura 35 - Equipe Mobilizada para Assistir o Encontro das Frentes de Escavação.....	59
Figura 36 - Início das Escavações do Arco Invertido	59
Figura 37 - Início das Escavações do Arco Invertido	60
Figura 38 - Andamento das Escavações do Arco Invertido	60
Figura 39 - Execução do Sistema de Drenagem	61
Figura 40 - Sistema de Drenagem Completo	61
Figura 41 - Sistema de Drenagem Completo e Espalhamento de Lastro	62
Figura 42 - Lastro Distribuído em Todo Túnel	62
Figura 43 - Dormentes e Trilhos Instalados	63
Figura 44 - Superestrutura Concluída	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre Enfilagem Injetadas Tradicional e Enfilagens de Bulbo Contínuo	34
Quadro 2 - Quadro Comparativo (Via Seca x Via Úmida)	38
Quadro 3 - Tipos de Cimentos x Resistência x Fissura “Blaine”	40
Quadro 4 - Equipe de Execução do NATM	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FNS – Ferrovia Norte-Sul

NATM – New Austrian Tunnelling Method

EF – 151 – Estrada Ferroviária N° 151

VCA – Vala de Céu Aberto

TBM – Túnel Boring Machine

CP – Cimento Portland

SO – Sulfato

CL – Cloreto

BST – Bore Hole Shear Test

DHP – Dreno Horizontal Profundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	14
2 ÁREA DE ESTUDO.....	16
2.1 ÁREA DE ESTUDO, TÚNEL 01 DO LOTE 01 DA FERROVIA NORTE-SUL - BAIRRO JARDIM CALIXTO ANÁPOLIS – GO	16
2.2 DADOS DA OBRA	17
2.3 INTERFERÊNCIAS SOCIAIS OCORRIDAS PELAS ESCAVAÇÕES	18
3 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS EM SOLOS.....	20
3.1 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS EM SOLOS GENERALIDADES	20
3.2 VALA A CÉU ABERTO (MÉTODO DESTRUTIVO)	20
3.3 TBM (TUNNEL BORING MACHINES).....	22
3.4 NATM (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD)	23
3.4.1 Conceito	24
3.4.2 Execução do NATM.....	28
3.4.3 Sistema de suporte	30
3.4.4 Instrumentação	40
3.4.5 Equipe de trabalho	41
3.5 MANUTENÇÕES DE TÚNEIS PELA METODOLOGIA NATM	42
4 ETAPAS CONSTRUTIVAS E SUAS METODOLOGIAS.....	44
4.1 SISTEMÁTICA DA PRIMEIRA ETAPA	44
4.2 SISTEMÁTICA DA SEGUNDA ETAPA	45
4.3 ANÁLISE DAS ETAPAS ANTERIORES E PREPARAÇÃO PARA INICIAR OS TRABALHOS DE CAMPO.....	46
4.4 TRABALHO EM CAMPO	47
4.4.1 Locação dos emboques e construção da estrada de serviço.....	47
4.4.2 Instalação da instrumentação.....	49
4.4.3 Limpeza e início das escavações	51
4.4.4 Armação da viga portal.....	53
4.4.5 Escavações em andamento	54
4.4.6 Escavações em andamento processo do arco invertido.....	59
4.4.7 Drenagem no interior do túnel	60

4.4.8 Superestrutura ferroviária	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A Ferrovia Norte-Sul (FNS), projetada com o intuito de promover uma integração nacional, interligando as regiões brasileiras, além de minimizar os custos de transporte. A sua construção foi iniciada na década de 1980, a partir da sua ligação com a Estrada de Ferro Carajás (EFC). A sua extensão total, após todas as modificações e adições no decorrer do tempo, será de 4733 km, em bitola larga.

Na construção do trecho de ferrovia que passa por Anápolis/GO, encontrou-se a necessidade da execução de um túnel. Este passaria sob um bairro da cidade em questão. Em vista da necessidade, iniciou-se a fase de estudos e projetos.

O objetivo básico dos túneis, conceito geral, é permitir uma passagem direta através de certos obstáculos, sendo eles também considerados como elementos de transporte, tanto ferroviário, rodoviário, como de fluidos.

O túnel, objeto de estudo deste Projeto de Conclusão de Curso, teve seus estudos iniciais e o desenvolvimento do projeto básico, efetuados durante o ano de 2003, respectivamente através das empresas GEONGE CONSULTORIA E ASSESSORIA EM GEOLOGIA DE ENGENHARIA e A. H. TEIXEIRA CONSULTORIA E PROJETOS S/C LTDA, ambas contratadas e gerenciadas pela CONCREMAT ENGENHARIA, responsável pelo projeto deste trecho da ferrovia Norte Sul.

Nesta fase do projeto, houve segmentação das atividades desenvolvidas e das atribuições dentro das respectivas competências de cada empresa. A primeira ficou responsável pelos estudos e detalhamentos das condições dos maciços dos túneis, com a análise e interpretação dos resultados das investigações geológico-geotécnicas de campo; elaboração e apresentação do mais provável perfil geológico-geotécnicas e da compartimentação geomecânica dos maciços.

Neste estudo foram destacadas as condicionantes geológico-geotécnicas e geomecânicas ligadas à previsibilidade do comportamento dos maciços a serem escavados. Nestas previsibilidades dos maciços, os aspectos associados às suas condições executivas também foram avaliados com as indicações dos tratamentos, sistemas auxiliares de estabilização e demais soluções técnicas mais adequadas e recomendadas, em função das classes geomecânicas dos maciços, estabelecidas pelos sistemas classificatórios adotados, conforme prática usual. Estas soluções foram obtidas através da interpretação dos resultados das investigações e do perfil geológico-geotécnico dos referidos túneis.

Estes estudos foram parcialmente integrados e complementados, com a elaboração do projeto básico de engenharia dos túneis, desenvolvido pela segunda empresa, acima mencionada, através das premissas, metodologias de cálculos e dimensionamento do revestimento, obtidos a partir do provável perfil geológico-geotécnico, da compartimentação geomecânica do maciço e dos resultados das sondagens executadas e de informações obtidas junto à Valec.

Para execução de túneis, existem vários métodos de escavação. Dentre eles, foi escolhido um método moderno e bastante usado em todo o mundo, chamado NATM (New Austrian Tunnelling Method). Termo em inglês que apareceu primeiramente em uma série de três artigos escritos pelo professor Rabcewicz publicados na revista “Water Power” entre 1964 e 1965 (BALAGUER, 2014).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Proporcionar a elaboração de um acervo técnico, de um material didático ilustrativo, sobre as técnicas construtivas de obras subterrâneas (Túneis), para subsidiar os estudos geotécnicos nas disciplinas ministradas nos Cursos da Área de Engenharia Civil.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos deste Trabalho de Conclusão de Curso são apresentar as principais características do método NATM (New Austrian Tunnelling Method), foi utilizado na construção do túnel I, no Lote I da FNS (Ferrovia Norte-Sul) e apresentar as principais intervenções técnicas.

1.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia deste trabalho consiste em pesquisa bibliográfica e coleta de dados, a fim de esclarecer sobre o método executivo e esboçar as interferências técnicas.

Para a apresentação do método executivo e das interferências, foram utilizados dados de relatórios de consultorias e levantamento em campo concluído pela empresa supervisora. Também como metodologia de pesquisa, utiliza-se de:

- Revisão sobre o método de execução do NATM;
- Revisão do Manual de Gerência de Escavações Subterrâneas da CBPO Engenharia LTDA;
- Revisão dos Relatórios de Campo da empresa CONCREMAT;
- Revisão dos Estudos Preliminares executados pela empresa GEOENG;
- Descrição do projeto realizado com as informações obtidas durante a execução da obra, através do trabalho de fiscalização dos alunos envolvidos neste projeto;
- Apresentação de fotos obtidas através do trabalho de fiscalização dos alunos envolvidos neste projeto.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 ÁREA DE ESTUDO, TÚNEL 01 DO LOTE 01 DA FERROVIA NORTE-SUL - BAIRO JARDIM CALIXTO ANÁPOLIS – GO

O túnel em consideração teve seus estudos iniciais e o desenvolvimento do projeto básico, efetuados durante o ano de 2003. Após a conclusão do processo licitatório para construção da obra, a empresa Queiroz Galvão S/A, vencedora do referido processo, antes de iniciar sua execução contratou a empresa Maffei Engenharia para desenvolver os estudos necessários visando o detalhamento do projeto executivo.

Deve ser devidamente ressaltado o fato de que, na adequação do projeto para a fase executiva, houve revisão de alguns parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço através de estudo conjunto, entre a empresa do projeto executivo (Maffei Engenharia) com participação da empresa, anteriormente incumbida do projeto básico (A.H. Teixeira), tornando-se assim, solidária com o novo projeto, através de uma “certificação técnica”, conforme documento consultado na obra e fornecido pela Queiroz Galvão. Com base na análise do projeto executivo, de caráter mais conservativo em relação aos parâmetros do maciço e na maior utilização dos dispositivos auxiliares de estabilização adotados, restritiva ou discordante, que sinalizasse para eventual necessidade de alteração ou modificações do projeto concebido para fase executiva.

Com aceitação do projeto executivo, pela Superintendência de Projeto da Valec, a obra dos túneis foi iniciada com escavação dos emboques, a partir de 17/09/2008, dentro dos critérios e diretrizes contidas no referido projeto, segundo informações obtidas no campo.

Assim, considerando as particularidades associadas à execução de obras subterrâneas com as características do atual projeto, em face de agravantes que atuam nas condições de contorno dos dois túneis ficou decidido uma maior necessidade de desenvolver mecanismos rigorosos de controle das escavações e de prevenção contra possíveis situações de risco. Tal condição deveria ser alcançada através do monitoramento da instrumentação geotécnica e de efetiva implantação de um acompanhamento técnico da obra, com a contratação de empresa qualificada, com atribuição de atuar sistematicamente, com base em critérios técnicos, nas tomadas de decisão, perante situações distintas do projeto, convalidando e ou indicando adequações.

As figuras 1 e 2, ilustram os emboques Norte e Sul, do Túnel I.

Figura 1 – Emboque norte do túnel 01 no lote 01 da FNS



Fonte: acervo do autor

Figura 2 – Emboque sul do túnel 01 no lote 01 da FNS



Fonte: acervo do autor

2.2 DADOS DA OBRA

Esta é uma obra de concessão da VALEC, portanto os recursos utilizados foram em sua totalidade oriundos da união mais precisamente seu centro de custo é o Ministério dos

Transportes, que para esta obra utilizou verba do PAC (Programa de Aceleração do Crescimento).

Através de uma licitação pública foi definido qual empresa executaria a obra e através de medições mensais todos os serviços realizados foram pagos.

Ao todo foram gastos até maio de 2010 quando foi finalmente concluída a obra, até a parte das galerias no interior do túnel, pronto para receber a Superestrutura, R\$31.667.944,82 (Trinta e Um Milhões Seiscentos e Sessenta e Sete Mil Novecentos e Quarenta e Quatro Reais e Oitenta e Dois Centavos), sem contabilizar a parte da superestrutura ferroviária que foi desenvolvida no interior do túnel.

2.3 INTERFERÊNCIAS SOCIAIS OCORRIDAS PELAS ESCAVAÇÕES

A distância das edificações acima do túnel até a sua geratriz superior é consideravelmente curta, o que favorece a transmissão dos impactos produzidos no interior do maciço para à superfície que contém várias edificações com estruturas muito frágeis, algumas até mesmo de adobe.

Esta problemática levou a ocorrência de várias avarias nas construções acima do eixo do túnel e região, tais como trincas e rachaduras de paredes, abatimentos de pisos, deslizamento de telhas e etc.

Dentre as edificações danificadas compreende-se um hospital de combate a hanseníase, um centro espírita e um posto de saúde, o que eleva ainda mais os impactos sociais na região.

Alguns consultórios do posto de saúde foram desativados temporariamente até que de forma paliativa a VALEC melhorou a situação dos mesmos para que pudessem voltar a atender. O hospital também parou por um determinado tempo de trabalhar utilizando 100% do prédio, haja vista que as avarias comprometiam algumas instalações do hospital, analogamente o centro espírita que possui uma “casa da sopa” também começou a operar com menor capacidade de espaço físico.

Todas as edificações que sofreram avarias tiveram uma intervenção por parte da VALEC, por intermédio da empreiteira Queiroz Galvão, que gastou mais de R\$400.000,00 (quatrocentos mil reais) a fim de reformá-las e solucionar os defeitos causados pelas detonações e escavações do Túnel, o que não foi suficiente. Foi então providenciada uma tomada de preço no valor de R\$808.761,00 (oitocentos e oito mil setecentos e sessenta e um reais) (Tomada de Preço 01/2011 Reforma de edificações localizadas na região do túnel I, do lote I da FNS) para reformá-las e já foram desenvolvidas as reformas, a empreiteira atuou primeiramente nos casos

de urgência, os que estavam na iminência de desabamento, e a partir destas foram para as casas mais próximas.

Com a drenagem do maciço durante a escavação houve também um rebaixamento do lençol freático na região. É válido lembrar que a população da região não tem um poder aquisitivo alto, muito ao contrário disso, a maioria das famílias são de baixa renda, o que acarreta no uso de cisternas para abastecimento de água nas residências e não o uso do serviço tarifado de fornecimento de água pela SANEAGO.

No eixo do túnel todas as cisternas e fossas tiveram de ser entupidas e os respectivos donos indenizados, devido à proximidade que o túnel passa das edificações o que levaria a encontrar clareiras na hora da escavação.

Quando do rebaixamento do lençol as cisternas da região ficaram sem água, fato esse que foi atribuído à responsabilidade à VALEC, que indenizou vários poços e ainda entupiu-os com concreto. Algumas residências não tinham ramal de água da SANEAGO, o que também foi colocado sob responsabilidade da VALEC, que teve de fazer as respectivas ligações destes ramais até o cavalete das citadas residências e ainda teve que sanar vários débitos dos moradores para que pudesse novamente reativar o fornecimento de água pela SANEAGO, esses débitos com a SANEAGO chegaram a atingir mais de R\$7.000,00 (sete mil reais).

Toda a situação descrita acima, acarretou em um desconforto geral na região, gerando uma indisposição dos proprietários de imóveis para com a VALEC, fato este que influenciou diretamente na abertura de vários processos contra a mesma. Alguns, por oportunismo, não aceitaram a reforma proposta e entraram na justiça solicitando que a VALEC demolisse as respectivas residências e levantasse no local uma edificação nova, o que foi deferido em 1 (um) caso e indeferido nos demais. Foi solicitado à empresa que fizesse um projeto de reforma para que o Ministério Público aprovasse e diante disto estaria autorizado o início das reformas nas residências cujos proprietários fizeram a solicitação.

3 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS EM SOLOS

3.1 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS EM SOLOS GENERALIDADES

De acordo com Vieira (2003), os túneis têm sua origem há milhares de anos, permitindo a construção de vias de comunicação mais rápida, além de servirem como elementos de transporte e escoamento de águas, vias de condução de minas dentre outros.

Os túneis são construções subterrâneas que constituem artificialmente como uma passagem através de um maciço, sendo considerado como uma solução de engenharia inteligente, no sentido de viabilizar interligações e acessos. (ZIRLIS; SOUZA, 2011).

Assim, os túneis são indicados para áreas mais ocupadas de forma a reduzir os impactos e interrupções de vias de tráfegos e transporte melhorando as condições de vida humana nos centros urbanos.

Com a evolução e importância destas escavações e obras surgiram propostas de métodos executivos sendo que atualmente existem mundialmente três metodologias construtivas e de escavação. O primeiro é chamado de Trincheiras ou VCA (Vala de Céu Aberto), também conhecido como método invertido (Cover-And-Cut). O segundo refere-se aos “Shields” ou TBMs (Túnel Boring Machine), sendo este realizado de forma mecanizada. O terceiro, objeto deste estudo, denominado de NATM (“New Austrian Tunneling Method”), trata-se de um método de escavação sequencial. (VIEIRA, 2003).

Para se optar na escolha de um método de escavação deve-se levar em consideração a avaliação de diversas condicionantes, dentre eles: a viabilidade técnica de escavação, as interferências existentes na superfície, os impactos ambientais que a técnica poderá proporcionar, os custos e a segurança relativa aos riscos de acidentes com possíveis desmoronamentos (SIMONETTI, 2010).

Faz-se necessário destacar neste trabalho, que cada método traz consigo suas vantagens e desvantagens para cada projeto a ser estruturado na construção de túneis, e que os mesmos são escolhidos após análise e considerações citadas anteriormente.

3.2 VALA A CÉU ABERTO (MÉTODO DESTRUTIVO)

O método vala de céu aberto (VCA), é tido como o método mais antigo de escavação de túneis, utilizado em condições geotécnicas e geológicas variadas. Consiste no uso de

ferramentas como: pás, picaretas, ou através de máquinas do tipo escavadeira. Na maioria dos casos é feito com escoramento de valas.

O método de VCA, de acordo com Dantas (2009), é um método considerado destrutivo, uma vez que o mesmo causa grandes impactos ambientais e interferências negativas durante a execução. Contudo em obras de custo baixo torna-se praticamente inviável a utilização do método em razão das consequências socioeconômicas e ambientais.

Para Cerello (1998 *apud* Vieira, 2003), o método denominado de Céu Aberto tem como características básicas a forma do túnel com seção típica retangular, contendo uma ou mais seções transversais retangular, destinadas cada qual para o escoamento de uma via; a localização da sua base situada a uma profundidade geralmente até 10 m, em alguns casos esporádicos podendo chegar a 20 m abaixo da superfície; o que traz como consequência a execução de um reaterro de 4 m a 14 m de altura. Outra informação relevante é de que os métodos de construção a Céu Aberto caracterizam-se principalmente pelo tipo de escoramento utilizado.

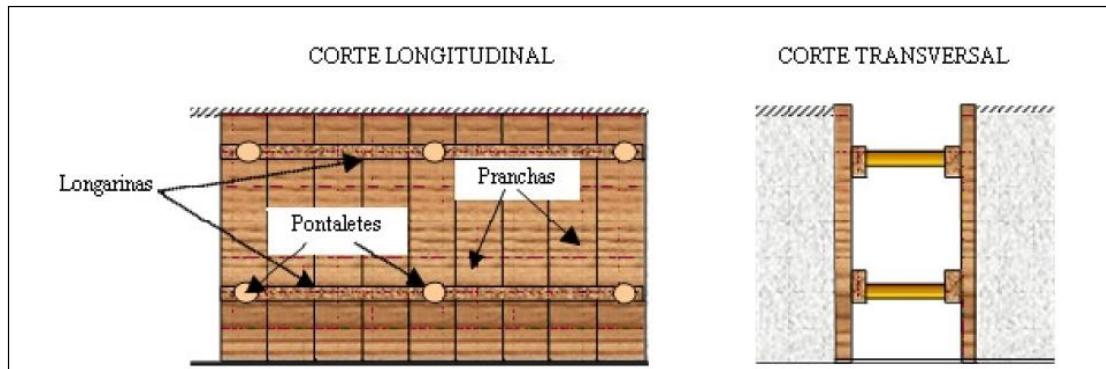
Quanto as classificações e os procedimentos que envolvem o método da Vala de Céu aberto temos:

- abertura de valas de grandes dimensões;
- paredes laterais de contenção escoradas ou em talude;
- rebaixamento de lençol freático existente à profundidade necessária;
- construção das estruturas definitivas como paredes, lajes e pilares;
- e, finalmente, o aterro.

Sendo assim, de acordo com Dantas (2009, p. 04), o escoramento, conforme figura 3 consiste em:

...contenção lateral das paredes de solo, através de pranchas metálicas ou de madeira, fincadas perpendicularmente ao solo e travadas entre si com o uso de pontaletes e longarinas, também metálicos ou de madeira. É realizado quando da constatação da possibilidade de alteração da estabilidade de estruturas adjacentes à área de escavação ou com o objetivo de evitar o desmoronamento por ocorrência de solos inconsistentes, pela ação do próprio peso do solo e das cargas eventuais ao longo da área escavada em valas de maiores profundidades.

Figura 3 - Escoramento com estacas pranchas



Fonte: Vieira (2003)

A vala de Céu Aberto, também conhecida como “CUT and Cover”, traz como características também limitações de profundidade com escavações em pequenos trechos, rápida colocação de escoramentos de madeiras, blocos e pedras; podendo ainda apresentar grandes deformações, causando impactos nas áreas adjacentes.

3.3 TBM (TUNNEL BORING MACHINES)

De acordo com Medeiros (2008), Shields ou TBM (Tunnel Boring Machines), foram criados na Inglaterra, em 1825. O primeiro foi feito de uma couraça metálica, para ser utilizado na escavação de um túnel sob o Rio Tamisa.

Este método de escavação é caracterizado pelo uso de máquina Tuneladora ou Mecanizada de cabeça giratória, movida por motores elétricos; contudo com pouca flexibilidade na execução, devido às limitações do raio de curvatura do maciço. O *Tunnel Boring Machines*, são auto-perfuratrizes de grande diâmetro, máquinas caras e muito específicas, de acordo com figura 4 que demonstra um *shield*.

Figura 4 – Escavação com *Shield*



Fonte: Metro em foco (2013)

Segundo Vieira (2003), sobre os *shields*, pode-se afirmar que, é uma carcaça de aço, com a função de proteção para o tubo e facilitador do corte do terreno.

Para Moraes Junior (1999), os *shields*, são de grande eficiência diante de maciços compostos de solos tais como, areias saturadas, solos moles, aluviões, no entanto, apresentando alto custo de escavação, o que se inviabiliza a sua adoção em obras cuja extensão de escavação seja inferior a 2 km.

O *shield* apresenta como características básicas, a realização do escoramento utilizando-se uma couraça metálica, parte integrante do equipamento de perfuração; perfuração realizada de forma mecanizada por meio de fresas ou manual; revestimento pré-fabricado; altíssimo rendimento; custo elevado e falta de flexibilidade nas operações de escavação.

3.4 NATM (NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD)

O NATM é considerado como sendo um novo método de escavação que teve sua origem na década de 30, metodologia esta proposta pelo professor Rabcewicz a serem aplicadas inicialmente na escavação de minas subterrânea de carvão, sendo empregado pela primeira vez em 1950 na construção do túnel Lodano-Mosagno, processo este conhecido como New Austrian Tunneling Method-NATM, oficializado em 1957. Novo Método Construtivo de Aberturas de Túneis (NATM), chamado assim para distinguir de um antigo método construtivo

também de origem austríaca. Profissionais da área consideram o método como sendo filosofia outros como uma arte de escavação. (FOÁ; ASSIS, 2002).

Segundo Medeiros (2008), o método traz como uma de suas principais vantagens a adaptabilidade no momento da escavação da seção do túnel, podendo a escavação ser modificada em qualquer ponto, de acordo com as necessidades geométricas e de parcialização do processo de escavação. O maciço torna-se o principal elemento estrutural. A escavação é sequencial e utiliza concreto projetado como suporte associado a outros elementos tais como cambotas metálicas, chumbadores e fibras no concreto, adotados em função das características do maciço.

Neste método a adoção de um monitoramento eficaz e interrupto com utilização de instrumentação geotécnica é considerada como operação indispensável para se garantir a segurança das operações de escavação evitando-se acidentes provocados por desmoronamento de maciços.

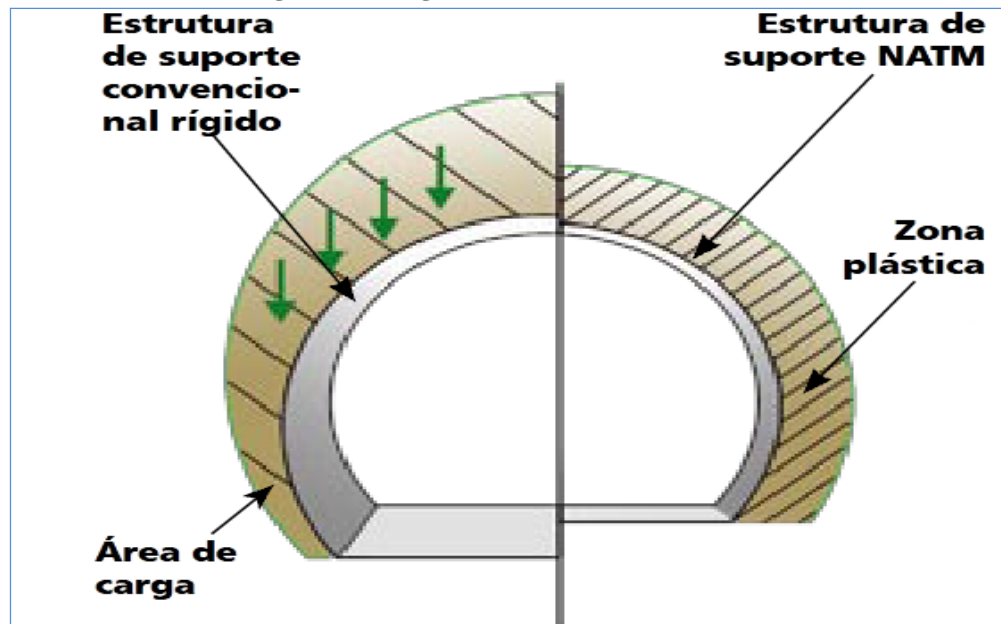
3.4.1 Conceito

Para um resultado eficaz na escavação de túneis a partir do método NATM, tem-se a necessidade da aplicação de alguns fundamentos e conceitos. De acordo com Campanhã (1995), existe um total de 22 considerados relevantes, nos serviços de escavação, porém entre estes, destacam-se 15 itens cujo conhecimento tornam-se obrigatórios no seu conhecimento e aplicação. São eles:

A) Conceito 01- O maciço circundante participa do suporte.

É o momento onde se alcança a estabilização mediante o alívio das tensões, de deformações pequenas e controladas. Isso se deve a mobilização das tensões de resistência do maciço que circunda o túnel, conforme figura 5.

Figura 5 - Carga sobre revestimento



Fonte: Manual Técnico Solotrat

B) Conceito 02 – Manutenção da qualidade do maciço circundante.

A qualidade do maciço circundante deve ser mantida com a aplicação imediata do revestimento, ou seja, mesmo antes que se inicie o processo de deteriorização do maciço, deve-se aplicar o suporte (concreto projetado com cambotas, telas, tirantes de acordo com a necessidade), de forma a conservar toda estrutura do maciço.

C) Conceito 03 – Afrouxamento no interior do maciço é prejudicial.

Deve-se evitar a acomodação do maciço, onde o mesmo perde sua capacidade de auto-suporte. Referido estado de acomodação se dá pela demora na colocação de escoramentos, devido ao não preenchimento dos vazios, ou das deformações excessivas de um determinado suporte.

D) Conceito 04 – Mobilização da capacidade portante do maciço

Evitando a capacidade de auto suporte do maciço, tem-se a mobilização de uma “capa de proteção”, que passa a se tornar um elemento de escoramento.

E) Conceito 05- Caracterização geológica – geotécnica minuciosa do maciço

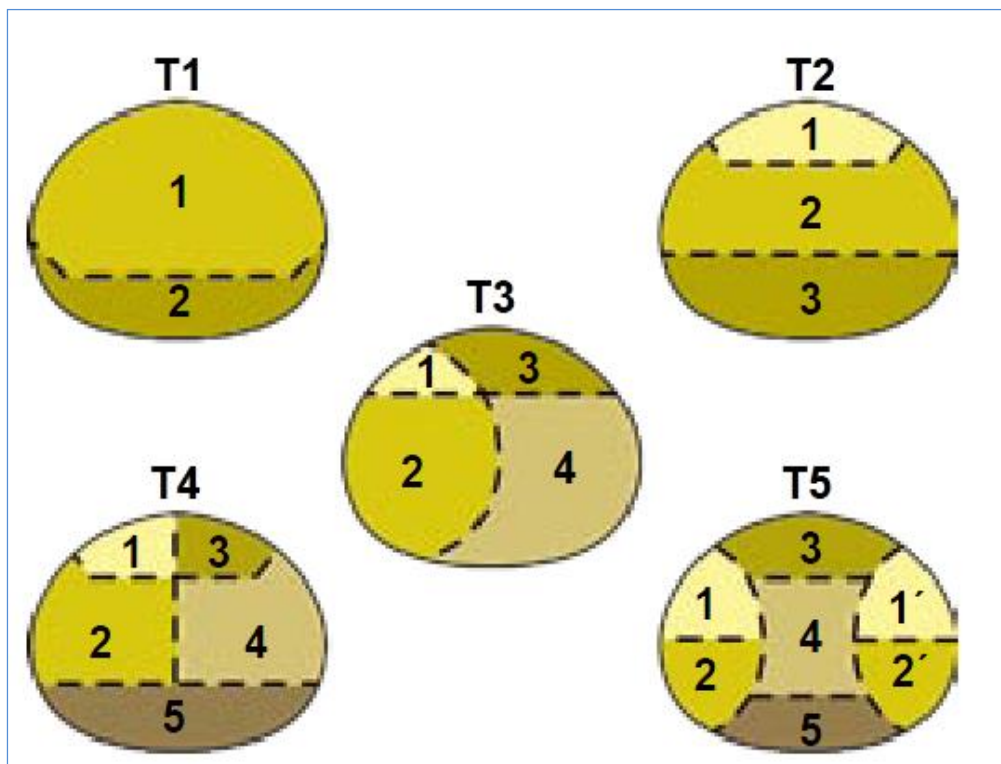
Para se conhecer o método construtivo, o dimensionamento do suporte e do revestimento definitivo, tem-se a necessidade de análises, estudos e investigações, a partir de ensaios “in situ” e de laboratório que fornecerá informações como: resistência, deformabilidade e permeabilidade, que dará condições para a formulação dos posicionamentos finais, e para as próximas etapas.

F) Conceito 06 – Adequação da parcialização frente às condições geotécnicas do maciço

Para uma parcialização do maciço deve-se levar em consideração o tempo de auto sustentação, sendo assim quanto maior o número de etapas maior o tempo de auto suporte que a abertura sem escoramentos terá.

Além do comportamento do maciço, outro fator da parcialização são os equipamentos disponíveis, tempo de execução da obra e os custos. Contudo, a decisão a ser tomada deve ser direcionada naquilo que dê condições para uma maior velocidade na execução. Exemplo de parcialização de seção, conforme figura 6.

Figura 6 - Exemplo de parcialização de seção



Fonte: Fonte: Manual Técnico Solotrat

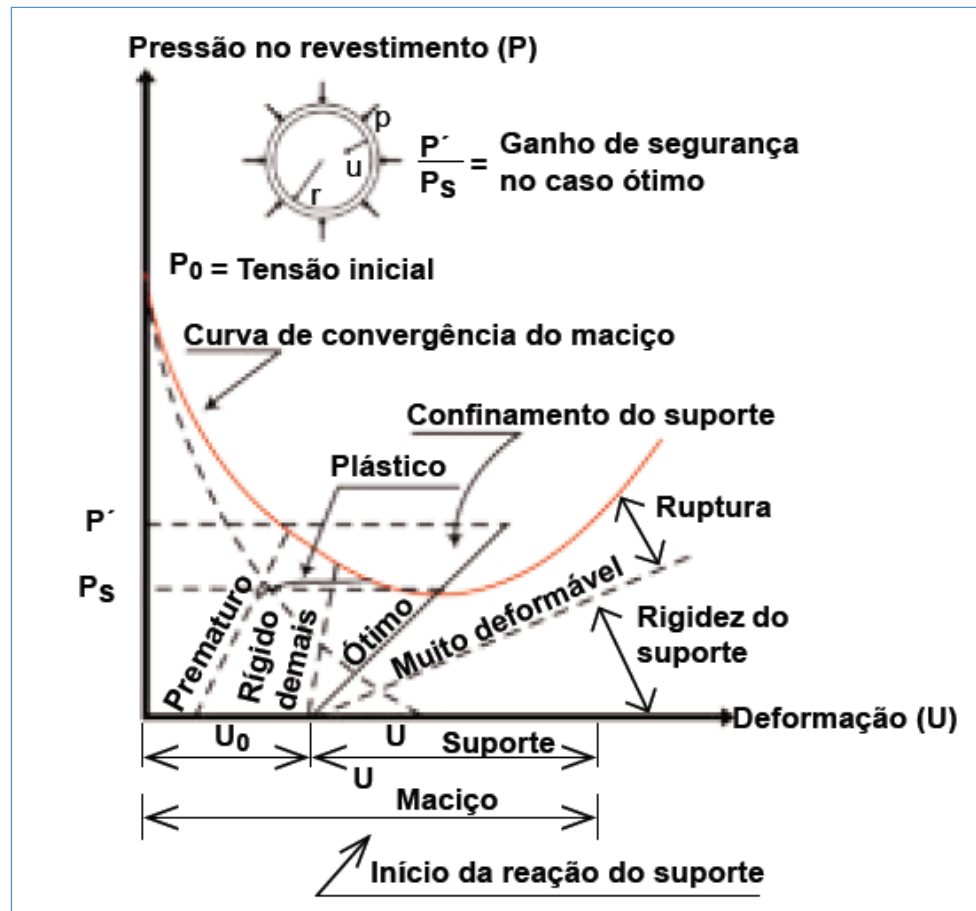
G) Conceito 07 – Utilização do suporte adequado no momento certo.

Este conceito consolida-se, como sendo aquele que visa melhor habilidade e conhecimento da equipe executora no momento da aplicação no NATM, onde se deve avaliar a melhor situação para aplicar os elementos de suporte do túnel.

A aplicação deve ser executada em estado ótimo, ou seja, nem muito cedo, ou tarde, quando há pouca deformação, tal fator poderá comprometer sua capacidade real de resistência.

Fatores tais como: deformidade do maciço, tamanho da abertura da escavação, espessura do suporte, métodos de escavação dentre outros, passam a ditar o comportamento da interação do maciço com a estrutura e são pontos inevitáveis de observação para aplicação do suporte no momento adequado, ou seja, diante do limite tolerado por terceiros. Sendo assim conforme, figura 7, pode-se visualizar alguns fatores condicionantes para aplicação do suporte.

Figura 7 - Análise de variação de pressões atuantes no revestimento



Fonte: Manual Técnico Solotrat

H) Conceito 08 – Eliminação de vazios na interface do Maciço – Suporte

Com o uso do concreto projetado houve a melhora na interação do suporte com o terreno, ou seja, houve a diminuição dos vazios, onde o concreto possibilita agir por toda superfície do maciço. Situação a qual não ocorre com o uso do escoramento de madeira, que acaba ocasionando a não resistência através do auto suporte.

I) Conceito 09 – Utilização de ancoragens, cambotas e telas.

Afim, de produzir a limitação das deformações em níveis inferiores, sobretudo para melhorar as condições de sustentação, tem-se a utilização de enfilagem, tirante e cambota junto ao concreto projetado.

J) Conceito 10 – Fechamento do arco invertido.

O suporte do túnel exerce a função de um anel contínuo que deve ser finalizado em tempo hábil. Porém, diante de análises e cálculos quando se é previsto um avanço da abóbada do túnel, no sentido de otimização é construído um arco invertido, ou seja, é colocado um fechamento provisório do anel, para estabilização das áreas do maciço, no período de escavação da outras

áreas. Assim, quando se tem a conclusão das escavações, este piso é retirado, havendo, portanto a demolição do arco tido como provisório, para a execução do arco definitivo.

K) Conceito 11 – Redução da seção escavada ao mínimo necessário.

No NATM, não há sobre-escavação, uma vez que o volume de solo retirado é o estritamente necessário para aplicação do concreto projetado. Com condições para formação de uma capa protetora mais próxima da abertura, evitando assim a perda da área útil e alteração do maciço.

L) Conceito 12 – Preferências por seções arredondadas.

No sentido de se evitar rupturas na construção de túneis, evita-se geometrias/seções transversais com cantos vivos, impedindo assim a escolha por locais com concentração de tensões, que causam rupturas.

M) Conceito 13 – Acompanhamento da execução por meio de leituras intensivas da instrumentação de campo.

Para uma caracterização geológica-geotécnica do maciço, permitindo assim o conhecimento de resistências, das deformações e permeabilidade do solo, tem-se o acompanhamento da obra por meio de instrumentos que permitam condições para as realização dessas análises.

N) Conceito 14 – Estabilização das deformações do conjunto do maciço-suporte.

A estabilização do maciço-suporte, ocorre após o fechamento do arco invertido, ocorrendo o fim das deformações, sendo atribuído a este revestimento definitivo a estabilidade e indeformabilidade à longo prazo.

O) Conceito 15 – Minimização das pressões neutras por meio de drenagem.

No momento em que há as instalações de drenos, as pressões neutras atuantes sobre o maciço são reduzidas, proporcionando aumento na segurança da obra.

Na maioria dos casos de insucesso de execução do NATM, constatou-se que um ou mais conceitos não foram aplicados.

3.4.2 Execução do NATM

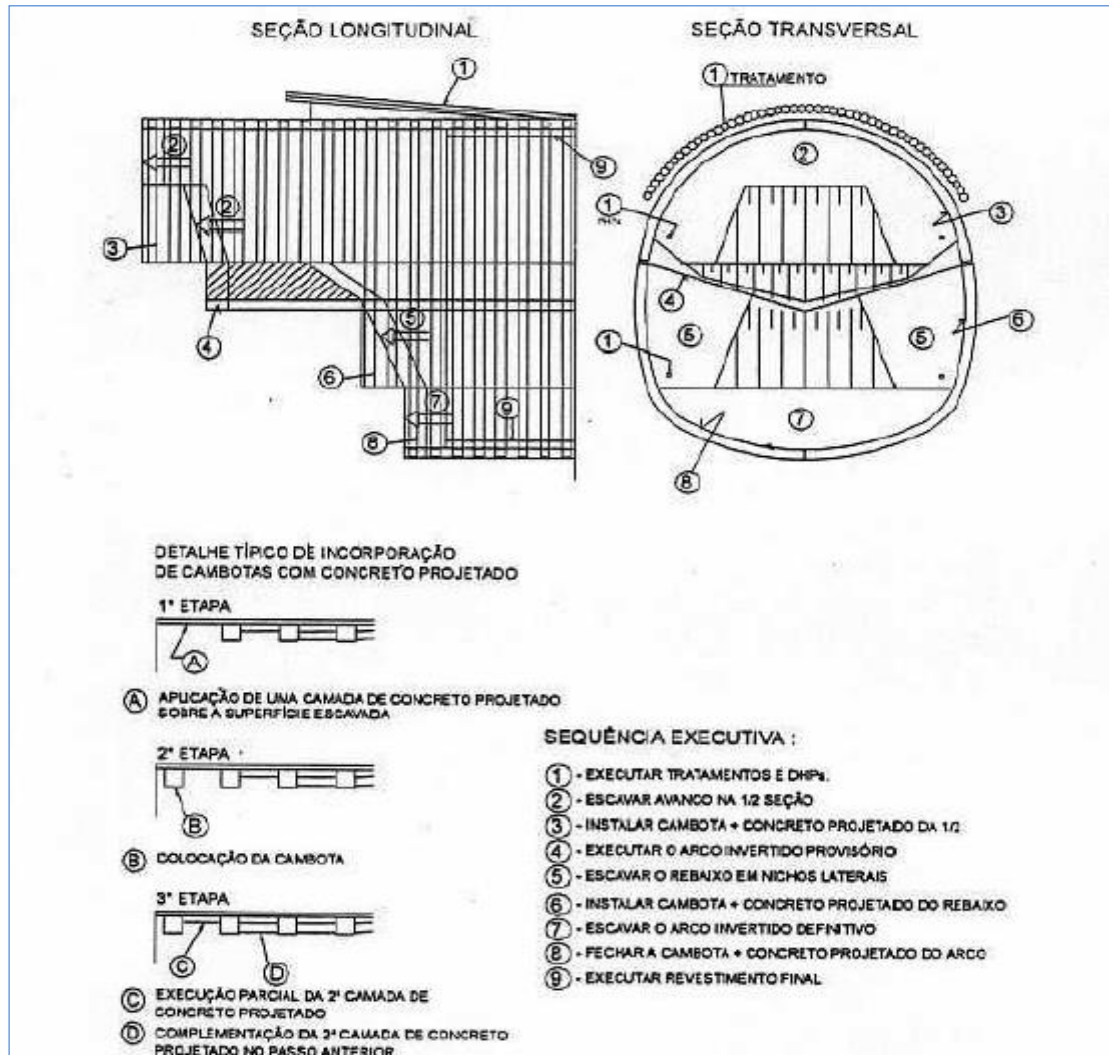
Segundo Junior (1999), o NATM é um método de escavação empregado em solos ou rochas que conduz a um a estabilização pelo alívio controlado de pressão. O alívio de tensão é efetuado intencionalmente; os valores das deformações e tensões são rigorosamente medidos e controlados de acordo com as necessidades.

Conforme Campanhã (1995), para se garantir um bom processo de estabilização do maciço, poderá ocorrer a necessidade de se realizar o rebaixamento do lençol freático,

enfilagens, congelamento, aplicação de Jet-Grouting e agulhamento, técnicas estas associadas ao sistema de escoramento com o uso de concreto projetado.

Sendo assim, o método baseia-se na auto sustentação do material circundante, conforme figura 8 abaixo, que ilustra a sequência construtiva típica de um túnel pela metodologia NATM.

Figura 8 – Esquema Construtivo do NATM



Fonte: Vieira (apud, Maffei, 1995, p.25)

No entanto, para execução dos túneis pelo NATM, de acordo com Junior (1999), o maciço passa a ser visto como um valioso elemento em sua estrutura. Trabalhando em conjunto com a parte estrutural de suporte para alcançar a estabilidade da cavidade, sendo que conforme necessidade tem-se a utilização de um sistema de um suporte otimizado. Contudo no sentido de aperfeiçoamento e correção, deve-se promover a instrumentação do túnel.

3.4.3 Sistema de suporte

No momento em que se alcança a estabilização pelo alívio das tensões induzidas pela escavação, tem-se a resistência composta pelo maciço que circunda o túnel, contudo com a acomodação excessiva do solo o maciço vai perdendo a capacidade de auto suporte. Porém, de acordo com Moraes Junior (1999), a partir do momento em que o maciço não mais desempenhe essa função de sustentação de forma a controlar as deformações que comprometam as construções já realizadas, tem-se aí a necessidade de um sistema de suporte estrutural.

Sendo assim, os sistemas de suporte devem ser instalados, quando o maciço não mais conseguir absorver todas as tensões, diante dos deslocamentos que são admissíveis. Segundo Moraes Junior (1999), tem-se, no entanto a necessidade de verificação do tempo de sustentação do maciço (“*Stand-Up Time*”), determinando o momento exato para aplicação do suporte, definido com auxílio das informações obtidas nos estudos geológicos-geotécnicas.

Conforme Amaral Filho (1995 *apud* Vieira, 2003, p. 30), “os elementos de suporte são o concreto projetado, tela, cambota e enfilagem. O suporte é uma estrutura provisória, que mantém a abertura estável, ao menos durante a execução do revestimento”.

Contudo, o sistema de suporte deve ser escolhido conforme condições e estado do maciço, obedecendo o “*Stand-Up Time*”, evitando assim gastos desnecessários, ou até mesmo a perda de todo trabalho já executado.

3.4.3.1 Utilização de enfilagens, tirantes e cambotas

Para melhoria de sustentação na execução do maciço são adicionados elementos estruturais tais como cambota treliçadas ou treliças metálicas, ancoragem no maciço do tipo tirante ou enfilagens e chumbadores.

A. CAMBOTAS

De acordo com Maffei (*Apud* VIEIRA 2003), as cambotas são utilizadas como sistema de suporte em túneis, quando o tempo de auto sustentação é muito reduzido. As cambotas são definidas como elementos metálicos soldados ou aparafusados, apresentam geralmente formas de um arco acompanhando do túnel onde apoiam-se no piso para que não ocorram deformações no maciço.

Segundo Barzan (2009) quando em maciços rochosos, as cambotas podem ser apoiada diretamente no piso do túnel. Já a utilização de cambotas em maciços de solo, os pés devem ser

apoiadas em sapatas de concreto para que ocorra distribuição dos esforços a capacidade de carga, figura 9.

Figura 9 – Cambota Aço-metálica



Fonte: site www.constram.com.br

B- ENFILAGENS

São um sistema de suporte utilizados a partir da frente do túnel para escavação do trecho seguinte, sendo aplicadas em solos de baixa resistência. As enfilagens, conforme figura 10, são instaladas de acordo com sua necessidade para reforço de maciço de solo, acima da abobada dos túneis. Podem ser constituída por perfis metálicos de aço cravado ou por perfis de tubo de aço introduzido no solo através de perfurações e submetidas à injeção de calda de cimento. (KOCHEN; NETO, 2000).

Figura 10 - Enfilagem



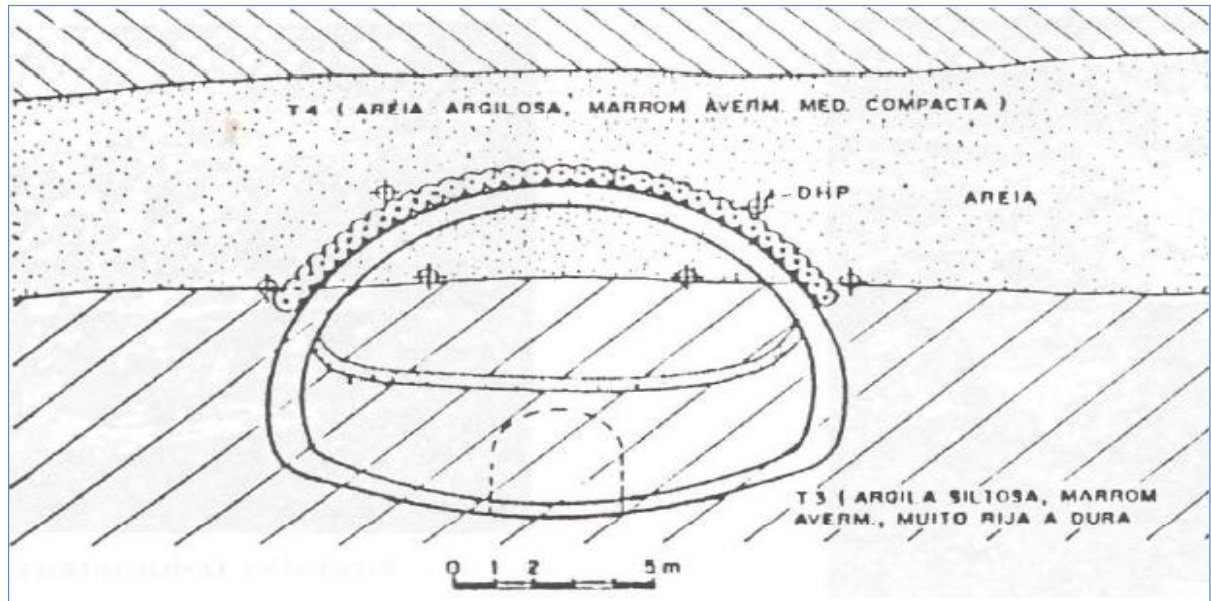
Fonte: infraestruturaurbana.pini.com.br

As enfilagens cravadas são aplicadas em túneis de até 3m de diâmetro, são constituídas por barras de aço ou com chapas de aço, e introduzidas com auxílio de marteletes pneumáticos podendo ser cravado lado a lado com comprimentos de 2 a 3 m para solo de baixa resistência.

As enfilagens injetadas podem ser tubulares ou de bulbo contínuo. A aplicação é feita através de perfurações no maciço em túneis com diâmetros maiores, alcançando de 10 a 20 m de perfuração. A enfilagem tubular se dá após a cravação de tubos metálicos introduzidos na perfuração, onde é realizada a injeção com calda de cimento. Há limitações pelo fato de não se misturar com o solo, tornando-se parte integrante da enfilagem, diminuindo a aderência com o maciço circundante.

Já no bulbo contínuo, conforme figura 11, proporciona uma aderência ideal entre o solo circunvizinho e o tubo de aço da armadura, resultando em uma bainha muito mais expandida do que o furo, o que faz reduzir o tempo de execução e operações. A calda do cimento é injetada, de dentro para fora, logo após ser completada a injeção e introduzida a barra ou tubo de aço.

Figura 11 – Tratamento de Enfilagem com Bulbo contínuo



Fonte: Souza (2003, *apud* NOVATECNA, 1996)

Ainda em relação ao bulbo contínuo, no quadro 1, tem um comparativo entre enfilagens injetadas tradicionais e bulbo contínuo.

Quadro 1 – Comparação entre Enfilagem Injetadas Tradicional e Enfilagens de Bulbo Contínuo

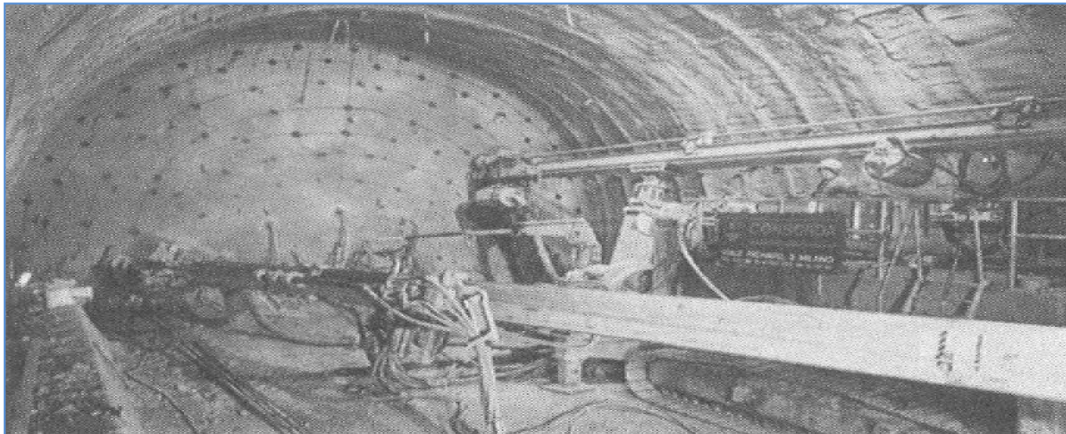
ITEM	ENFILAGEM TRADICIONAL INJETADA	ENFILAGEM DE BULBO CONTÍNUO
PERFURAÇÃO	Igual (sem revestimento) ~0,3h – 3h (c/ revestimento)	Igual ~0,3h
COLOCAÇÃO DO TUBO DE AÇO	Igual ou até maior (em geral tubo suspiro difícil) ~0,2h	Igual ~0,2h
SELO	Execução e Tempo de Cura ~1,0h	Não há (tarugo de madeira é colocado logo após o tubo) ~0,1h
INJEÇÃO DE BAINHA	Execução e Tempo de Cura (*) ~12,5h	Injeção do solo por desagregação, através do jato de calda de cimento
INJEÇÃO POR VÁLVULA MANCHETE	Execução da injeção por manchete com uso de obturador duplo (em cada fase) ~1,8h/fase	~0,4 a 0,6h Não há.
DIÂMETRO DA ENFILAGEM ACABADA	Diâmetro do furo (~10cm) com clacagem (eventual)	Bainha expandida com diâmetro de 20 a 40cm
TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO DE UMA ENFILAGEM	Superior a 14 horas	1,0 a 1,25h

Fonte: Souza (2003, *apud* NOVATECNA, 1996)

Outro tipo particular é o agulhamento, com tubos de PVC rígidos que são injetadas com caldas de cimento introduzidas de forma horizontal na frente das escavações formando assim um reforço.

Assim para Souza (2003), sob o tratamento das seções escavadas com agulhamento, conforme figura 11 tem-se que o mesmo, “... é utilizado diretamente na seção de escavação, onde são cravados vergalhões de aço, fibra de vidro ou fazem-se colunas horizontais de *Jet Grouting* (Enfilagens). Para evitar rupturas à frente do solo na escavação.”

Figura 12 – Tratamento de seção por agulhamento



Fonte: SOUZA 2003 apud LURDINARI 1995)

Ainda de acordo com Souza (2003), quanto ao Jet Grouting, se pode afirmar que:

...é a tecnologia que permite criar corpos cilíndricos ou lamelares de solo-cimento “in-situ”, de grandes dimensões em relação a perfuração, dotados de alta resistência e impermeável, e nos níveis estritamente necessários. Essa tecnologia foi introduzida no Brasil em 1980, pela Novatecna.

C. TIRANTES

De acordo com Campanhã, (1995), os tirantes geralmente são associados com telas metálicas e concreto projetado, o qual acaba por desempenhar um papel junto as cambotas metálicas que faz com que haja a estabilização ao maciço circundante do túnel.

Atualmente no mercado estão em uso os seguintes tipos de tirantes:

- Tirante ancorado mecanicamente tensionado e injetado com argamassa;
- Tirante ancorado com resina, tensionado e injetado;
- Tirante de haste argamassada, onde a argamassa é colocada em duas meias-canas perfurada;
- Tirante *Swellex*, da Atlas Copco, não tensionado, expandido por meio de água e alta pressão;

-Tirante fendilhado, não tensionado, da Simmons-Rand.

D. CONCRETO PROJETADO

O concreto projetado é um sistema de suporte empregado ao método NATM, no momento em que o maciço ganha a capacidade de auto suporte, assim sendo escolhido, o concreto, passa a agir como revestimento de forma a manter a qualidade, melhorando a interação com o maciço.

Segundo Junior (1999), tem-se como conceito, de concreto projeto, como sendo:

O nome genérico para a mistura formada por cimento, areia, agregado fino e água, que é aplicada pneumáticamente, e compactada dinamicamente a grandes velocidades. Pode-se citar que a principal aplicação do concreto projetado é em estruturas contínuas, como estas: Túneis, Revestimentos de taludes, Recuperação de estrutura e Novas construções.

O concreto projetado funciona como uma estrutura de revestimento que manterá a estabilidade da abertura do túnel, no decorrer de toda vida útil da obra, atendendo assim os parâmetros de durabilidade, necessários de segurança. Revestimento que traz consigo economia de custos e de prazos.

Outro conceito com relação ao concreto projetado foi definido como sendo a técnica onde o material é jateado para o alvo de projeção, auto compactando-se em camadas, Figueiredo (2011). O autor relata ainda que o concreto projetado pode compor tanto o revestimento primário quanto o secundário, diretamente em contato com o maciço, desempenhando o papel de impermeabilização da estrutura, onde o mesmo seria o primeiro elemento a ter contato com os agentes deletérios que atuarão futuramente na estrutura.

Durante a projeção do concreto é recomendado que ocorra a mínima reflexão possível para o não desperdício de material, visto o custo elevado da técnica. Outro ponto a ser destacado quanto à aplicação do concreto é a possível falta de aderência com o maciço no momento das operações de lançamento, assunto este abordado na literatura de Vieira (2003). Segundo o autor para se evitar esta situação é recomendado que as superfícies do maciço deverão passar por processo de preparação, o que inclui possíveis ações de limpeza, aplicações de ancoragem, a não presença de umidade excessiva e uso de aditivos aceleradores, evitando-se assim o deslocamento.

Vieira (2003) enfatiza ainda a importância da manutenção da qualidade do concreto projetado, visando manter sua qualidade bem como suas características estruturais e durabilidade. Segundo o mesmo são recomendadas ações tais como:

- No lançamento o concreto deverá ter coesão suficiente para aderir a camada subjacente;
- Durante todo o processo de projeção manter a reflexão apresentada no lançamento adequando às propriedades tecnológicas requeridas;
- A reflexão deve ser mínima possível; a retratação imediata por secagem deve ser suficientemente pequena de forma a não prejudicar a impermeabilidade;
- O concreto deverá apresentar resistência mecânica elevada precocemente, consistência e compacidade adequada para fins de não prejudicar a impermeabilização; precoces altas; Deve apresentar resistência futura suficiente; deverá ter uma boa compacidade, e possuir relação água-cimento inferior a 0,45 e teor de aditivo acelerador em torno de 2,5%.

E. TIPOS DE PROJEÇÃO

De acordo com Vieira (2003), a aplicação do concreto projetado é realizada mediante três processos: via úmida, via seca e via semiúmida.

A. Projeção – Via úmida

Segundo Junior (1999), o concreto aplicado por via úmida já vem preparado para ser aplicado sendo homogeneizado na própria obra através do uso de betoneira, recebendo adição do aditivo durante o lançamento através de um bico injetor posicionado junto ao mangote de projeção. De acordo com a mistura homogênea adquirida, estima-se a qualidade do produto bem como das operações de projeção.

Segundo Vieira (2003), a projeção úmida apresenta tanto vantagens quanto desvantagens, que seguem:

Vantagens: Menor reflexão; Menor produção de poeira; Menor volume de ar incorporado; melhor qualidade e uniformidade do concreto e maior produtividade.

Desvantagens: Alto custo dos equipamentos e as interrupções podem causar grandes perdas de concreto.

B. Projeção – Via Seca

De acordo com Junior (1999), a projeção via seca, consiste em efetuar uma mistura seca com pouca umidade, de cimento, agregado miúdo, pedrisco, aditivo acelerador e as vezes sílica ativa, mistura está lançada por bombas especiais de duas câmaras que garantem a projeção continua.

Na via seca o concreto passa a ser conduzido na bomba injetora a seco, conforme figura 12. Porém, a água passa a ser adicionada somente no bico de projeção do magote, onde toda mistura do concreto e direcionado pelo ar comprimido, (JUNIOR, 1999).

Figura 13 - Concreto projetado via seca



Fonte: Acervo do autor

C. Projeção – Via Semi – úmida

Trata-se de um caso especial da via seca, de acordo com Junior (1999), “é uma variante do processo via seca, quando a água é injetada alguns metros antes do bico injetor”.

Pode-se realizar uma comparação das projeções, conforme quadro 2.

Quadro 2 – Quadro Comparativo (Via Seca x Via Úmida)

Continua.

	<i>VIA SECA</i>	<i>VIA ÚMIDA</i>
1. Equipamento	Menor investimento total; Manutenção Simples; Fácil operação.	Maior investimento total e menos equipamentos no local de trabalho; Operação manual difícil; Menor desgaste de bicos mangueiras e bombas para mesma produção; Consumo de ar até 60% menor.
2. Mistura	Na obra ou na usina; Uso de misturas pré-dosadas; Desempenho alterado devido a umidade da areia.	Só na usina e apurada; Maior homogeneidade; Abatimento interfere no processo; A umidade da areia não altera o processo.

Quadro 2 – Quadro Comparativo (Via Seca x Via Úmida)

Conclusão.

3. Produção e alcance	Raramente ultrapassa os 5m ³ /h no campo; Pode transportar materiais a maiores distâncias	De 3 a 20 m ³ /h → projeção manual; até 20m ³ /h→ projeção mecanizada robô.
4. Reflexão	15 a 40% →parede vertical; 20 a 50% →teto; Formação de bolsões de material refletido; variação do traço devido a perda de agregado.	Baixa reflexão → menor que 10 %; Sem a formação de bolsões de material refletido; pequena perda de agregado.
5. Propriedades	Alta resistência →baixo fator a/c; Menor homogeneidade; Depende da experiência da mão de obra.	Baixa resistência → alto fator a/c; Maior homogeneidade do material.
6. Velocidade do jato	Maior → melhor adesão e fácil aplicação no teto; Maior →fácil compactação	Adequada para uso em túneis e minas; Material menos compacto.
7. Aditivos	Podem ser dispensados; Em pó posto na betoneira; Líquidos posto no bico de injeção.	Líquidos; Em pó somente no Japão.
8. Poeira e névoa	Grande produção, dificuldade de visualização do trabalho; Em túneis exige ventilação.	Baixa a média (fluxo aerado), Com melhor visualização; Pode produzir névoa de aditivo líquido tóxica exigindo ventilação.

Fonte: Moraes Junior (1999, p.16)

F. MATERIAIS UTILIZADOS

A. Agregados:

Os agregados nada mais são do que as areias e os pedrisco.

De acordo com Silva (1997 *apud* Foá; Assis, 2002, p. 13), o módulo de finura da areia a ser utilizada na produção deste concreto deverá estar compreendido entre 2.35 e 2.75, sendo a dimensão máxima característica do pedrisco não deverá ser maior que 9.5 mm, pois 60% a 70% dos grãos acima desse diâmetro são reduzidos durante a projeção.

60% a 70% dos grãos acima desse diâmetro são reduzidos durante a projeção.

B. Cimento

Para cada tipo de obra necessita-se a utilização de um tipo de cimento específico, a ser definido considerando-se fatores tais como resistência e finura (Blaine), conforme indicações da tabela 03. Isto em função do controle de trincas bem como resistências iniciais e do tipo dos agentes deletérios do concreto.

Segundo Foá; Assis (2002), o cimento utilizado poderá ser do tipo I (Portland Comum), II (Portland Composto), III (Portland de Alto-Forno, IV (Portland Pozolânico), V (Portland de Alta Resistência Inicial).

Ainda de acordo com Foá; Assis (2002, p. 13), quanto a indicação dos mesmos temos que:

Os cimentos ARI e ARI-RS são os que apresentam maiores resistências (até 3 dias) e finais, conforme observado na tabela 03. Os cimentos com superfície especificam blaine superior a 400 m/kg são mais susceptíveis a retração e fissuração, e, por conseguinte exigem maiores cuidados na cura. Caso o concreto for manter contato com terrenos ou águas sulfatadas, deve ser utilizado um cimento resistente a sulfatos.

Quadro 3 – Tipo de cimento x resistência x fissura “Blaine”

CIMENTO	BLAINE (m²/kg)	f_c 10h (MPa)	f_c 24h (MPa)	f_c 3d (MPa)	f_c 7d (MPa)	f_c 28d (MPa)
CPI-S	349	1.0	10.7	24.3	32.2	43.6
CPII-E	373	1.1	7.9	21.0	30.7	42.9
CPII-F	364	1.4	12.5	25.4	30.0	38
CP-V-RS	423	1.9	14.6	28.9	41.2	50.8

Fonte: Foá e Assis (2002, p.13)

C. Aditivos

De acordo com Vieira (2003, p.57), “os aditivos mais empregados em concreto projetados são os de aceleradores de pega para ambos os tipos de concreto e os superplastificantes para via úmida mantendo-se a dosagem recomendada pelo fabricante.”

D. Adições

A sílica ativa utilizada deverá atender os parâmetros da ASTM C -1240-93, com índice de SiO₂; Perda ao fogo; Umidade; porcentagem retido na peneira de malha 325 e além disto não deverá ser densificada, mantendo-se a coesão do concreto, condição está atingida com a adição de um percentual em torno de 12% na composição (VIEIRA, 2003)

E. Água

Para o concreto projetado a água deve possuir um pH compreendido entre 5,8 e 8,0 atendendo os limites máximos que são estabelecidos pela NBR 6118/2003, que são:

- Matéria orgânica (expressa em oxigênio consumido) – 3mg/l;
- Resíduo sólido – 5.00mg/l;
- Sulfato (expressos em ions SO₄) – 300mg/l;
- Cloretos (expressos em ions Cl) – 500mg/l;
- Açúcar – 5mg/l

3.4.4 Instrumentação

A instrumentação é usada para caracterizar o estado geológico – geotécnico do maciço e fazer as leituras de campo para determinar os parâmetros de resistência, deformação e permeabilidade do maciço. Existem dois tipos de instrumentação, a externa instalada antes do início da escavação e a interna, utilizada à medida que a escavação avança.

Segundo o Manual Técnico Solotrat (2007) são instalados as seguintes instrumentações externas:

- Marcos de superfície para controle de recalques.
- Tassômetro para controle recalques logo acima da calota do túnel.
- Piezômetros para controle da pressão hidráulica no maciço.
- Medidores de nível d'água para controle do lençol freático.
- Pinos para controle de recalques das fundações por meio de levantamento topográfico.

- Inclinômetros para determinar movimentos laterais e frontais do maciço.

Observação de fissuras, monitorar progresso de efeitos nos pontos fracos.

Indica, Campanhã (1995) a instrumentação interna necessária, sendo:

- Distômetros para controle de medidas de convergência, indicando as deformações da superfície escavada, medidas estas que consiste na leitura de distância entre pinos instalados no revestimento do túnel, esta leitura é feita por uma fita de aço acoplada a um distômetro.

- Manômetro para controle de medidas de pressão hidrostáticas no maciço.

- Defletômetro de corrente, utilizado para monitorar os deslocamentos do maciço além da face em escavação.

- Dilatômetro, usado para determinação do módulo de deformação de solo ou da rocha em furos de 100mm, constituído basicamente em uma luva de borracha que exerce uma pressão nas paredes do furo.

- BST- (*Bore Hole Shear Test*) Ensaio de Cisalhamento em Furo de Sondagem é utilizado para medir o ângulo de atrito e a coesão do solo com rapidez, é um ensaio portátil que pode ser executado com um amostrador *shellby* de paredes finas.

3.4.5 Equipe de trabalho

A equipe de trabalho para execução do NATM, e compreendida por profissionais qualificados, conforme quadro 4 – Equipe de Execução do NATM, que demonstra segundo Vieira (2003), a quantidade de profissionais para realizar cada atividade.

Quadro 4 – Equipe de Execução do NATM

QTD.	FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
01	Engenheiro Civil	Elabora, executa e dirige projetos de Engenharia Civil, estuda características, prepara planos e métodos de trabalho, e demais dados requeridos, para orientar a manutenção e reparo das Obras contratadas, assegurando os padrões técnicos exigidos.
01	Encarregado	Organiza e Supervisiona as atividades dos trabalhadores, coordenando e orientando, a execução das tarefas, assegurando o desempenho das atividades, dentro dos prazos e normas estabelecidas.
01	Feitor	Auxilia no acompanhamento e desenvolvimento de tarefas nas frentes de trabalho sob a orientação do mestre e encarregado
01	Op. Perfuratriz e Enfilagem	Pessoa qualificada para operar a perfuratriz e o processo de enfilagens.
01	Bombista de CP6	Pessoa que controla diretamente da bomba, o fluxo de concreto que é projetado.
01	Mangoteiro	Utiliza-se do mangote para projetar concreto, de acordo com a necessidade da Obra, orientado pelo Encarregado.
04	Ajudantes	Auxiliam nas tarefas a serem desenvolvidas e nos trabalhos que se fizerem necessários, conforme as necessidades da Obra sob orientação do Encarregado.
02	Op. De Martelete	Trabalhador qualificado para operar o martelete pneumático nas escavações mecânicas
01	Op. De Betoneira Estacionária	Trabalhador qualificado para operar o a betoneira estacionária no preparo de concreto seco para a projeção

Fonte: Vieira (2003, p.35)

3.5 MANUTENÇÕES DE TÚNEIS PELA METODOLOGIA NATM

De acordo com o manual da empresa Solotrat (2007), existe a necessidade da manutenção e verificação do concreto projetado, da drenagem de face e da drenagem profunda das obras subterrâneas. Em relação a estas recomendações pode-se destacar:

- A manutenção do concreto se dá mediante as eventuais análises deste material como também com a realização periódica da limpeza das juntas de concretagem. Porém, com o tempo pode vir ocorrer o aparecimento de manchas de umidade que normalmente podem ser ocasionadas pela deficiência de drenagem, problema este amenizado com instalações de um dreno em profundidade ou perfuração na superfície do concreto.

- A Drenagem da Face exige limpeza contínua, para que o fluxo de água não seja interrompido.

- Em relação ao sistema de drenagem profunda, deve-se tomar ações para verificar anualmente as condições de funcionamento dos sistemas bem como realizar operações de desobstrução tais como injetar água pelo êmbolo, e ao mesmo tempo, introduza-o até o final do dreno para que o sistema esteja livre (sem obstruções); ou retirar o êmbolo.

4 ETAPAS CONSTRUTIVAS E SUAS METODOLOGIAS

Este capítulo tem por finalidade, descrever as etapas básicas executivas utilizadas nas escavações do túnel I, do Lote I, da EF-151 – FNS (Estrada Ferroviária – 151 – Ferrovia Norte-Sul), bem como o do método executivo NATM (New Austrian Tunnelling Method), utilizado na execução do túnel supracitado, objeto de estudo deste Trabalho de Conclusão de Curso, cujo foco é relatar as etapas construtivas bem como suas peculiaridades e especificidades.

4.1 SISTEMÁTICA DA PRIMEIRA ETAPA

A primeira etapa de trabalho é constituída pelo conjunto de atividades que compreendem os levantamentos, estudos e pesquisas, de escritório e de campo, momento este onde são agregadas todas as informações disponíveis sobre a natureza geológico-geotécnica da região e do local onde será implantado o eixo do túnel.

Esta fase inicia-se pelos levantamentos e interpretações cartográficas, passa pelo mapeamento geológico e estrutural de campo, inspeções a cortes, afloramento rochoso, pedreiras e jazidas localizadas nas proximidades. A etapa inclui também, pesquisa sobre a existência ou não de poços de abastecimento de água e dos níveis e comportamento do lençol freático, definição da tipologia seu quantitativo e profundidade, locação dos pontos de investigações e quadro de ensaios geológico-geotécnicos realizados, sejam eles de campo ou de laboratório, finalizando com a avaliação e tratamento de todos os dados e informações obtidas nesta fase.

Destaca-se que na época deste levantamento os recursos financeiros e materiais disponibilizados para os serviços de sondagem não contemplaram a execução de um programa de prospecção de subsolo mais complexo, que proporciona-se a execução de ensaios especiais de campo ou de laboratório, de forma a caracterizar e avaliar de forma mais criteriosa os parâmetros geológicos e geotécnicos dos materiais bem como estudos hidrogeotécnicas e hidrogeológicas da área de implantação e suas imediações.

A figura 14 a seguir demonstra a execução de um furo de sondagem.

Figura 14 - Sondagem



Fonte: Acervo do autor

4.2 SISTEMÁTICA DA SEGUNDA ETAPA

Após as investigações e estudos preliminares a próxima etapa para implantação desta obra subterrânea compreende os serviços e atividades auxiliares tais como a elaboração das especificações técnicas a serem adotadas durante a execução, definição de critérios executivos das sondagens bem como da amostragem, adaptações e ajuste do programa de investigação.

O desenvolvimento desta etapa passa pela elaboração da classificação geomecânica dos testemunhos de sondagens, interpretação dos resultados dos ensaios e avaliação dos dados confrontando com as recomendações técnicas, bibliográficas e do mapeamento executado.

A etapa é concluída com a elaboração dos projetos, apresentação das seções longitudinais dos túneis, apresentação da litologia local e de seus respectivos graus de alteração e fraturamento, detalhamento da presença ou não de zonas críticas de falha geológicas com potencial para ocasionar deslocamento e movimentação de maciço durante a escavação, previsão de presença de manancial aquífero subterrânea, estado de tensão do maciço e sua compartimentação geomecânica.

A etapa deverá ainda prever o tipo de revestimento a ser adotada, sua extensão, localização de trechos críticos de escavação, visando garantir a sustentação do maciço, indicação de um programa de instrumentação necessária durante todas as etapas construtivas, monitorando o comportamento do maciço e verificando a sua estabilidade.

4.3 ANÁLISE DAS ETAPAS ANTERIORES E PREPARAÇÃO PARA INICIAR OS TRABALHOS DE CAMPO

As próximas etapas relativas ao projeto e execução estão intrinsecamente relacionadas como a etapa preliminar, ou seja, aquela já relatada nos parágrafos anteriores, onde todas as deliberações bem como ações técnicas deverão ser norteadas após análise criteriosa das condições levantadas nos estudos técnicos e levantamento de campo.

Ações pertinentes ao processo de escavação, reforço, técnicas de segurança deverão ser adotadas durante todo o período construtivo, sendo as mesmas fundamentadas nos estudos técnicos, experiências anteriores e nos condicionantes auferidos.

Para melhor esclarecer as ações desenvolvidas nesta etapa exemplificam-se as recomendações adotadas durante a construção da referida obra. São elas:

1 – Sugestões para o Tratamento da interface do maciço.

- ⇒ Calota
- ⇒ Apoio meia seção superior
- ⇒ Reforço do rebaixo
- ⇒ Estabilização das frentes

➤ Recomendações:

- ⇒ Enfilagem tubular injetada;
- ⇒ Câmara cônica com enfilagens tubulares injetadas sistemáticas ou “JGH”, junto à frente;
- ⇒ Rebaixamento do NA com utilização de drenos Horizontais profundos (DHP’s);
- ⇒ Reforço do terreno de fundação das cambotas, com estacas raiz ou enfilagens tubulares verticais/inclinadas;
- ⇒ Eventual pré-consolidação do núcleo (agulhamento).

2 - Sugestão para locação dos taludes dos emboques.

➤ Recomendações:

- ⇒ Taludamento mais íngreme, com auxílio de drenagens e elementos de contenção,

- ⇒ Estabilização com uso de “soil nail”, (Solo Grampeado, chumbadores e nata de concreto)
- ⇒ Fechamento dos poços de abastecimento de água, na região dos emboques.

3 - Elementos de estabilização do revestimento associados aos métodos executivos:

- ⇒ Arco invertido provisório contínuo.
- ⇒ Parcialização da seção de avanço.
- ⇒ Cambotas treliçadas.
- ⇒ Utilização de concreto projetado reforçado com fibras metálicas.
- ⇒ Fogachos e eventualmente fogos com técnica de desmonte cuidadoso. (Explosões controladas com desmonte de rocha)

4 - Sistemas prospectivos junto às frentes:

- ⇒ Sondagens táticas e estratégicas de prospecção junto às frentes de escavação.
- ⇒ Medidas de vazões e pressões nos drenos.
- ⇒ Monitoramento do comportamento das frentes com instrumentação adequada.

4.4 TRABALHO EM CAMPO

De posse dos laudos, das recomendações e das coordenadas de localização dos emboques, iniciam-se as etapas construtivas propriamente ditas. São elas respectivamente:

4.4.1 Locação dos emboques e construção da estrada de serviço

A equipe de topografia instala inicialmente os marcos de referência para possibilitar o controle de cotas, fator este indispensável durante todo o processo construtivo.

A figura 15 a seguir ilustra o topógrafo locando os marcos.

Figura - 15 - Topógrafo e Estação total



Fonte: sstopografia.com.br

As figuras 16 e 17 ilustram os locais dos emboques Norte e Sul respectivamente.

Figura 16 - Local do Emboque Norte



Fonte: Acervo do autor

Figura 17 - Local do Emboque Sul



Fonte: Acervo do autor

4.4.2 Instalação da instrumentação

A instalação da instrumentação constitui como uma ação necessária em todas as etapas da construção do túnel sendo considerada uma atividade rotineira e indispensável. Mediante as informações registradas nos equipamentos de instrumentação é possível avaliar o comportamento do maciço e sua interação com a estrutura implantada.

Os resultados obtidos durante um programa de instrumentação têm a finalidade de verificar o comportamento do maciço e das estruturas de suporte e contenção, possibilitando avaliar se o comportamento real está de acordo com as hipóteses assumidas no cálculo e ainda antecipar ações de intervenção e recuperação em caso de comportamento anômalo do maciço.

Assim, apenas recalques ou deslocamentos verticais não são suficientes, seja do ponto de vista qualitativo, seja do ponto de vista quantitativo para cumprir a finalidade da instrumentação desejada, fato este que explicita a análise de outros parâmetros.

Outra vertente a ser avaliada no comportamento dos solos e rochas no local da estrutura do túnel é a movimentação dos taludes. A quantificação dos movimentos de rotação e translação da massa de solo e rocha poderá ser avaliada através de instrumentos denominados de inclinômetros e/ou através da equipe de topografia

Outro fator a ser avaliado é com relação à medida de placa de recalque fator responsável pelo deslocamento do maciço denominado de encaixe, caracterizando o estado plástico do solo. Esta avaliação pode ser observada através da instrumentação denominada de Tassômetro.

Já os instrumentos denominados de piezômetros são empregados para verificar os gradientes hidráulicos bem como a poro pressão, verificando se estes correspondem às indicações e limites preconizados no projeto, garantindo desta forma a segurança em relação à estabilidade dos taludes.

A figura 18 a seguir ilustra um piezômetro.

Figura 18 - Piezômetro



Fonte: www.vieiracosta.com.br

A instrumentação fornece dados indispensáveis para um constante aprimoramento do projeto; os seus resultados são, por vezes, os únicos indicadores das correlações existentes entre o comportamento do maciço, o método construtivo, o suporte utilizado e os tratamentos utilizados e a consolidação do terreno.

Outra informação relevante é com relação às manifestações observadas dentro do maciço quando do avanço da escavação. Medidas através de sistema de nivelamento apontando convergência da cavidade, embarrigamento e destacamento de seções são indicativos de problemas estruturais de estabilidade e perigo de desabamento, constituindo a instrumentação elemento identificador e auxiliador para tomada de medidas de intervenção e segurança.

Outro ponto a ser instrumentado é a superfície do terreno, onde através de controle topográfico são interpretadas as medidas de recalques feitos em marcos superficiais instalados, e em pinos de recalque instalados nas edificações existentes junto à área de influência do túnel.

Com isso, detectasse a evolução dos deslocamentos do maciço à frente da face de escavação e dos deslocamentos após a passagem da frente.

Destaca-se que o comportamento do maciço é avaliado através dos deslocamentos antes, durante e depois da chegada da frente de escavação na seção instrumentada, além do controle do rebaixamento do lençol freático através do piezômetro.

A figura 19 abaixo ilustra a leitura de convergência realizada durante o processo de escavação.

Figura 19 - Instrumentação, leitura de convergência



Fonte: Acervo do autor

4.4.3 Limpeza e início das escavações

Em relação a esta operação denominada de limpeza da área a ser escavada bem como das estradas de serviço, por onde máquinas, caminhões e funcionários transitarão durante o andamento dos trabalhos, faz-se necessário destacar que a escavação e o transporte são iniciados através de métodos convencionais fazendo uso de escavadeiras hidráulicas e Caminhões basculantes, seguindo os padrões exigidos no projeto.

Para proteger as escavações inicia-se o mais rápido possível a execução das drenagens superficiais, com a finalidade de evitar que águas precipitadas ou direcionadas do escoamento urbano desçam pelas escavações dos emboques. É conveniente lembrar que neste caso peculiar o início das escavações ocorreu nas duas frentes de serviço, sendo realizado nos dois emboques simultaneamente.

No emboque Norte os estudos definiram que somente o recobrimento vegetal seria o suficiente para proteção dos taludes, devido às características do solo. Em contrapartida no

emboque Sul, foi necessário a implantação de estruturas de contenção, tais como telas atirantadas, concreto projetado, usualmente chamado de cortina atirantada.

As figuras 20;21;22 e 23 ilustram esta operação descritas neste item.

Figura 20 - Drenagem superficial no emboque norte



Fonte: acervo do autor

Figura 21 - Taludes do emboque Sul



Fonte: acervo do autor

Figura 22 - Grampeando telas no emboque sul aplicação



Fonte: acervo do autor

Figura 23 - Concreto projetado



Fonte: acervo do autor

4.4.4 Armação da viga portal

Ao chegar com as escavações no plano de trabalho, a equipe técnica é incumbida da montagem da viga portal, que é por onde iniciará a escavação do maciço subterraneamente.

Após a sua montagem, as vigas portais são concretadas e as cortinas atirantadas no emboque sul são montadas e concluídas. Durante a sua construção, a equipe técnica inicia a implantação dos DHP`s (Drenos Horizontais Profundos) nos taludes. As águas oriundas destes dispositivos de drenagens deverão ter um destino apropriado para não prejudicar o andamento e a segurança da obra.

As figuras 24, 25 e 26 Ilustram as enfilagens para armação da viga portal, assim como a armação da viga propriamente dita e também o funcionamento dos DHP`s.

Figura 24 - Enfilagem (Viga Portal) emboque Sul



Fonte: acervo do autor

Figura 25 - Armação da viga portal emboque norte



Fonte: acervo do autor

Figura 26 - DHP's (Drenos Horizontais Profundos) em funcionamento



Fonte: acervo do autor

4.4.5 Escavações em andamento

Nesta etapa construtiva, através da viga portal, são iniciadas as escavações. Este método é chamado de solo grampeado, caracterizado pela implantação de uma série de enfilagens no solo tanto horizontal quanto diagonalmente, com intuito de se garantir a estabilidade do maciço.

A escavação é feita em meia secção formando a calota, porém deixando no centro uma porção sem escavar, com finalidade de combater os esforços exercidos pelo maciço.

No emboque sul as operações de escavação foram realizadas inicialmente em rocha, trazendo como consequência a utilização da técnica de desmonte através do uso de explosivos.

As detonações eram feitas com o maior comprometimento profissional das equipes além de utilizar técnicas que evitasse causar lançamento de fragmentos a longa distância, evitando desta forma acidentes. A carga explosiva era devidamente calculada para o quantitativo a ser retirado, e todas as precauções relativas à segurança do trabalho adotadas na ocasião.

A seguir as figuras 27, 28 e 29 ilustram a instalação dos explosivos.

Figura 27 – Instalação de explosivos



Fonte: acervo do autor

Figura 28 – Preparando explosivos



Fonte: acervo do autor

Figura 29 – Preparação para Detonação



Fonte: acervo do autor

A medida que o processo de escavação avançava após o lançamento posterior do concreto projetado sobre a seção do túnel, preparando com antecedência a superfície escavada para receber uma cambota treliçada a cada 80 cm de perfuração.

As figuras 30 e 31 a seguir demonstram a projeção de concreto e armação da cambota, respectivamente:

Figura 30 - Projeção de Concreto



Fonte: acervo do autor

Figura 31 - Armação da Cambota Treliçada



Fonte: acervo do autor

Após ser armada (cambotas) com rigoroso acompanhamento topográfico, a mesma recebe aplicação de uma armação metálica em forma de tela e uma camada de concreto projetado, dando acabamento da estrutura final da seção.

As três figuras a seguir ilustram o tema tratado neste parágrafo:

Figura 32 - Topografia Acompanhando Armação de cambota



Fonte: acervo do autor

Figura 33 – Detalhe da tela



Fonte: acervo do autor

Figura 34 - Projeção de concreto para acabamento



Fonte: acervo do autor

Destaca-se que todas as operações relatadas, desde a enfilagem até aplicação do concreto projetado e acabamento são fiscalizadas por profissionais de engenharia civil e de segurança do trabalho, tornando-se as mesmas rotineiras em sucessivos ciclos de escavação, proteção, montagem da estrutura e acabamento.

A figura abaixo ilustra o momento que as duas frentes de escavações se encontram:

Figura 35 - Equipe mobilizada para assistir o encontro das frentes de escavação



Fonte: acervo do autor

4.4.6 Escavações em andamento processo do arco invertido

Quando as escavações das duas frentes se encontram e a meia secção está acabada, inicia-se a escavação do Arco Invertido para instalação das cambotas invertidas.

Alguns especialistas em construção de túneis recomendam que o procedimento de construção do arco invertido deva ocorrer da extremidade para o interior do túnel, facilitando a evacuação do local caso ocorra alguma eventualidade.

No caso deste objeto de estudo, foi realizado a escavação do Arco Invertido do interior para as extremidades, devido decisão da equipe técnica e administrativa da empresa construtora.

De forma mais sucinta o processo de construção do arco invertido é idêntico ao processo construtivo do arco superior. O mesmo consiste na destruição do anel provisório de proteção e a reconstrução da cambota invertida.

As figuras 36, 37 e 38 ilustram o processo construtivo do arco invertido.

Figura 36 - Início das escavação do Arco Invertido



Fonte: acervo do autor

Figura 37 - Início das escavação do Arco Invertido



Fonte: acervo do autor

Figura 38 - Andamento das Escavações do Arco Invertido



Fonte: acervo do autor

4.4.7 Drenagem no interior do túnel

É de conhecimento para todos os profissionais da engenharia civil a problemática ocasionada pela presença da água e da ascensão capilar nas estruturas civis. Neste caso em específico a preocupação é com relação ao escoamento e direcionamento do fluxo da água subterrânea presente no local em todas as etapas construtivas e operacionais futuras.

Tendo em vista a necessidade desta ação, o projeto do túnel contempla um sistema de drenagem no seu interior, cuja finalidade básica é a de escoar as águas presentes e direcioná-las para sistemas de captação localizados em área exterior, destinando as mesmas a um corpo receptor.

Este sistema deverá ser construído de materiais duráveis, de bom desempenho mecânico e químico mediante a atuação de fatores externos, tais como carregamentos estruturais e agentes deletérios.

As figuras 39, 40 e 41 ilustram o sistema de drenagem no interior do túnel I.

Figura 39 - Execução do sistema de drenagem



Fonte: acervo do autor

Figura 40 - Sistema de drenagem completo



Fonte: acervo do autor

Figura 41 - Sistema de drenagem completo e início do espalhamento de lastro



Fonte: acervo do autor

4.4.8 Superestrutura ferroviária

Concluída a etapa da construção do arco invertido a próxima etapa consiste na implantação da superestrutura ferroviária, englobando distribuição de lastro e agulhamento deste, lançamento e alinhamento dos dormentes, colocação de trilhos e consequente alívio de tensão nos mesmos, levantamentos executados com lastro afim de colocar a grade nivelada e ainda o acabamento nas ombreiras do lastro e intervalos dos dormentes, deixando a via livre e visualmente acabada.

As figuras 42, 43 e 44 Ilustram a montagem sequencial da superestrutura ferroviária.

Figura 42 - Lastro distribuído em todo túnel



Fonte: acervo do autor

Figura 43 - Dormentes e trilhos instalados



Fonte: acervo do autor

Figura 44 - Superestrutura Concluída



Fonte: acervo do autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento deste trabalho nos deparamos com muitas dificuldades, uma delas que vale ressaltar, é a escassez de literaturas sobre o assunto tratado, até mesmo os assuntos correlacionados são muito difíceis de serem pesquisados pelo mesmo motivo literário.

Nos esbarramos também na falta de dados disponíveis sobre o objeto do trabalho, com a convicção que deveríamos trabalhar somente com dados de origem confiáveis, foi uma grande tarefa conseguir acessar alguns dados utilizados neste trabalho de conclusão de curso.

Podemos notar que as construções subterrâneas estão sendo realizadas cada vez mais com o crescimento desordenado dos grandes centros urbanos, com isso o “NATM” vem sendo utilizado com bastante frequência devido sua melhor trabalhabilidade onde permite desvios executivos se necessários que podem ser realizados sem maiores problemas e possui menor custo em relação aos outros métodos construtivos.

Fatores importantes para a definição das providências que serão adotadas durante a execução de serviço são as características geológicas do terreno realizadas por sondagens, onde logo após essas sondagens ao longo do trecho são planejadas as medidas que serão adotadas para execução dos túneis.

Vale salientar para uma execução com maior sucesso do método “NATM” deve-se seguir todos os conceitos de execução de forma criteriosa, pois se trata de uma obra de grande porte e risco.

O estudo de caso mostrou o método “NATM” sendo utilizado atualmente em obras de grande porte, e que apesar de inovador, o método “NATM” é empregado com sucesso adapta-se a realidade dos grandes centros urbanos e garante que as obras executadas não agridam o meio ambiente e a sociedade, e nos mostram também que obras como essa nos traz benefícios, como maior competitividade dos produtos internos para o exterior, menores custos dos produtos comercializados no mercado interno, incentivo aos investimentos, à modernização e à produção e redução de emissão de poluentes que interferem no aquecimento global, tudo isso e mais, envolve uma tecnologia como o método NATM.

Como sugestão para trabalhos futuros, podemos dizer que as peculiaridades deste processo são por demais interessantes, tais como instrumentação, projeção de concreto e ainda os materiais utilizados que nos abre uma vasta opção para pesquisas. Ainda a título de sugestão poderíamos citar, o uso deste método para outro tipo de obra, não somente com finalidade de tráfego ferroviário.

Com isso concluímos o trabalho alcançando nosso principal objetivo, deixando para o corpo docente e discente dos cursos de Engenharia e Tecnologia, um material didático e ilustrativo do método “NATM”, material este que poderá auxiliar nas pesquisas e desenvolvimentos de estudos na área de construção civil.

REFERÊNCIAS

BALAGUER, D. A.; **Estudo de caso: A execução do Túnel de Serviço da Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro – Emboque Gávea**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

BARZAN, G. S.; **Mapeamento geológico e tectônico e classificação geomecânica do maciço rochoso da área destinada para implantação do túnel da pch Rio Fortuna**. Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, 2009.

CAMPANHÃ, C. A.; FIGUEIREDO CONSULTORIA E ENGENHARIA DE PROJETOS LTDA, BOSCOV, Eng.Pedro, CTPO ENGENHARIA LTDA, REVISÃO FINAL Prof. Dr. Victor S. B. DE MELO, **Manual NATM, Gerência de escavações subterrâneas**- páginas. 7-14, 1995.

DANTAS, F. C. C. C.; FILHO, S. F. A. C.; VILAR, J. W. C. **A Qualidade do Saneamento Ambiental no Assentamento Moacyr Wanderley (Nossa Senhora do Socorro)**. Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica, 4, 2009, Belém, Anais...Belém, Pará, CD-ROM, 2009.

FIGUEIREDO, A. D.; **O papel do concreto projetado na impermeabilização de túneis**. Artigo da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, p. 01-06, 2011.

FOÁ, S. B.; ASSIS, A.; **Concreto Projetado para túneis**. Apostila, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 70 p. 2002.

JUNIOR, A. H. V. M.; **Simulação numérica tridimensional de túneis escavados pelo NATM**. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-066199, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 1999.

KOCHEN, R; NETO, F. R.; **Segurança, Ruptura e Colapso de Túneis urbanos em NATM**. Revista Engenharia, edição 540, São Paulo, p. 55-62, 2000.

MEDEIROS, H.; **Engenharia Subterrânea**. Revista Técnica, set/ 2008. Disponível: <<http://www.revistatchne.com.br>>. Acesso em: 13 de fev. de 2015.

PALERMO, G.; HELENE, P.; **Concreto Projetado como revestimento de túneis**. Boletim Técnico – Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, São Paulo, 1997.

SIMONETTI, H.; **Estudo de impactos ambientais gerados pelas rodovias: sistematização do processo de elaboração de EIA/RIMA**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SOUZA, T. B. B.; **Tratamento de solos para execução de túneis urbanos**. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2003.

SOLOSTRAT; **Manual Técnico Solostrat**. Disponível em: <<http://www.jb.com.br>>. Acesso em: 13 de fev. de 2015.

VIEIRA, F. A. M.; **Execução de túneis em NATM (New Austrian Tunneling Method) para obras de saneamento.** Trabalho de Conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003.

ZIRLIS, A; SOUZA, G. J. T.; **Túneis – Uma solução de engenharia inteligente.** Fundações e Obras Geotécnicas, edição 540, São Paulo, p. 64-69, 2011.