



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Trabalho de Formatura 2009 – 2ª Parte

ESTUDO DO MÉTODO TBM E ACOMPANHAMENTO DA DESMONTAGEM MÁQUINA UTILIZADA NA ESCAVAÇÃO DA LINHA - 4 DO METRÔ DE SÃO PAULO

Grupo:

Carolina Rosa	5606828
Diego Lembo	5435088
Guilherme Corsini	5436134

Orientador: Professor Doutor Marcos A. M. Noronha

Dezembro / 2009



SUMÁRIO

RESUMO.....	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	5
LISTA DE GRÁFICOS.....	5
1. INTRODUÇÃO	6
1.1. Custos Diretos.....	9
1.2. Custos Indiretos	9
1.3. Custos Sociais	10
1.4. Custos Ambientais	10
1.5. Comparação das duas alternativas.....	12
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	14
3. O MÉTODO TBM	15
3.1. Histórico	15
3.2. Vantagens e desvantagens do método TBM em relação a outros métodos subterrâneos.....	25
3.3. Variações do Método	26
3.3.1. TBM de Face Aberta sem Shield	27
3.3.2. TBM de Face Aberta com Shield	29
3.3.3. Earth Pressure Balanced – TBM (EPB-TBM).....	31
3.3.4. Slurry-TBM	34
3.3.5. TBM Conversível (“Mixshield”)	37
3.3.6. Resumo dos critérios de seleção	38
3.4. Estudos de Caso	39
3.4.2. Paris	39
3.4.3. Singapura.....	42
3.4.4. Porto (Portugal).....	44
3.4.5. Bozberg - Switzerland	46
3.4.6. St Gotthard & Lotschberg.....	48
3.4.7. Madri (Espanha).....	50



3.4.8.	Metropolitana di Napoli.....	52
4.	DESMONTAGEM DA MÁQUINA TUNELADORA.....	55
4.1.	Seqüência de Atividades.....	56
4.2.	Equipamentos para transporte vertical das peças	64
4.3.	Destino da Máquina	66
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68



RESUMO

O problema da falta de infra-estrutura na cidade de São Paulo e no Brasil é um tema recorrente no estudo da melhor ocupação do espaço urbano uma vez que está diretamente ligado ao bem estar dos cidadãos. Sabe-se hoje, que o sistema de transportes da cidade não atende de forma eficiente à imensa demanda da população que depende do mesmo para exercer uma série de atividades do dia-a-dia.

Percebe-se que a utilização do espaço subterrâneo é cada vez mais constante, uma vez que as chamadas “obras subterrâneas” (galerias, redes de água e esgoto, redes metroviárias, etc.) possuem grande potencial estratégico pelo fato de preservarem o espaço terrestre e o meio ambiente como um todo. Sendo assim, a tecnologia de túneis, torna-se extremamente atraente por oferecer uma maior relação benefício/custo e proporcionar maior agilidade na locomoção de pessoas e bens.

O método TBM que utiliza máquinas tuneladoras na escavação de túneis, apesar de apresentar uma série de vantagens, é muito pouco utilizado no Brasil e no mundo, e sua tecnologia ainda é detida por um pequeno grupo de fabricantes e estudiosos da área.

Diante deste contexto, a segunda parte do trabalho de formatura tem por objetivo, estudar o método TBM e suas variações e apresentar uma breve comparação do método com outras alternativas de escavação de túneis e dutos.

Além disso, de modo a concluir a primeira parte do trabalho, apresentada no primeiro semestre de 2009, esta segunda parte traz também o acompanhamento da desmontagem da máquina tuneladora utilizada Linha 4 do metrô de São Paulo.

Palavras Chave: Método TBM, Linha - 4.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Método da Vala a Céu Aberto com escoramento metálico	8
Figura 2: Microtuneladora	8
Figura 3: Estrutura hierárquica de comparação das duas técnicas.....	11
Figura 4: Ilustração esquemática do "Fatiador de Montanhas" de Maus.....	17
Figura 5: Máquina utilizada no projeto Pierre	20
Figura 6: Formação das lascas de rocha a partir dos discos de Corte.....	22
Figura 7: Máquina utilizada no Túnel Poatina	24
Figura 8: Túnel Rhyndaston	24
Figura 9: TBM de face aberta sem Shield	29
Figura 10: TBM de face aberta com "shield"	31
Figura 11: EPB - TBM	34
Figura 12: Slurry TBM	36
Figura 13: MixShield TBM	37
Figura 14: Uso otimizado da seção circular com dois "decks".....	39
Figura 15: Mixshield Paris/Socatop – Modo Slurry.....	41
Figura 16: Mixshield Paris/Socatop – Modo EPB.....	41
Figura 17: Máquinas da HerrenKNecht em funcionamento em Singapura	43
Figura 18: TBM tipo EPB utilizado em Porto	46
Figura 19: Máquina utilizada no túnel de Bozberg	47
Figura 20: Máquina utilizada no túnel de Loetschberg - Suíça.....	49
Figura 21: Esquema do EPB – TBM utilizado em Madri	51
Figura 22: Máquina utilizada em Napoli	53
Figura 23: Trecho escavado entre a estação Luz e o poço João Teodoro.....	56
Figura 24: Parte traseira do shield que saiu primeiro na desmontagem	57
Figura 25: Içamento da roda de corte	58
Figura 26: Içamento da roda de corte	58
Figura 27: Posicionamento da roda de corte no canteiro do poço João Teodoro	59
Figura 28: Posicionamento da roda de corte no canteiro do poço João Teodoro	59



Figura 29: Içamento do primeiro quarto da parte central do “shield”	60
Figura 30: Içamento do primeiro quarto da parte central do “shield”	61
Figura 31: Içamento da câmara hiperbárica.....	61
Figura 32: Içamento da câmara hiperbárica.....	62
Figura 33: Içamento do primeiro quarto da parte frontal do “shield”	63
Figura 34: Içamento do primeiro quarto da parte frontal do “shield”	63
Figura 35: Guindaste móvel sobre pneus Liebherr LTM 1250-6.1	65
Figura 36: Guindaste móvel sobre esteira Manitowoc 2250.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Prejuízos anuais causados por congestionamentos (IPEA/ANTP, 1999)	7
Tabela 2: Pesos Relativos dos custos considerados	12
Tabela 3: Critério de seleção de TBMs	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Análise objetiva das soluções.....	13
Gráfico 2: Evolução das escavações do Metrô de Napoli	54



1. INTRODUÇÃO

Como já dito na primeira parte deste trabalho de formatura, a utilização do espaço subterrâneo está se tornando cada vez mais atrativa, gerando uma grande demanda por novas técnicas de execução de túneis e microtúneis que garantam uma maior relação benefício/custo e minimizem os impactos sociais e ambientais gerados nas fases de execução e operação dos mesmos.

Em áreas urbanas é necessário distinguir os túneis construídos a céu aberto daqueles construídos por escavação subterrânea. Os túneis a céu aberto podem ser construídos de várias maneiras, através de métodos construtivos denominados “cut and cover”. Nestes processos é efetuada uma escavação a céu aberto (vala ou trincheira), com proteção contra desmoronamentos, ao longo da qual é constituída a estrutura que abriga o túnel. Já os métodos de escavação subterrânea podem ser, genericamente, divididos em dois grandes grupos: as escavações a fogo e as escavações mecanizadas, sendo os métodos NATM (New Austrian Tunneling Method) e TBM (Tunnel Boring Machine) os dois exemplos mais notórios de cada grupo, respectivamente ^[2].

Atualmente, o nível de urbanização de grandes cidades em todo o mundo é tão elevado que determinadas tecnologias de execução, como a vala a céu aberto, são inviabilizadas devido ao enorme impacto social que podem causar. Alguns exemplos desses impactos são o aumento do tráfego devido à interdição de importantes vias, prejuízo no comércio da região lindeira à obra, aumento do nível de stress da população, atrasos na entrega de cargas, etc.

A tabela a seguir exemplifica a magnitude desses impactos ao mostrar as perdas anuais causadas por congestionamentos em dez cidades brasileiras (Belo Horizonte, Brasília, Campinas, Curitiba, João Pessoa, Juiz de Fora, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro e São Paulo) ^[2].



Discriminação das perdas (Deseconomias)	Cidades Brasileiras (US\$)	São Paulo	
		(US\$)	(%)
Tempo gasto nos congestionamentos	193.965.532,40	125.613.892,50	64,8%
Aumento do consumo de combustíveis	146.591.467,00	115.056.701,20	78,5%
Aumento da Poluição	37.097.631,70	28.814.770,60	77,7%
Necessidade de aumento do sistema viário	96.454.289,40	76.610.648,30	79,4%
Total Geral	474.108.920,50	346.096.012,60	73,0%

Tabela 1: Prejuízos anuais causados por congestionamentos (IPEA/ANTP, 1999)

Os valores obtidos pelo estudo do IPEA/ANTP (1999) indicam prejuízos diários totais superiores a 1,4 milhão de dólares americanos nas dez cidades brasileiras pesquisadas e valores da ordem de 1,0 milhão de dólares americanos na cidade de São Paulo. No total anual, o estudo mostra que são gastos mais de 470 milhões de dólares americanos em decorrência de congestionamentos. Tais valores podem aumentar significativamente caso grandes avenidas sejam interrompidas devido às obras de escavação de um grande túnel ^[2].

Ao contrário dos métodos a céu aberto, as tecnologias de escavação subterrânea, expõem muito menos a população aos inconvenientes de uma obra de tal porte e geram impactos ambientais menores. Um estudo realizado pela Universidade Politécnica de Torino faz uma comparação entre os métodos de microtuneladora (TBM) e vala a céu aberto na instalação de um duto de 1,5m de diâmetro pertencente à uma rede de abastecimento em zona urbana (Torino – Itália). Tal estudo exemplifica de forma clara o cenário descrito acima, levando em conta os mais diversos aspectos sociais e ambientais envolvidos sob os pontos de vista público e privado.



Abaixo, ilustrações dos dois métodos comparados no estudo da Universidade de Torino:



Figura 1: Método da Vala a Céu Aberto com escoramento metálico



Figura 2: Microtuneladora



Para a comparação dos dois métodos, utilizou-se o Processo de Hierarquia Analítica, que é muito utilizado quando é necessária uma tomada de decisão entre duas ou mais opções. A análise foi realizada a partir das respostas de um questionário proposto à população habitante das áreas próximas à obra que dava ênfase, principalmente, aos aspectos sociais envolvidos.

A primeira etapa consistiu nas definições da estrutura hierárquica de representação do problema e dos custos envolvidos (diretos, indiretos, sociais e ambientais).

1.1. Custos Diretos

Os custos diretos correspondem ao total de recursos econômicos despendidos na instalação física do duto, incluindo o reaterro no caso da vala a céu aberto. Em um primeiro momento, esses custos são maiores para a opção da microtuneladora.

1.2. Custos Indiretos

Os custos indiretos correspondem às despesas com materiais, maquinário e serviços não relacionados diretamente com a fase de construção. Esses custos contribuem de diversas maneiras na composição do custo global.

Foram levados em conta os seguintes subitens relacionados à custos indiretos:

- Danos às propriedades privadas;
- Danos à infra-estrutura;
- Redução do ciclo de vida do pavimento;
- Aumento da manutenção do pavimento e;
- Deslocamentos de serviços.



Comparando as duas técnicas sob essa perspectiva, a microtuneladora se mostra muito mais atrativa uma vez que envolve uma área de construção limitada e gera distúrbios na superfície de magnitudes muito menores.

1.3. Custos Sociais

Os custos sociais correspondem aos custos gerados para a sociedade durante a fase de construção e são causados pelas interferências entre a obra e as atividades econômicas do local.

Os seguintes custos foram levados em conta:

- Distúrbios no tráfego, subdividido em Desvios de circulação, Perda de tempo, aumento dos gastos em transporte público, Novas vias de circulação, sinalização, aumento de acidentes e eficiência na direção;
- Segurança do trabalho;
- Distúrbios em atividades comerciais;
- Fatores de paisagem, subdividido em danos visuais, danos aos elementos da paisagem e danos permanentes;
- Fatores humanos.

1.4. Custos Ambientais

Os custos ambientais são utilizados para medir os efeitos negativos permanentes causados pela deterioração dos componentes ambientais. Tais custos foram divididos da seguinte forma:

- Ar;
- Solo, subdividido em estabilidade e tipos geológicos;
- Água, subdividido em qualidade da água de superfície e variações hidrológicas;
- Agentes físicos, subdividido em Barulho e vibrações;
- Agentes naturais;



A figura 3 mostra a hierarquização dos custos levados em conta na análise:

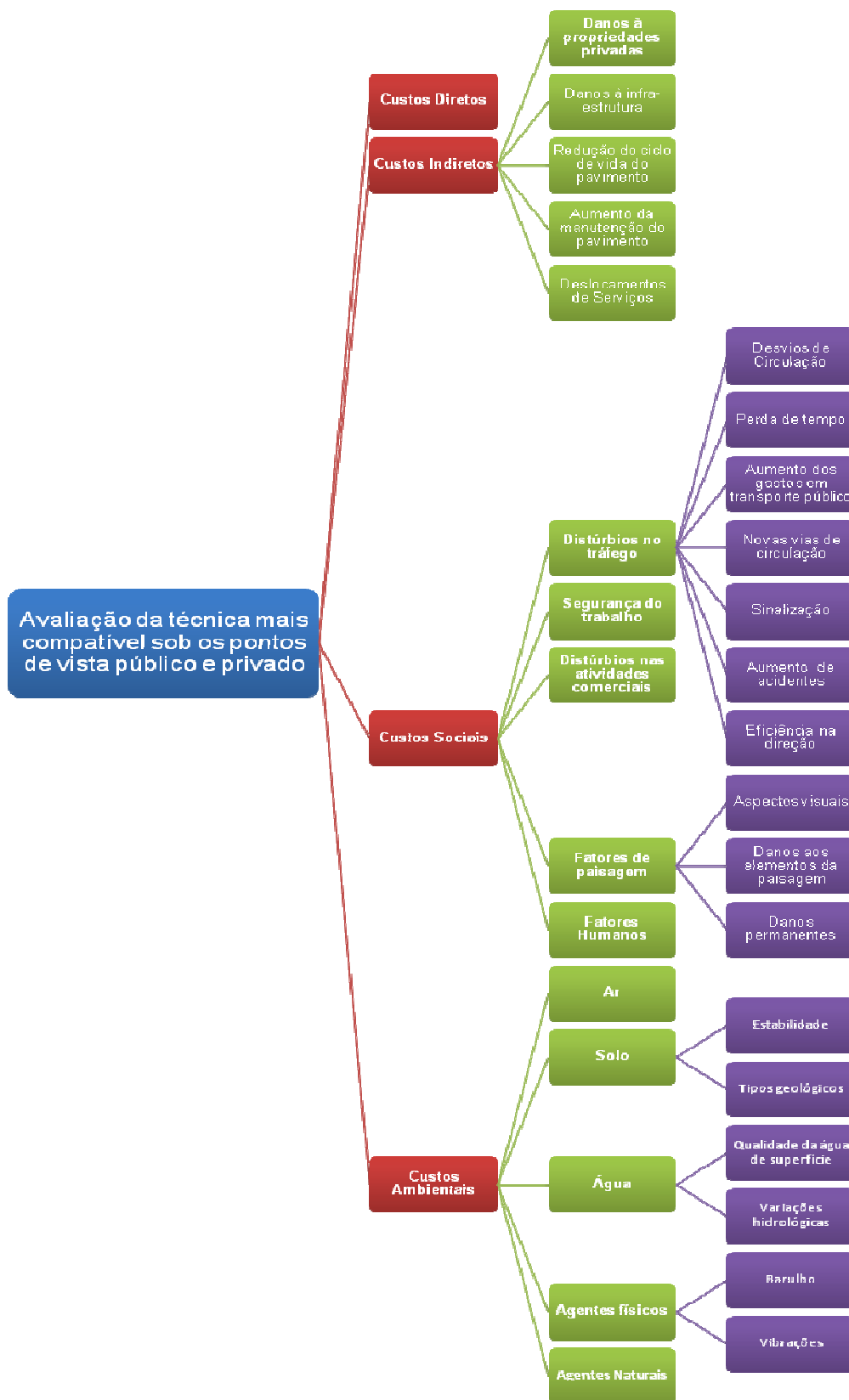


Figura 3: Estrutura hierárquica de comparação das duas técnicas



1.5. Comparação das duas alternativas

Com o intuito de comparar as duas alternativas de maneira objetiva, determinaram-se pesos relativos para os custos envolvidos (tabela 2) ^[1].

Custos diretos	13,7%
Custos indiretos	39,4%
Custos Sociais	39,4%
Custos Ambientais	7,5%

Tabela 2: Pesos Relativos dos custos considerados

Como pode ser observado, aspectos que geralmente são subestimados em análises desse tipo, como os custos indiretos e sociais, têm grandes pesos atribuídos. Esses pesos foram definidos levando em conta o ponto de vista da sociedade. De fato, caso o principal aspecto considerado fosse o custo direto envolvido na obra, a alternativa com vala a céu aberto seria muito mais vantajosa, entretanto, a análise realizada a partir dos diversos custos descritos acima demonstra que a utilização de microtuneladora para a execução do duto de abastecimento em centro urbano é a melhor solução para o caso estudado.

O resultado da análise pode ser visto no Gráfico 1 ^[1] a seguir, que fornece um valor de 0 a 100% para cada solução (sendo a soma dos valores igual a 100%) em todos os custos considerados, de modo a compará-las, ou seja, quanto maior a porcentagem dada à solução, mais vantajosa ela será nesse aspecto.

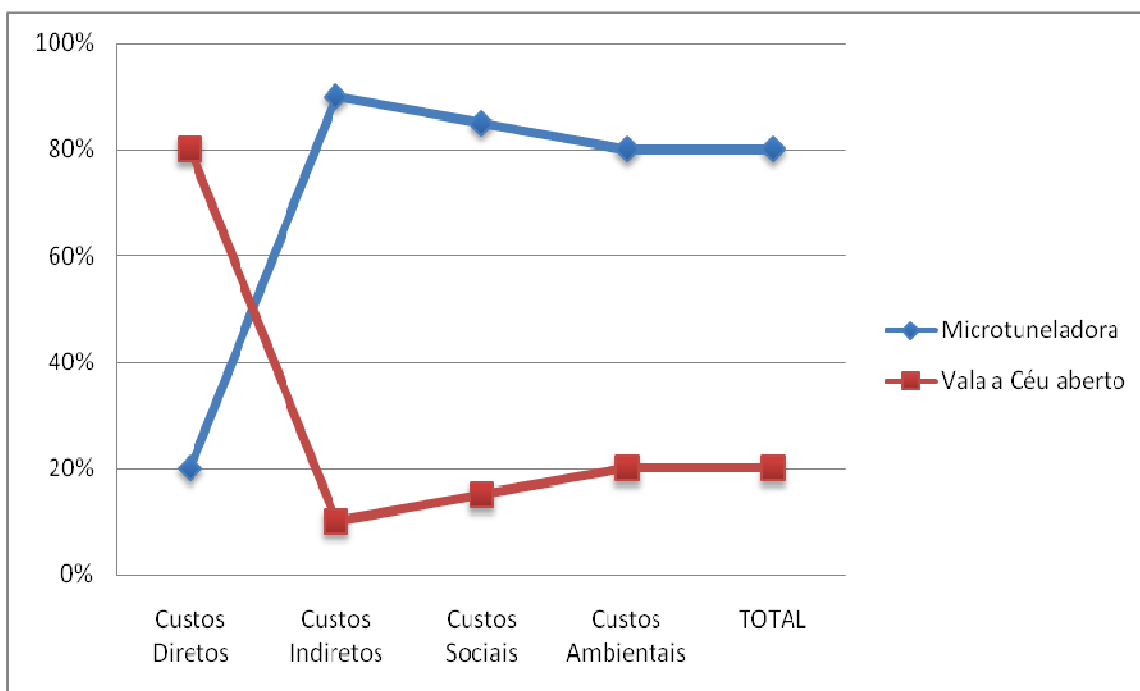


Gráfico 1: Análise objetiva das soluções

Observa-se, portanto, que a solução com microtuneladora é melhor em todos os aspectos considerados, exceto no custo direto, apresentando 80% de vantagens (maior relação benefício/custo) no total, contra apenas 20% da solução com vala a céu aberto. Este resultado reafirma que métodos subterrâneos de escavação de dutos e túneis são mais adequados em grandes cidades devido aos altos níveis de urbanização e que o entendimento dos mesmos é de grande importância para o aperfeiçoamento das técnicas.



2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem o objetivo de explorar o método de escavação de túneis TBM (Tunnel Boring Machine) através do estudo do seu histórico, suas variações e análise de estudos de caso de aplicações em todo o mundo. Além disso, o trabalho também compara o método TBM com outras técnicas de escavação subterrâneas, expondo suas vantagens e desvantagens.

De modo a completar a primeira parte, este relatório traz também o acompanhamento da desmontagem da máquina utilizada na escavação da Linha 4 – Amarela do metrô de São Paulo, desmontagem essa que ocorreu entre os dias 13/10/2009 e 30/11/2009 no poço João Teodoro na região da estação da Luz.



3. O MÉTODO TBM

As tuneladoras consistem em equipamentos de escavação mecanizada de túneis de seção circular com diâmetro variando de 1 a 15m. Tais máquinas são altamente adaptáveis a diversas condições geotécnicas, desde rochas com alta resistência até terrenos arenosos instáveis.

Esta parte do trabalho se propõe a estudar o método TBM, bem como sua evolução ao longo da história, apresentando as diversas variações do mesmo com estudos de caso de aplicações em diferentes locais do mundo.

3.1. Histórico ^[3] ^[10] ^[11]

Em meados do século XIX, a civilização ocidental estava no auge do desenvolvimento de ferrovias para escoamento de produção. Em diversos lugares haviam idealizadores debruçados sobre mapas e linhas de desenho.

Infelizmente, tantos sonhos e traçados poderiam se chocar com uma montanha, ou pior, uma cadeia de montanhas, como os Alpes e construir sobre, ou no entorno desses obstáculos significava um alto custo e um longo prazo. Mentes lógicas ansiavam por atravessar tais montanhas, o que implicava em escavações de túneis (tunelamento), que por sua vez gerava um custo muito elevado que poderia inviabilizar as obras. O tunelamento, por natureza, oferecia uma área de trabalho muito pequena, apenas um pequeno grupo de pessoas poderia trabalhar dentro do túnel, o que dificultava o manuseio das ferramentas e afetava a produtividade da obra. Um projeto em Massachusetts, nessa época levou vinte anos para percorrer cinco quilômetros, e ao mesmo tempo em que foi pior do que a média antiga de produção, a famosa fórmula Tempo = Dinheiro fez os custos de tunelamento se tornarem absurdos.



O primeiro passo para o desenvolvimento da tecnologia de máquinas tuneladoras foi dado por um engenheiro belga chamado Joseph-Henri Maus, que em 1845 foi até o Rei da Sardenha para aprovar a construção da primeira estrada de ferro ligando a França à Itália. Maus descartou a idéia de executar uma linha superficial e insistiu na construção de túneis, especificamente, através, da MT. Frejus, perto da famosa passagem em MT. Cenis.

O túnel, de acordo com Maus, possuía uma rota esticada de, aproximadamente 12.290 m, uma distância bastante significativa, dada a tecnologia da época. Ele havia planejado entrar na montanha em um ponto cerca de 1363m (4500 pés) acima do nível do mar, em Bardonecchia, próximo ao vale de Rochemolle em Piedmont, Itália, e, seguir para baixo a um declive gradual de 1,88%, de modo a surgir a uma altura de 1150 m acima do nível do mar, no lado oposto da montanha perto de Modane, próximo ao vale de Arc, na França. Nesta época, a rotina de escavação era a seguinte: fazer furos na face, embalá-los com pólvora e acendê-la, correr até um local seguro, aguardar a explosão, correr de volta carregando restos de madeiras para pregá-los onde houve a explosão, para que não houvesse nenhum colapso do maciço.

O problema era que o detonador de pólvora possuía muitos gases tóxicos e o espaço era confinado. Por isso toda essa atividade dependia da exaustão do ar poluído pela explosão anterior à saída do túnel num período de tempo razoável. Maus planejava dispensar a explosão completa do túnel para criar a primeira máquina de perfuração de rochas.

O “Fatiador de Montanhas de Maus”, como foi apelidado, tomou forma em uma fábrica de armas perto de Turim em 1846. O equipamento era grande e complexo, maior do que uma locomotiva, com mais de uma centena de brocas de percussão, tudo definido por motores excêntricos, eixos, engrenagens e molas. Funcional ou não, ele era extremamente gratificante de se contemplar, e turistas vieram de muitas regiões para admirá-lo como um monumento, mais uma peça de arte do que uma ferramenta.

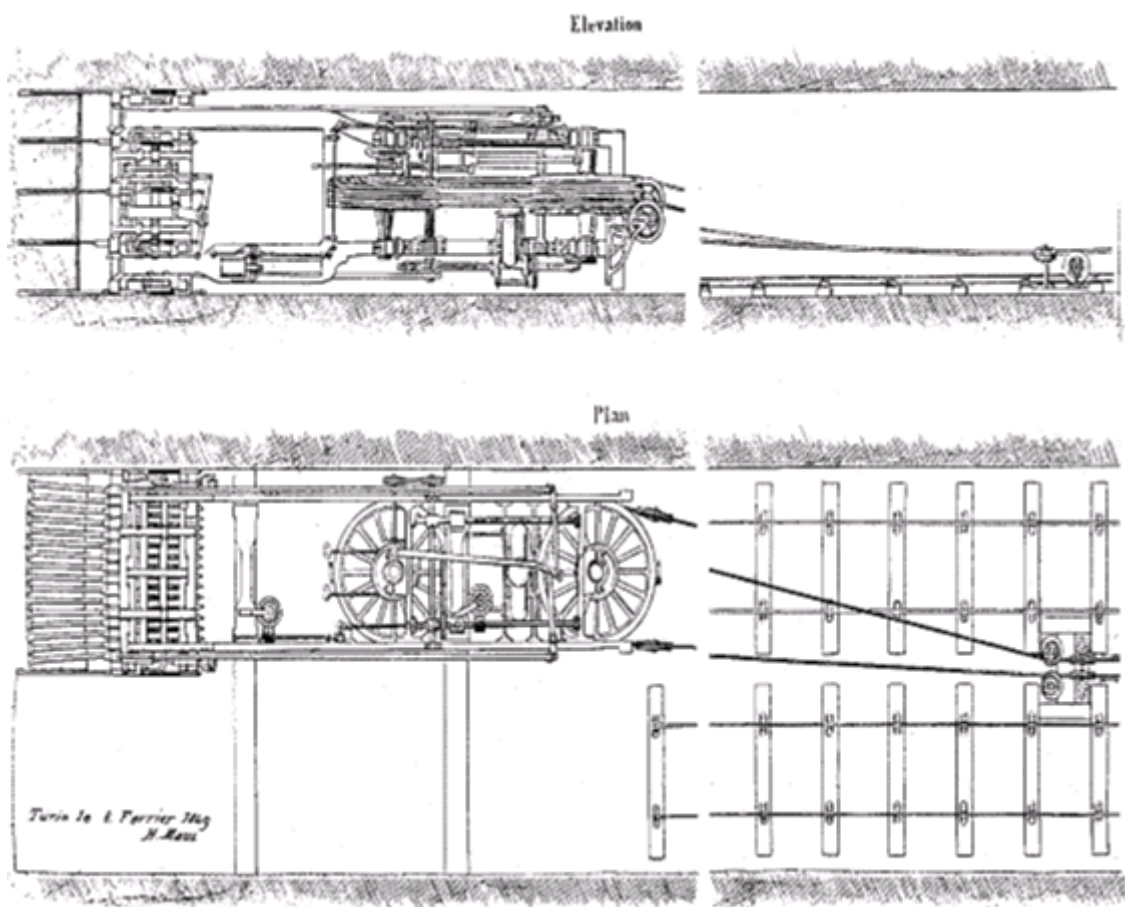


Figura 4: Ilustração esquemática do "Fatiador de Montanhas" de Maus

Toda a energia necessária para conduzir o "Fatiador de Montanhas" era gerada fora do túnel e levada para a frente de trabalho através de ligações mecânicas. Quanto mais longo o túnel se tornava, mais dessas ligações eram necessárias, e devido ao grande comprimento, causavam deficiências de transmissão.

Após a convulsão política de 1848, que deixou a Europa sentir-se menos otimista e expansiva em todas as esferas, o financiamento de Maus "foi adiado" e mais tarde suspenso. Dez anos mais tarde foi construído um túnel perto de rota de Maus, executado com o antigo método porém com tecnologia de ventilação muito melhor.



Com variações, essa história se repetiu em todo o mundo ano após ano: um projeto extremamente desafiador, um engenheiro brilhante, uma imponente obra inspiradora de máquinas, admirando multidões, discursos entusiasmados com a inevitabilidade do progresso humano, e, finalmente, a decepção.

Em 1851 Richard Munn construiu uma máquina enorme para a época com 75 toneladas para a perfuração de um túnel através Hoosac Mountain, ao noroeste de Massachusetts. O projeto foi abortado antes que chegasse a dez pés. Em 1856, um dos engenheiros mais famosos do país, Herman Haupt, anunciou sua intenção de resgatar o projeto Hoosac com outra máquina de tunelamento. Haupt estava tão confiante que financiou o desenvolvimento do seu próprio bolso. Infelizmente, sua máquina quebrou antes que tivesse penetrado até mesmo um pé, deixando-o em uma infeliz situação de falência.

No entanto, os engenheiros mantiveram-se firmes. Ano após ano, o escritório de patentes foi salpicado com invenções pretendendo revolucionar a arte. Engenheiros saquearam o vocabulário de design mecânico: bateria, armas, pistões, vapor, ar comprimido. Ainda assim, nada funcionou.

Há várias razões para este triste registro - o subterrâneo é terrivelmente hostil para as máquinas. Partiu-se então para a seguinte lógica: um buraco feito por uma broca se assemelha com um pequeno túnel. Tudo o que você precisa fazer para um bom encapsulamento da máquina é a construção de uma grande broca para rocha. Quanto maior a superfície a ser criada, maior será a energia necessária. A utilização de pequenas brocas significava que as mesmas deveriam ser competentes para escavar um cilindro de três a seis metros de diâmetro, o que seria quase impossível. Mesmo supondo que se pudesse gerar e realizar tais níveis elevados de energia, as forças envolvidas iriam certamente forçar seus equipamentos à ruptura e, se houvesse algum tipo de recuo, a máquina iria se prender contra a rocha.

Por volta de 1930, os engenheiros desistiram da idéia da broca gigante. De acordo com Barbara Stack, o pré-eminente historiador desta tecnologia,



"para os vinte anos seguintes, se fossem, apresentadas pelos engenheiros, patentes para máquinas de perfuração de rocha no modelo de broca, nenhuma das unidades seria construída."

Coincidentemente, 1930 foi também o ano em que James S. Robbins se formou no Michigan School of Mines (atualmente, Michigan Technological University). De acordo com o seu filho Richard, ele não sabia nada sobre a história das máquinas de perfuração do túnel. Entretanto, nos quinze anos seguintes, ele apostou todas as fichas em torno do assunto, fazendo mineração de pedras duras na Califórnia, trabalhando no garimpo de ouro (isto é, lavando ou dragando sedimentos do rio) no Alasca, e assim por diante. Depois da guerra, foi para Illinois trabalhar como engenheiro de consultoria para a indústria do carvão.

Em 1952, Robbins recebeu em seu escritório, um empreiteiro de túneis chamado F.K. Mittry que tinha acabado de ganhar uma concorrência para escavar um túnel de desvio de água para uma represa nos arredores de Pierre, em Dakota do Sul - EUA. O solo em torno de Pierre estava tão cheio de rachaduras que os geólogos tinham um rótulo específico para isso: Folhelho Pierre. A fragilidade do Folhelho Pierre fez com que os engenheiros ficassem receosos quanto a utilização de métodos explosivos, uma vez que não se sabia como seriam as repercussões caso ocorresse algo. Assim, Mittry, que estava visitando consultores para obtenção de idéias, foi bater à porta de um especialista em máquinas de mineração de carvão, James S. Robbins.

Robbins então apresentou uma idéia para Mittry. A indústria mineira havia apenas começado a trabalhar com uma técnica de corte de carvão que não utilizava jateamento. A idéia era pressionar um grupo de picaretas, como os dentes de um garfo, no carvão e, em seguida, girá-lo, marcando profundamente com cortes circulares o carvão. As rodas girariam uma vez e depois recuariam, para que o carvão fosse empurrado para cima e retirado por uma pá transportadora. Dessa forma o processo seria uma repetição de pegar (recolher) o carvão e girar a máquina.



Claro que os contextos de aplicação eram muito diferentes. Os túneis deveriam ser escavados com um grau de precisão muito elevado, no entanto, Mittry não tinha alternativa e deu total autoridade à Robbins para a construção de uma máquina com base na idéia de “pegar e girar”.

A máquina possuía 24 metros de comprimento, com um diâmetro de quase 8 metros. Ao contrário de suas antecessoras, seu desempenho de escavação era impressionante. O prato giratório rompia a rocha com grande facilidade, escavando o túnel a taxas de até 48 metros em 24 horas, cerca de duas vezes mais rápida que a perfuração com explosivos. Robbins não construiu o primeiro TBM do mundo, mas construiu o primeiro que apresentou resultados satisfatórios.



Figura 5: Máquina utilizada no projeto Pierre

O sucesso das máquinas sobre o projeto Pierre levou a uma série de contratos. Robbins passou então a entender que os maciços rochosos eram um meio perfeito para desenvolver tecnologias.



Os estudos relacionados à mecanização da escavação de túneis voltaram então à tona, desta vez com um número muito maior de engenheiros: Robbins, sua tripulação, a tripulação de Mittry e os visitantes do Folhelho de Pierre, que haviam visto uma máquina de perfuração de túnel funcionar da forma como era suposta. Robbins então fundou a James S. Robbins e Associates, a primeira empresa dedicada exclusivamente à fabricação de máquinas de perfuração de túnel.

Um de seus primeiros projetos foi para uma rede de esgoto em Toronto. O principal problema desta máquina era o arrasto das picaretas batendo em rocha muito dura, o que implicava na paralisação da máquina para manutenção com grande frequência, desperdiçando muito tempo. Certo dia, Robbins decidiu tirar as picaretas da cabeça de corte, o que até então era um contra-senso, já que a teoria era de que as picaretas eram as principais responsáveis para o rompimento das rochas, e os discos funcionavam basicamente para limpeza. Entretanto, a intuição do engenheiro provou o contrário: a máquina apresentou as mesmas taxas de perfuração de antes, porém, sem as constantes paradas para manutenção. Descobriu-se que as rodas de ruptura, que agora passavam a ser chamadas de "discos de corte", estavam fazendo o trabalho da escavação durante todo o tempo.

O fato dos discos de corte serem tão eficientes frente à escavação de rochas é explicado pela grande quantidade de fraturas e falhas presentes nas rochas naturais em diversas escalas. Quando o disco é empurrado contra a rocha, a tensão de compressão introduzida fica concentrada em torno destes pontos fracos, com a maior parte da compressão organizada em torno das piores falhas. Ao exercer pressão suficiente, as rachaduras se estendem até o meio, ou seja, a função do disco é fazer com que as fraturas se propaguem até provocarem o desprendimento de "lascas" de rocha. Assim, os discos de corte foram melhores desenvolvidos e fizeram com que a energia fosse canalizada para a ruptura da rocha.

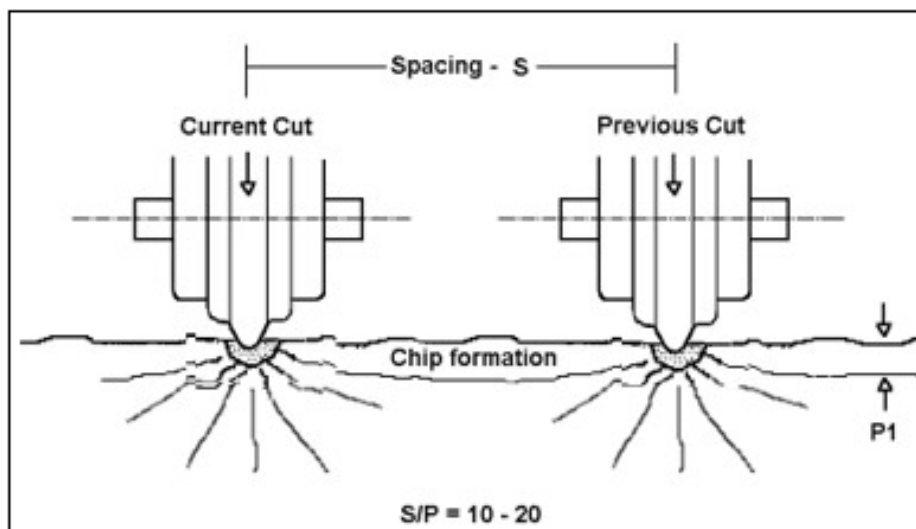


Figura 6: Formação das lascas de rocha a partir dos discos de Corte

A partir de então, grandes progressos foram observados nas máquinas tuneladoras e já nos primeiros anos desta tecnologia, através do projeto de Toronto, levantou-se uma outra questão: O que mais custava na escavação não era quebrar a rocha em si, e sim o transporte dos fragmentos para fora da frente de trabalho em carrinhos de ferro. Para a máquina de Toronto, Robbins criou um engenhoso sistema de recipientes com fundo removível que giravam com a cabeça de corte, escavando a lama e os fragmentos do fundo e depositando sobre uma esteira que levava para fora da frente de trabalho. Com isso, Robbins desenvolveu uma máquina de escavação de túneis e extração de lama (Tunnel – Boring – and – Muck – extraction machine).

Ao final dos anos 50, o TBM havia sido desenvolvido à maneira que Maus ou Haupt haviam idealizado. As taxas de escavação do TBM eram de 2 a 3 vezes maiores que as taxas de escavação a fogo no mesmo solo. Tais velocidades representaram uma enorme economia, o que justificaria então um grande aumento na utilização de tais máquinas.

Na realidade, nada disso aconteceu. A maioria dos empreiteiros estava presa ao método de perfuração e explosão. E tinham motivos para se manter



em tal situação. Até então, o pagamento dos serviços de tunelamento era feito no formato “pay-as-you-go” (custo incorrido), com baixo capital e custos operacionais elevados. TBMs eram pagos por frentes de trabalho e não eram baratos. Nos termos do comércio, foram impostos altíssimos custos de mobilização e por isso, seriam necessários muitos ajustes financeiros. E o mais importante, as máquinas ainda não eram confiáveis. O TBM era mais rápido que o método de perfuração e explosão, enquanto estava funcionando, porém ao quebrar, poderia ter dias à espera do voo de Robbins ou algum outro engenheiro que o consertaria. Ou talvez seria necessário desmontá-lo e puxá-lo para fora do túnel para fazer os reparos. Ou até mesmo, se encontrasse um tipo de solo para o qual não foi dimensionado, poderia se partir em pedaços, onde o TBM deveria ser abandonado por completo, e o túnel teria de ser totalmente reconstruído para acomodar uma tripulação que faria o trabalho de escavação. Tudo isso seria muito desastroso para um contrato e estaria sob uma cláusula de penalidade grave.

Em 1958, James Robbins morreu em um acidente de avião. Este foi o pior momento para a luta de uma nova tecnologia. Os contratantes podiam não saber nada sobre TBMs, mas conheciam, gostavam e confiavam em Robbins, que era habilidoso, engenhoso e sabia do negócio. Quando ele morreu, os contratantes não tinham a quem recorrer. Richard J. Robbins assumiu a empresa, mas ele era muito jovem, recém saído de Michigan Tech e era um rosto desconhecido em meio a uma comunidade em que a experiência era valorizada acima de tudo.

Com esse acontecimento, a empresa e Robbins passou por um período escasso de projetos, até que a sorte voltou bater à porta da mesma e muitos projetos foram contratados devido à expansão econômica que os Estados Unidos estavam passando, como por exemplo, o Túnel Poatina, Túnel Headrace, Túnel Tailrace, Túnel Rhyndaston e Túnel Mersey. Tais projetos obtiveram resultados muito satisfatórios, o que contribuiu para a disseminação do método.



Figura 7: Máquina utilizada no Túnel Poatina



Figura 8: Túnel Rhyndaston

Desde o seu início em 1953, a Robbins Company foi pioneira em inúmeras inovações, (incluindo o disco de corte – hoje, padrão mundial) e galgando um número impressionante de máquinas para dar créditos ao seu caminho. Mais que isso, eles provaram ao mundo e à indústria tuneladora, que



o TBM é uma ferramenta viável em condições de solo de rochas duras ou não, dependendo da qualidade do solo, comprimento do túnel, e diâmetro.

3.2. Vantagens e desvantagens do método TBM em relação a outros métodos subterrâneos

Como citado na introdução, o método TBM apresenta uma série de vantagens em relação ao método de vala a céu aberto. Além dessas vantagens, o método também apresenta diversos pontos positivos em relação a outros métodos subterrâneos (como o NATM por exemplo), dentre eles:

- Avanço rápido;
- Operação contínua;
- Uniformidade da abertura;
- Paredes lisas apresentando, portanto mínima resistência ao fluxo de ar;
- Melhores condições de segurança;
- Reduz o dano de rocha e, portanto a necessidade de escoramento o que o torna adequado a áreas urbanas;
- Reduz a exposição ao fluxo de água;
- Reduz a exposição ao metano;
- Possibilita abrir túnel longo onde janelas de ventilação são proibidas por motivos de meio ambiente;

Entretanto, algumas desvantagens também são observadas, tais como:

- Alto Custo;
- Difícil transporte;
- Não apresenta flexibilidade de trabalho em diversas frentes;
- Raios de curvatura limitados ($> 60m$);
- Montagem cara e demorada;
- Necessidade de mão de obra especializada (escassa no Brasil);
- Requer significativa infra-estrutura.



3.3. Variações do Método

O método TBM possui uma série de variações que são função principalmente do tipo de material a ser escavado e das características do túnel. Os equipamentos para escavação de túneis em rochas de alta resistência são máquinas cujo avanço é obtido pela aplicação de empuxos longitudinais (a reação é aplicada na rocha através de sapatas extensíveis, os “grippers”), combinados a esforços rotativos na cabeça de corte. Em geral são equipamentos de frente aberta, não protegidos por anéis de revestimento, projetados para escavar seções plenas com área superior a 100 m², em rochas com elevadas resistências à compressão uniaxial ^[2].

Os equipamentos para perfuração de rochas brandas e/ou solos, denominados de couraças ou “Shields” são máquinas que incorporam um sistema de suporte integral do túnel, constituído por revestimentos contínuos, o que permite trabalhos em terrenos altamente instáveis. O sistema de avanço destes equipamentos é semelhante àquele utilizado para escavação de rochas duras, diferenciando-se pelo sistema de empuxo longitudinal, obtido por reação no próprio revestimento ^[2].

Como a história tem demonstrado, o método escolhido para a construção de um túnel tem um importante impacto no sucesso dos projetos. Não são apenas custos e tempo de construção que afetam, mas também a qualidade do revestimento do túnel e o custo de manutenção ^[6].

O critério de seleção para um método tunelador otimizado é determinado por:

- As condições de contorno do projeto, bem como o comprimento do túnel, tamanho da seção, acessibilidade, cronograma de construção, experiência de cliente e construtor;
- Condições geotécnicas.



A seguir, os diferentes métodos mecanizados TBM são apresentados e analisados a partir dos seguintes itens: Condições geotécnicas apropriadas, Cabeça de corte, ferramentas, empuxo e torque, Sistema de Avanço, Suporte Preliminar e Resumos das vantagens.

3.3.1. TBM de Face Aberta sem Shield ^[6] ^[9]

Condições geotécnicas apropriadas

Esse tipo de máquina é ideal para rochas duras e pouco coesivas, onde nenhum ou apenas suporte marginal é previsto.

Cabeça de corte, ferramentas, empuxo e torque

Uma característica da TBM de Face Aberta sem Shield é a rápida escavação. Um largo espaço na frente da cabeça de corte dá lugar para armazenamento de uma grande quantidade de material escavado.

São apropriados para esta máquina discos de corte de 15 a 19 polegadas de diâmetro. Para um diâmetro de 19 polegadas, pode-se aplicar até 40 toneladas de empuxo.

Sistema de Avanço

Open Face TBM usualmente tem um sistema de garras hidráulicas espalhadas por fora e transferem o empuxo para a rocha. Caso a qualidade da rocha não permita o uso eficiente desse sistema, um sistema auxiliar é direcionado para os segmentos pré-fabricados e permitem um aumento limitado da capacidade de avanço.



Força de empuxo: 23.000 KN

Torque da cabeça de corte: 5.000 KN.m

Suporte preliminar

Se um suporte preliminar é requisitado, parafusos, malhas de arame e reforços de aço são instalados na área da máquina TBM. Locais de rochas frágeis podem ser suportados por placas de ferro de Bernold, que serão posteriormente cobertas por concreto atrás da máquina, dando proteção ao equipamento back-up (onde estão os componentes hidráulicos e elétricos).

Resumo das vantagens

Depende muito das condições geotécnicas, das ferramentas disponíveis, do TBM e da logística. Os fatores geotécnicos são a dureza da rocha, direção e extensão das fraturas, coesão da rocha fraturada, conteúdo de minerais abrasivos na rocha e infiltração de água. Os outros fatores dizem respeito à experiência do corpo de profissionais e da competência técnica dos envolvidos, além do cronograma de construção e custos.



Figura 9: TBM de face aberta sem Shield

3.3.2. TBM de Face Aberta com Shield ^{[6] [9]}

Condições geotécnicas apropriadas

TBMs de Face Aberta com Shield são desenhados para condições de rochas amenas a moderadas, geralmente dispoendo de uma superfície instável. A rocha deve ter uma superfície fraturada e com freqüentes articulações.

Cabeça de corte, ferramentas, empuxo e torque

Por causa da superfície da rocha fraturada a face do TBM deve estar localmente instável. Um corpo reto de cabeça de corte deve prover suporte mecânico à frente da máquina.

Força de empuxo do TBM: 112.000 KN

Torque da cabeça de corte: 5.000 KN.m



Sistema de avanço

O shield deve suportar as paredes expostas imediatamente atrás da cabeça de corte. Isso facilita a instalação de um suporte preliminar exigido coberto pela parte traseira do shield, onde há espaço para equipamentos mecânicos.

Há dois tipos usuais de Shields: simples e telescópicos (ou duplos). Os Shields simples são relativamente curtos e o TBM é puxado para frente contra os segmentos de revestimentos pré-fabricados instalados. Já os Shields duplos são divididos em duas partes: o shield frontal (onde há a cabeça de corte) e a seção de garras, que são conectadas por uma junta telescópica.

Suporte preliminar

Se condições de rocha instáveis são encontradas, é uma boa oportunidade de instalar o suporte preliminar sob a parte traseira do shield. O relativo alto investimento para o uso do segmento de revestimento é pago com elevadas taxas de avanço.

Resumo das vantagens

Nas TBMs de Face Aberta com Shield , as condições geotécnicas não possuem uma influencia muito forte nas taxas de avanço como nas TBM de Face Aberta sem Shield. Máquinas TBM de 5 metros de diâmetro já atingiram médias de 1.000 metros por mês num total de 20 kilometros.



Figura 10: TBM de face aberta com “shield”

3.3.3. Earth Pressure Balanced – TBM (EPB-TBM) [6] [9]

Condições geotécnicas apropriadas

As máquinas do tipo EPB são usadas em condições geotécnicas gerais, onde a face não é estável. A falta de estabilidade da face é compensada com a pressurização do suporte da face, chamada de “working chamber” na parte da frente do TBM.

Em frente à “working chamber”, a cabeça de corte rotativa corta o solo, que é pressionada contra a face instável. Então, o solo escavado constitui o suporte para prevenir descolamentos.

Em argilas moles, as propriedades naturais permitem a formação de uma pasta agindo como um líquido de alta viscosidade, capaz de transferir a



pressão para a face da máquina. Em outros solos, o material escavado tem que ser acondicionado de forma a dar suporte para a face.

Com a adição de materiais biodegradáveis, o material escavado pode ser transformado em uma pasta para obter a pressão desejada. Isso é muito usado em solos de coesão variável. Portanto, o EPB - TBM pode ser usado desde argila mole até granito duro.

Cabeça de corte, ferramentas, empuxo e torque

A cabeça de corte é desenhada para facilitar o fluxo do material escavado para a “working chamber” e para transmitir a pressão do material escavado para a face.

A cabeça de corte rotativa é usualmente feita com a combinação de raspadores com os discos de corte. Os discos de corte se localizam 3 centímetros à frente dos raspadores para triturar as partes duras do solo antes dos raspadores entrarem em contato com as partes que não poderiam ser raspadas.

O empuxo deve ser maior que a reação da escavação (o suporte da pressão e o atrito do shield), para gerar uma força de avanço.

Para um EPB de 9 metros de diâmetro:

Força de empuxo do TBM: 70.00 KN

Torque da cabeça de corte: 12.900 KN.m



Sistema de avanço

Como as máquinas EPB possuem Shields e por operarem em solos instáveis, o sistema de garras não podem ser utilizados para transmitir forças para o solo. Portanto, são utilizados macacos hidráulicos para reduzir o valor da pressão da “working chamber” à pressão atmosférica e permitir o avanço da máquina.

Suporte preliminar

Segmentos de revestimentos são instalados sob proteção do shield. O revestimento é à prova d'água, promovendo uma impermeabilização do túnel.

Resumo das vantagens

As vantagens são influenciadas pela seqüência de escavação e de instalação do revestimento. A operação limite do EPB é de 300 a 400 metros por mês, dependendo das condições de solo. As variações de propriedade do solo requerem freqüentemente adaptações da face para prevenir um aumento do risco de instabilidade.



Figura 11: EPB - TBM

3.3.4. Slurry-TBM ^{[6] [9]}

Condições geotécnicas apropriadas

As condições de operação do Slurry-TBM são as mesmas relatadas para o EPB-TBM. No entanto, em solos com alto conteúdo de partículas finas ($<0,002$ mm) o processo de separação do material escavado é relativamente mais caro. A lama formada permite estabilizar a face e também e também serve como o próprio meio de bombeamento para fora do material escavado.

Em solos mais grosseiros, a máquina pode trabalhar com mais segurança que um EPB-TBM, por causa da menor viscosidade da lama em relação à pasta de terra formada.



Cabeça de corte, ferramentas, empuxo e torque

A cabeça de corte do Slurry-TBM tem as mesmas características das apresentadas no EPB-TBM. Em solos heterogêneos a cabeça de corte é composta com discos de corte e de raspadores. Em solos aluvionares, somente raspadores são geralmente suficientes.

As forças de empuxo são resultantes da reação de escavação (da pressão suporte e do atrito da máquina).

O torque é relativamente baixo, por causa da baixa viscosidade da lama dentro da “working chamber”.

Para um Slurry-TBM de 9 metros de diâmetro:

Força de empuxo do TBM: 70.00 KN

Torque da cabeça de corte: 4.900 KN.m

Sistema de Avanço

Os Slurry-TBM são de shield simples e geralmente divididos em duas seções que são ligadas por articulações para facilitar curvas mais fechadas.

A força de avanço é transferida para a instalação dos segmentos de revestimento. O sistema de garras não é normalmente usado nesse tipo de máquina devido às características do solo em que é usado.

O material escavado entra em aberturas na cabeça de corte e vai para a “working chamber”, onde é preenchido com lama bentonítica. A mistura do material escavado é bombeado para um local de separação na superfície por bombas centrífugas. Na separação do material, aproximadamente 10% do volume transportado será separado da lama por câmaras de vibração. Após a



separação, a lama é bombeada novamente para a “working chamber” para estabilizar a face.

Suporte preliminar

Consiste em segmentos de revestimento que servem de barreira contra a infiltração de água, ajustados por juntas.

Resumo das vantagens

São as mesmas que as citadas para o EPB-TBM. Devido à maior segurança do suporte da face e da maior eficiência com um solo de menor viscosidade, o risco de condições instáveis é menor do que quando se usa um EPB-TBM. Além disso, em solos heterogêneos, a Slurry-TBM é mais recomendada.



Figura 12: Slurry TBM



3.3.5. TBM Conversível (“Mixshield”) [6] [9]

Estas máquinas são construídas para projetos especiais e são capazes de mudar o modo de suporte da face de escavação, daí o nome “conversível”. Para solos coesivos, o modo EPB é mais econômico que o modo Slurry devido ao custo de separação de material envolvido neste último.

Já em solos não coesivos, o modo Slurry apresenta taxas de avanço maiores e é mais seguro de operar. Além disso, se o solo apresentar rochas fraturadas o modo Slurry também se torna aconselhável devido à dificuldade de se atingir um suporte médio aceitável no modo EPB.

Assim, a escolha de TBM conversível é justificada quando o solo apresenta diferentes condições ao longo do traçado do túnel e a utilização das duas técnicas acaba por otimizar todo o processo.



Figura 13: MixShield TBM



3.3.6. Resumo dos critérios de seleção

Os critérios de seleção para o tipo de EPB apropriado se resumem no seguinte quadro ^[6]:

Criteria for Selection of TBM									
	Ground Strength		Requirement on Tunnelling Method			Ground Structure			
	Uniaxial Compr. MPa	Cohesion Cu KN/m ²	Face Support	Shield	Lining Install.	Jointing		Grain size	
						RQD	Distance	<0,002mm	<0,06mm
Rock	250					100 - 90%	> 2 m		
	250 - 100				behind TBM	90 - 75%	2,0 - 0,6 m		
	100 - 50			possible	behind TBM	75 - 50%	0,6 - 0,2 m		
	50 - 25		Possible mechanical	probably required	in TBM area	50 - 25%	0,2 - 0,06 m		
	25 - 5		mechanical	probably required	under shield	< 25%	< 0,06 m		
	5 - 1		mechanical poss. EPB	required	under shield	< 25%	< 0,06 m		
Soil	< 1	> 30	mechanical poss. EPB	required	under shield	< 25%	< 0,06 m	very	fine
		30 - 10	mechanical or EPB	required	under shield			> 30%	
		10 - 5	EPB or Slurry	required	under shield			> 20%	> 60%
		5 - 1	EPB or Slurry	required	under shield			> 10%	> 30%
		0	EPB or Slurry	required	under shield			< 10%	< 20%

Tabela 3: Critério de seleção de TBMs



3.4. Estudos de Caso ^[4] [8]

A seguir, uma série de exemplos encontrados na bibliografia de utilização de máquinas TBM para a escavação de túneis em diversos locais do mundo. Nota-se que o Brasil ainda está muito defasado em relação à essa tecnologia, que vem ganhando cada vez mais espaço devido à sua alta competitividade entre outros métodos.

3.4.2. Paris

O túnel está localizado no oeste de Paris, na rodovia A86 e tem um comprimento total de 10,12 km com dois decks. O Mixshield conversível tem um diâmetro de 11,57 m e foi projetado para funcionar nos modos Slurry e EPB de acordo com as características geotécnicas encontradas na extensão do traçado.

Além do grande diâmetro da máquina utilizada no túnel Socatop, nomeado assim devido à joint venture entre Vinci, Eiffage e Cola, é importante salientar o uso de um perfil circular otimizado, que foi projetado como um túnel rodoviário de dois pavimentos (Figura 14).

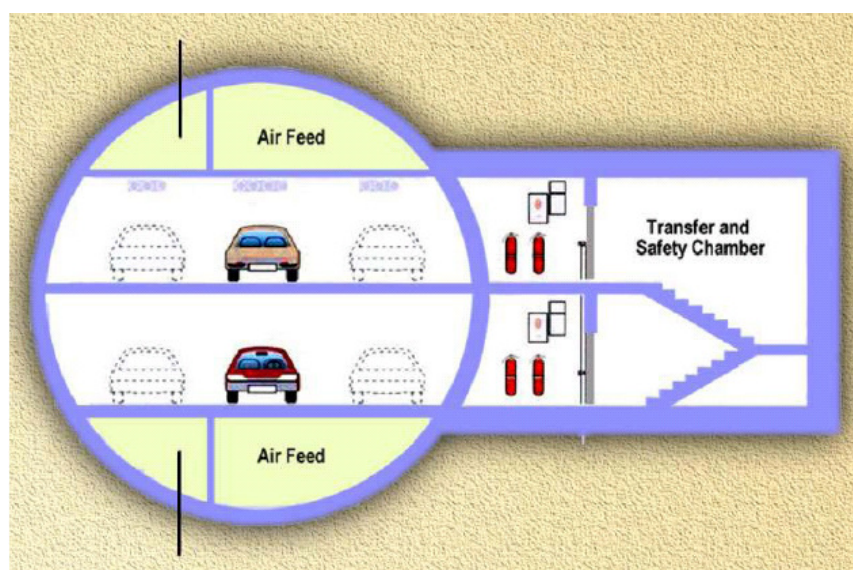


Figura 14: Uso otimizado da seção circular com dois “decks”



Com os dutos adicionais de ventilação e passagens de segurança, toda a seção transversal do túnel é utilizada economicamente. O conceito sofisticado de segurança dessa máquina salvou a vida de muitos operários da TBM durante um incêndio ocorrido durante as escavações.

Cada pavimento tem altura de 2,55m e só pode ser utilizado por carros em um único sentido. Assim, o trânsito é segregado e a probabilidade de acidentes diminui. Toda a extensão do túnel é monitorada eletronicamente, o que permite que carros quebrados sejam localizados rapidamente.

As condições geológicas do local são típicas de Paris, que vão desde solo coeso e granular até rochas duras. À parte de argila plástica, que é apropriada para a tecnologia EPB, há a ocorrência de areia corrente (areia Fontainbleu), que é conhecida por ser crítica para a estabilidade da face. Ademais, são encontradas diferentes camadas de calcário.

A máquina tuneladora de frente fechada é capaz de escavar os solos heterogêneos já citados com apenas um equipamento. Este conceito de máquina é uma combinação de Slurry e EPB e possui dois tipos de transporte de resíduos: rosca sem fim em adição aos dutos para manuseio de lama. A conversão entre os métodos EPB e Slurry pode ser feita em um turno de 8 horas.

A rosca sem fim é ajustável e pode ser rapidamente levada a uma parede submersa com uma flange de conexão. Assim, a câmara traseira é separada completamente da câmara pressurizada da face e pode ser usada para trabalhos de manutenção. Para o modo slurry, o parafuso é retraído e completamente removido. O rompedor de rocha é movido para baixo e a máquina está então pronta para a operação slurry na areia Fontainbleu. Este é um conceito inovador de máquina, que se mostrou muito eficiente neste projeto. Figura 1: Método da Vala a Céu Aberto com escoramento metálico (ver figuras 15 e 16).

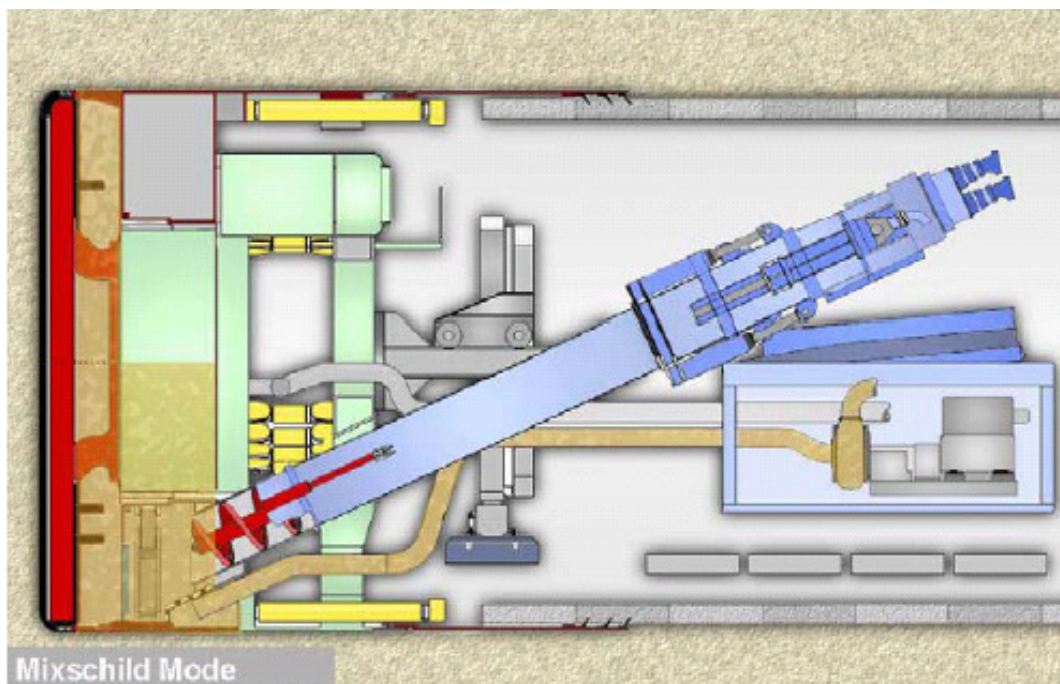


Figura 15: Mixshield Paris/Socatop – Modo Slurry

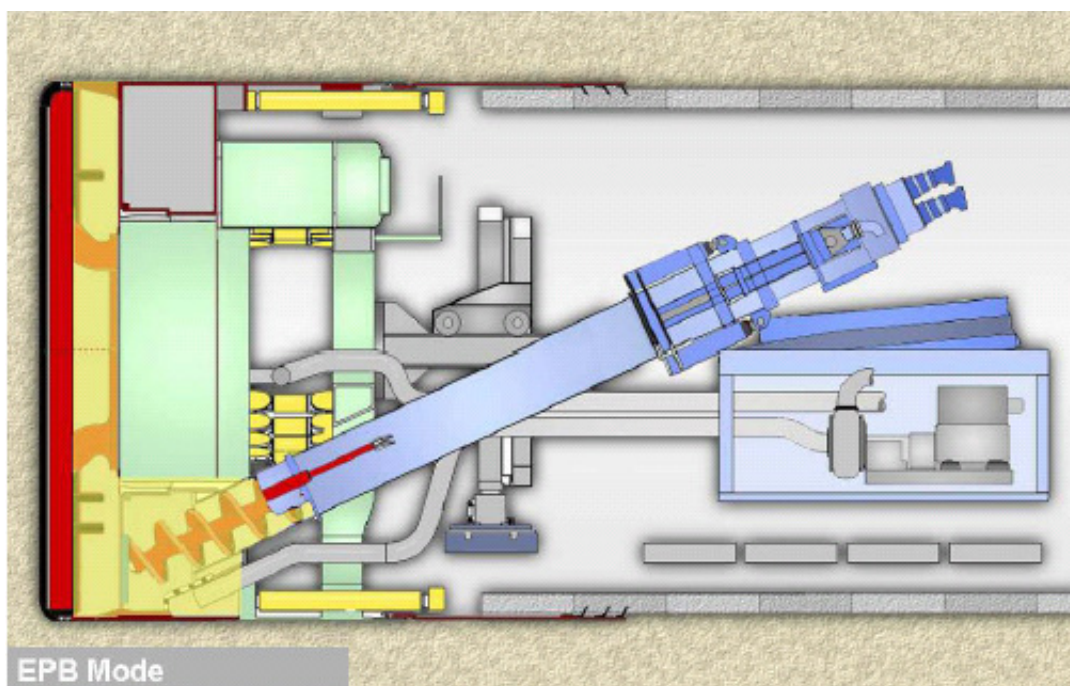


Figura 16: Mixshield Paris/Socatop – Modo EPB

A cabeça de corte foi projetada para condições geológicas mistas com solo mole e rocha dura. Se necessário, os discos de corte poderiam ser removidos nos trechos longos para obtenção de um melhor fluxo de material.



No entanto, a aplicação de Mixshield em argila plástica resultou em má performance de escavação, uma vez que o solo em combinação com a bentonita causou entupimento na cabeça de corte e o tempo para limpeza reduziu a eficiência do processo. No entanto, essa perda de tempo poderia ter sido resolvida com a transição para o modo EPB.

O torque instalado do macaco hidráulico chegou a 3500 KN.M com uma capacidade de impulso instalada de quase 150000 KN. O TBM pesa 1400 toneladas com cerca de 200m de extensão.

3.4.3. Singapura

A ilha-cidade de Singapura é sempre um bom exemplo de superlativos quando se refere a crescimento econômico, que está ligado ao trabalho de construção subterrânea. Tanto para transporte quanto para sistema de esgoto, Singapura planeja uma série de túneis sofisticados para o futuro.

As autoridades de transporte construíram a Linha Marina, um novo sistema rápido de trânsito para a parte sul de Singapura. A fase inicial possui 5 km e seis estações subterrâneas.

Além disso, haverá a nova linha Circle, totalmente automatizada, que ligará todas as outras linhas que vão em direção oposta ao centro da cidade. A fase inicial terá 5,2 km, planejados para serem inaugurados em 2010 e terão uma expansão para 33 km com 29 estações.

Até agora 11 TBMs (com origem de Herrenknecht) de diâmetro 6,6 m estão planejados para a construção dessas duas linhas de metrô, onde 9 são do modo EPB e 2 são Mixshield com pressão máxima de 4,5 bar. Desses 11, 6 máquinas já estão em funcionamento como mostra a figura 17.



Figura 17: Máquinas da HerrenKNecht em funcionamento em Singapura

Cada parte (Kranji Tunnel e Queensway Tunnel) está localizada em solos de grande complexidade. De acordo com o perfil geológico, o granito Bukit Timah tem uma força compressiva uniaxial de até 190 MPa e pode perder estabilidade dependendo de sua composição. A formação de Jurong consiste em argilas de diversos tipos, lama e arenito intercalados assim como conglomerados. Além disso, há rochas soltas da formação de Kallang, que consistem em argila mole e areia solta, o que pode causar grandes sedimentações. A pressão hidrostática de até 4 bars agrava as condições para a escavação dos túneis.

O sucesso dos projetos depende fortemente das condições geológicas e do maquinário a ser utilizado. Como a vida útil dos discos de corte é abaixo de 100 m³ às condições do solo, o operador da máquina deve reagir de maneira cautelosa às três condições fundamentais da face do túnel: rochas soltas, rochas duras e mistas. Isso demandou ajustes rigorosos em relação aos parâmetros de impulso, velocidade de rotação da cabeça de corte e taxa de penetração. Os dados armazenados pela máquina, em conjunto com as condições do solo, servirão de base para identificar os níveis ideais de ajuste.



Além das condições complexas do solo, outra dificuldade é o fluxo de água proveniente do mesmo, o que aumenta o desgaste das ferramentas.

A contaminação da máquina inteira pode acontecer e demanda um longo tempo de limpeza. A operação clássica de um EPB é levada à sua extrema eficiência com alta pressão da água no parafuso e alta permeabilidade do material escavado. Dessa maneira são necessárias medidas adicionais como a conexão das bombas dos pistões à área de descarte da rosca e o uso de aditivos. Após uma fase de intensos aprendizados, os projetos se mostraram eficientes, com taxas máximas de performances semanais de 210 m.

3.4.4. Porto (Portugal)

Como o caso de Singapura, em Portugal, também foram encontrados solos heterogêneos, o que trouxe uma série de desafios para a construção da nova linha de metrô. O sistema de metrô possui 70 km de extensão, dos quais 7 km são de túneis escavados abaixo do centro da cidade, uma área declarada herança cultural pela UNESCO. Este fato complicou ainda mais as condições para as escavações.

Os edifícios históricos de porto indicam as dificuldades do solo, composto de uma mistura de granito muito duro e úmido, que se mostra em forma de areia argilosa, argila arenosa e cascalho arenoso. Além disso, há camadas de rochas impermeáveis. Além disso, os rios subterrâneos causavam o movimento de partículas do solo, o que afetou a estabilidade da face.

As freqüentes mudanças imprevistas do tipo de solo aliadas às condições hidrológicas, causaram um acidente e um colapso estrutural, que levaram ao uso exclusivo do modo EPB fechado. Isso foi suportado por um sistema de controle de sujeira na escavação e um sistema de controle de pressão com aditivo de bentonita automático que foi desenvolvido especialmente para Porto.



Para isso foram estabelecidos valores de pressão na câmara de trabalho do TBM, que serviram como valores de controle.

O modo EPB fechado demanda grande gasto de energia e alto desgaste dos cortadores, o que resulta em grande perda de tempo devido à manutenção necessária. Este desgaste poderia ser amenizado pela adição de espuma ou polímeros nos cortadores, no entanto, as condições do solo causavam, de tempos em tempos, acúmulo de resíduos no centro da cabeça de corte.

Experiências prévias com pedras duras foram utilizadas no projeto da cabeça de corte, como aplicação de proteção especial contra desgaste para a estrutura em aço e colocação de barras de metal duro em frente à cabeça de corte, para protegê-las contra falhas.

As experiências obtidas na construção da linha C foram utilizadas na linha S e surtiram efeito, mostrando melhoria na performance da escavação. As duas linhas foram bem sucedidas, apresentando taxa máxima semanal de 80m.



Figura 18: TBM tipo EPB utilizado em Porto

3.4.5. Bozberg - Switzerland

A Suíça é um exemplo de sucesso na aplicação de TBMs com shield de grandes diâmetros em rochas de alta resistência. Até cerca de 25 anos atrás, mais de 15 grandes TBMs (maiores de 11m) já haviam sido utilizadas e atingiram a performance semanal de taxas entre 100 e 190 m no Molasse suíço.

O primeiro TBM com shield foi utilizado no início da década de 80 no Gubristtunnel, sendo que o Bozberg tunnel teve início em 1989. O Bozberg tunnel é um “túnel gêmeo” de 3,7 km projetado para ter duas pistas de tráfego em cada direção. A cabeça de corte de 11,87m de diâmetro era naquela época uma das maiores já construídas e era equipada com 73 discos de corte de 17 polegadas de diâmetro.



A cabeça de corte hidráulica contava com uma energia de 3200 kW que conferia um torque de 7000 KN.m. A mesma tinha uma frequência de até 4 voltas por minuto e era propelida por 40 cilindros hidráulicos com um impulso combinado de 1800 tons.

O comprimento total do TBM e o trem backup era de 165m e seu peso total era de 1930 toneladas. Um anel de pressão circular atrás dos cilindros de propulsão distribuía o impulso pelo segmento completo do anel, reduzindo assim a danificação da linha. Este sistema evoluiu para o típico sistema Suíço de sucesso. A remoção de resíduos era feita por uma correia transportadora para um bunker na máquina e então pelo caminhão Kiruna para o aterro. Os turnos de 9h atingiram boas performances de no máximo 385m por mês.

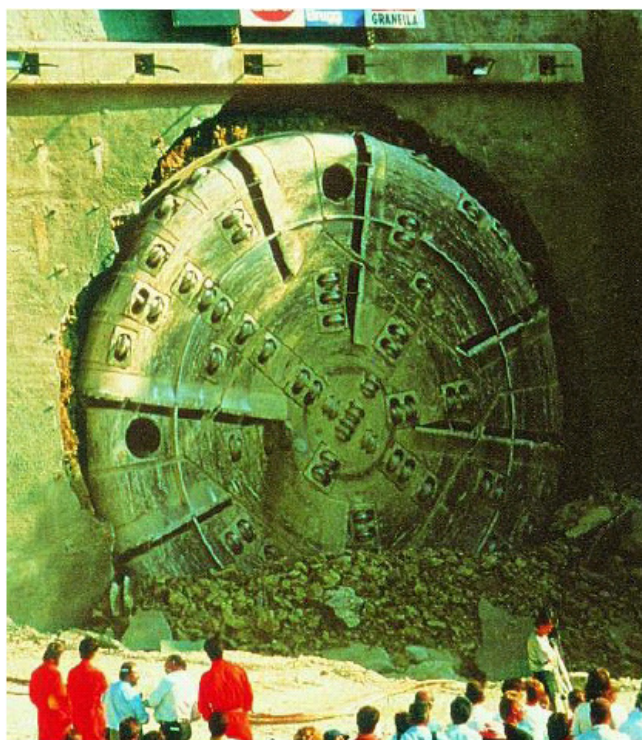


Figura 19: Máquina utilizada no túnel de Bozberg



3.4.6. St Gotthard & Lotschberg

No campo de tunelamento mecanizado em rocha dura, os túneis St Gotthard e Lotschberg devem ser ressaltados pois são dois projetos do século que cruzam os alpes suíços. Os desejos de inovação dos suíços tornaram possível que se construísse um grupo de TBMs inteligentes assim como sites logísticos altamente desenvolvidos. O conceito do tunelamento mecanizado foi desenhado de modo a oferecer o maior espaço e segurança possíveis para os trabalhadores e para que a máquina pudesse obter altas performances na construção dos túneis.

A chamada zona “L1” do TBM (distância entre a cabeça de corte e a área dos “grippers”) é o ponto chave deste equipamento. O sistema de “grippers” descrito aqui proporciona uma área “L1” 3-4 vezes maior do que o sistema de pinça dupla. Este espaço obtido possibilita diversas operações de suporte como perfuração de rochas, montagem de painéis em rede (pela primeira vez de maneira automática) ou suportes de aço e aplicação de jato de concreto que são carregados simultaneamente, o que aumenta a eficiência na construção dos túneis gêmeos de comprimento de 34km (Lotschberg) e 56km (St. Gotthard).

As plataformas de trabalho são protegidas externamente para resguardar os trabalhadores de rochas soltas. O equipamento de perfuração pode ser estacionado abaixo da viga principal de modo a estar protegido do concreto jateado. Um recipiente especial foi projetado para coletar os resíduos desse concreto. Essas medidas auxiliam significativamente a melhorar as condições de trabalho dos operários das máquinas.

Temperaturas de cerca de 180° C na face de trabalho demandam alta performance dos discos de corte e da cabeça de corte. Foram realizados estudos sobre a deformação da cabeça de corte e melhorias no alojamento dos discos e pode-se dizer que a tecnologia empregada e seu manuseio durante o



trabalho são os fatores chave da performance nas rochas extremamente abrasivas dos Alpes.

Os dois projetos diferem basicamente nas especificações da construção da casca do túnel, que no caso do túnel Gotthard levou a um sofisticado conceito de backup. O tunelamento mecanizado promove condições técnicas diversas e ideais para os requisitos desse túnel.

A face completa do túnel Loetschberg obteve uma taxa máxima de 210m por semana. O túnel Gotthard teve taxa semanal também satisfatória de 200m.



Figura 20: Máquina utilizada no túnel de Loetschberg - Suíça



3.4.7. Madri (Espanha)

A maior máquina EPB, com um diâmetro de 15,16 metros, foi construída para o projeto M30 na Espanha. A auto-estrada M30, o anel rodoviário interior da cidade de Madri, se localiza no centro de um projeto de reurbanização e com a construção de um túnel de 3,45 km permitirá o uso das áreas de superfície para o desenvolvimento de grandes parques verdes, áreas de caminhada e ciclovias. Apesar de retirar grandes áreas de pavimentação, muitos ambientalistas questionaram os benefícios do projeto, alegando que aumentaria o tráfego, e conseqüentemente, a poluição.

O shield de 15,16 metros de diâmetro foi considerado algo marcante para o uso de EPB. O torque máximo de 125 MNm era transferido para o solo através do conceito inovador de dividir a cabeça de corte em duas rodas de corte com sentidos contrários à da rotação da face, o que nos leva a cabeças de corte internas com cada uma 70 toneladas, 6,8 metros de diâmetro e motores axiais móveis que geram um torque máximo de 10,9 MNm. A cabeça de corte como um todo pesa 420 toneladas e é dirigida por cilindros hidráulicos.

Outro motivo para a separação da cabeça de corte é o aumento da velocidade de corte para 3 rpm e assim reduzindo o risco de entupimento causado pela redução da velocidade de cisalhamento entre o solo e a cabeça de corte na parte central da máquina.

Para a retirada de material, 3 parafusos transportadores foram projetados de modo a otimizar o transporte interno da máquina. Para a cabeça de corte central há um parafuso de 600 milímetros de diâmetro e 15,5 metros de comprimento, tendo que suportar uma pressão de 4,5 bar na sua face. Na parte inferior, há dois parafusos transportadores de 1250 milímetros de diâmetro e 18,5 metros de comprimento, que foram projetados para retirar 3100 toneladas de solo por hora, sob uma pressão máxima estimada de 6 bar.



A máquina gigante possui 19 macacos hidráulicos para promover seu empuxo, sendo que apenas 3 deles geram uma força de propulsão de 316.000 KN. Os macacos hidráulicos se apóiam no segmento distribuído no formato de 9+1 aduelas, semelhante ao sistema utilizado nas obras do metrô da Linha 4 – Amarela do metrô de São Paulo com o peso de cada um de aproximadamente 14,5 toneladas.

A câmara hiperbálica tem o volume de 200 m³, aproximadamente 400 toneladas de material a ser removido. Para gerar força a tudo isso, foi instalado 14.000 kW de força para as cabeças de corte. Foram calculados 14 geradores para a parte que engloba as cabeças de corte exterior e interior na face e mais 18 para a cabeça de corte central e para o backup.

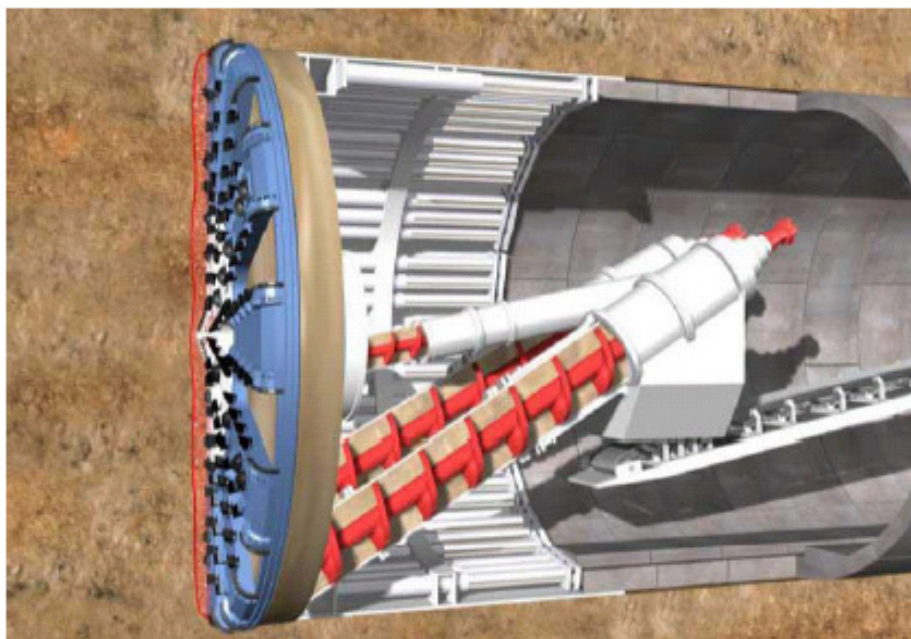


Figura 21: Esquema do EPB – TBM utilizado em Madri

Para manusear esses grandes torques, um sistema de tratamento de solo foi desenvolvido, para ajudar a plastificar o solo duro. Com isso, o solo se torna mais homogêneo para aumentar a pressão na face e reduzir o atrito, ou seja, energia para o processo de movimento. A bentonita, solo encontrado em toda a extensão do túnel, sofria um processo de pré-estresse para compensar a perda de pressão na câmara hiperbálica.



3.4.8. Metropolitana di Napoli

O metrô de Napoli (Linha 1) passa por áreas muito sensíveis, devido a localização de edifícios históricos e por isso, o maior desafio da construção do túnel foi reduzir a influencia nas fundações dos prédios. A linha é estruturada em estações de túnel de duplo duto de 4,43 metros de diâmetro e 5 subsolos.

A construção da linha foi feita com o uso de duas máquinas EPB com diâmetro externo de 6,74 metros. Um dos aspectos principais para o projeto da máquina foi a operação sob pressão, que em determinados momentos poderia chegar em 4 bar. O túnel foi escavado principalmente em formação geológica de origem vulcânica (rochas moles chamadas de "Napolitan Yellow Tuff"). Devido à permeabilidade do solo houve grande influência na estabilidade da face e no balanceamento da pressão da câmara hiperbárica.

As rodas de corte do TBM eram equipadas com ferramentas adequadas a solos moles. A instalação de discos de corte foi excluída devido à baixa tensão de cisalhamento do solo vulcânico. Ao todo, foram instalados 136 ferramentas dispostas em 16 linhas diferentes, conforme figura baixo. Na estrutura da roda de corte haviam 5 bicos de injeção de espuma.

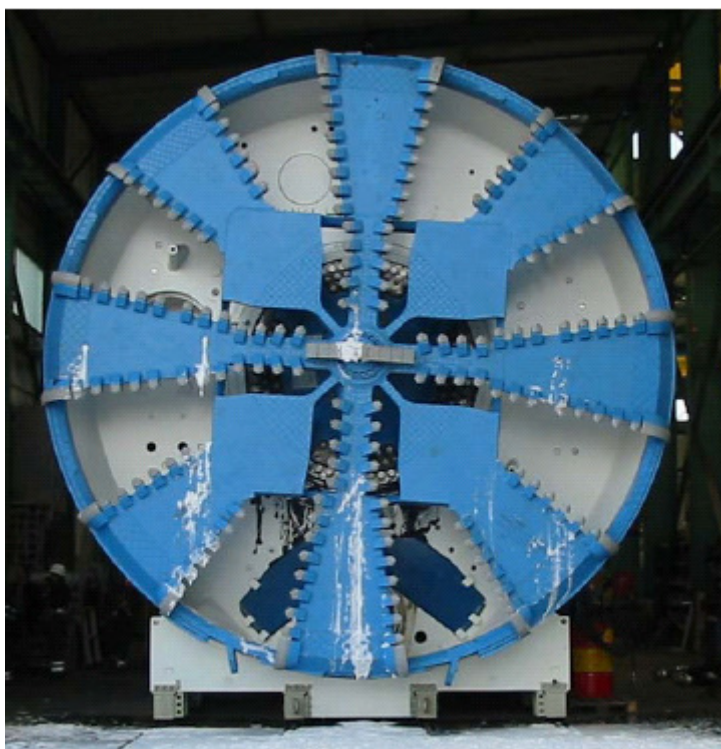


Figura 22: Máquina utilizada em Napoli

Durante a fase de projetos, foram tomados cuidados especiais para definição da proteção da roda de corte e ferramentas. E de fato, o TBM fazia 1000 metros sem qualquer necessidade de manutenção.

A roda de corte era suportada por um eixo principal hidráulico com capacidade de 6.240kNm de torque máximo e a energia instalada para a roda de corte era da ordem de 1200 kW.

O shield era movido por impulso hidráulico com uma força total de 40.945 kN e a velocidade máxima atingida foi de 80 mm/min.

O “start-up” da máquina sofreu influência de obras de infra-estrutura importantes logo a 100 metros do ponto de partida: uma estrada e uma estação de trem e durante os primeiros dois meses, a produção não ultrapassou 50m/mês, com período de trabalho de 5 dias por semana e dois turnos por dia de oito horas cada.



Após esse período, a produção se estabilizou nos seguintes valores:

- 40 minutos para a construção dos anéis
- inatividade de 25% do tempo disponível
- média de produção de 8 a 10 anéis por dia, com um pico de 14 anéis no primeiro TBM e 17 anéis no segundo
- O total avançado em um mês era de 190 a 290 metros.

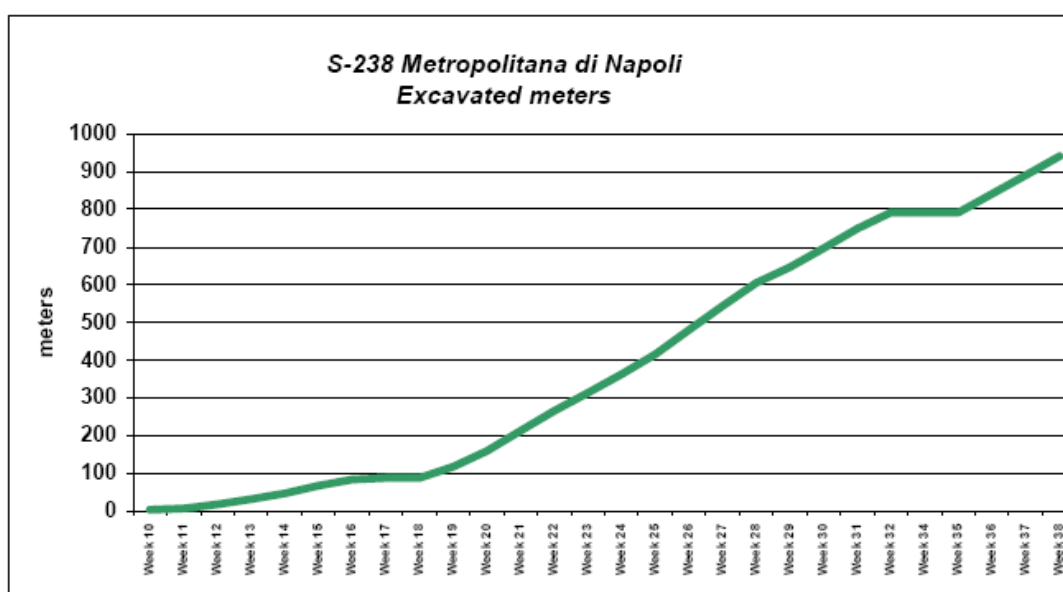


Gráfico 2: Evolução das escavações do Metrô de Napoli



4. DESMONTAGEM DA MÁQUINA TUNELADORA

A desmontagem do “shield” utilizado na escavação de 7,5 km da Linha 4 teve início no dia 13 de outubro de 2009 e término no dia 30 de novembro de 2009.

As escavações, que tiveram início no dia 02 de março de 2007 na estação Faria Lima foram finalizadas no dia 14 de agosto de 2009, quando o “shield” chegou à futura estação da Luz, onde passou por uma minuciosa manutenção de cerca de um mês e, em seguida, percorreu os últimos 470 metros até o poço João Teodoro, onde ocorreram os serviços de desmontagem.

No total foram mais de 400 mil metros cúbicos de material escavado pela máquina. Para o revestimento do túnel foram utilizados mais de 70 mil metros cúbicos de concreto nos anéis. A produtividade obtida pela máquina em toda a escavação foi de aproximadamente 60 metros por semana, já incluídas todas as manutenções. Este resultado é considerado satisfatório para as condições da máquina e do solo encontrado.

Todas as peças foram levadas para o canteiro central das obras no bairro do Jaguaré. Para o transporte foram necessárias 24 carretas para levar os componentes maiores, e 82 contêineres para os menores.



4.1. Seqüência de Atividades

A desmontagem da máquina se deu da seguinte forma:

- 1) Escavação de 470 metros de túnel, da estação da Luz até o poço João Teodoro;



Figura 23: Trecho escavado entre a estação Luz e o poço João Teodoro

- 2) Escavação de 10m de túnel em NATM para posicionar a máquina de modo a retirar a parte traseira do shield que foi dividida em 4 partes. A imagem abaixo foi obtida no momento da montagem da máquina, e mostra a parte traseira do shield que saiu primeiro na desmontagem. Nesta etapa também foi retirada a rosca sem fim que transportava o material escavado.

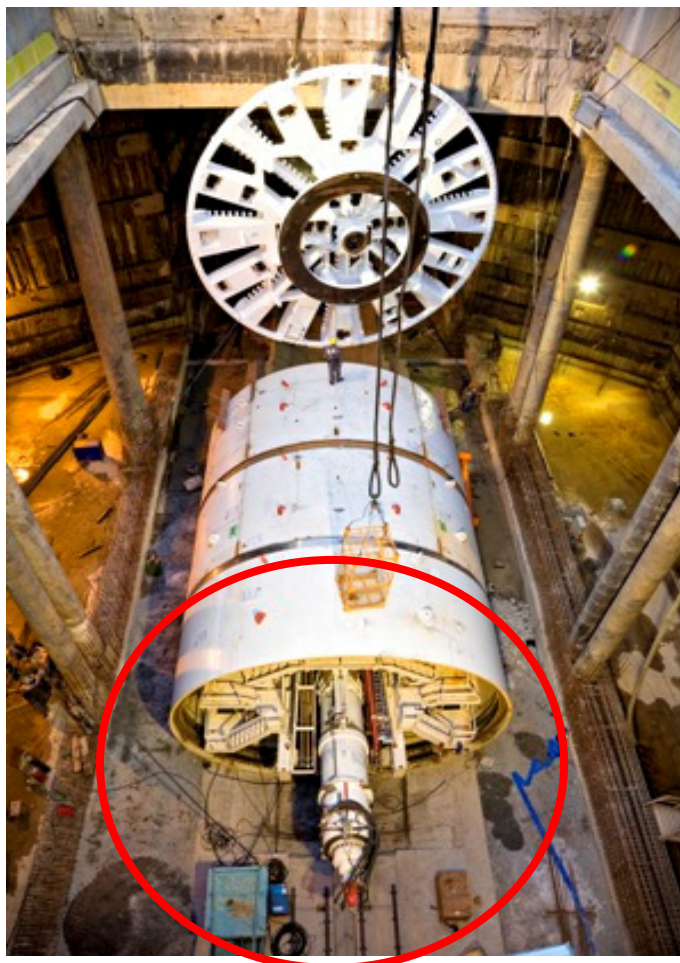


Figura 24: Parte traseira do shield que saiu primeiro na desmontagem

- 3) Reposicionamento da máquina no poço João Teodoro através de “macaqueamento” hidráulico com 50 cordoalhas instaladas em consoles construídos ao lado da máquina;
- 4) Içamento da roda de corte de aproximadamente 60 toneladas;



Figura 25: Içamento da roda de corte



Figura 26: Içamento da roda de corte



Figura 27: Posicionamento da roda de corte no canteiro do poço João Teodoro



Figura 28: Posicionamento da roda de corte no canteiro do poço João Teodoro



- 5) Desmontagem e içamento da parte central do “shied”, parte essa que continha os 15 macacos hidráulicos responsáveis pelo avanço da máquina e a câmara hiperbárica que era utilizada para a entrada na câmara de escavação para manutenções. Como na parte traseira, a peça também foi dividida em 4 partes para ser içada.



Figura 29: Içamento do primeiro quarto da parte central do “shield”

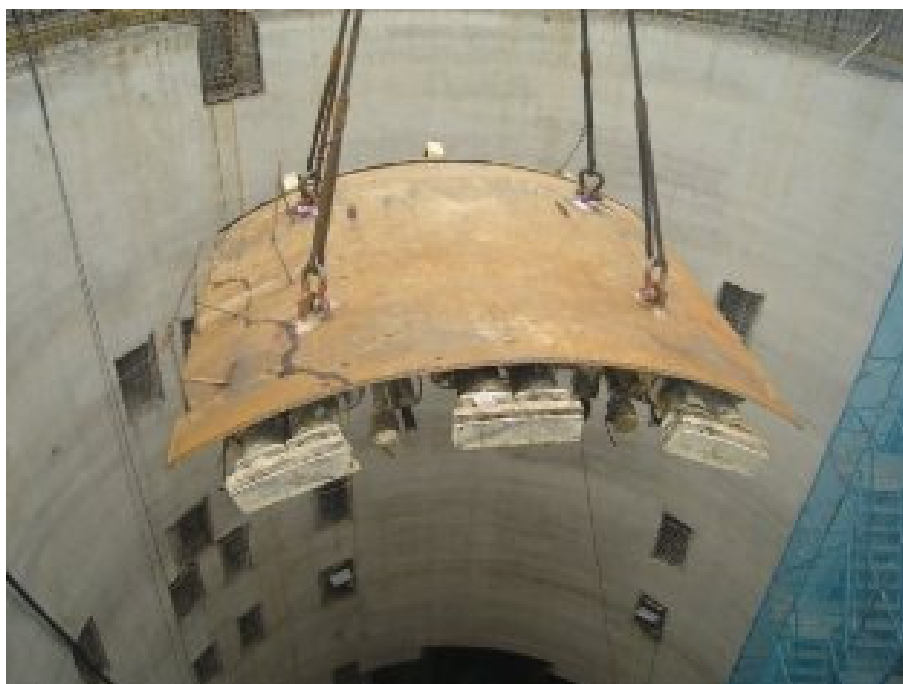


Figura 30: Içamento do primeiro quarto da parte central do “shield”



Figura 31: Içamento da câmara hiperbárica



Figura 32: Içamento da câmara hiperbárica

- 6) Desmontagem e içamento de toda a parte da frente do “shield”, também dividida em 4 partes. A peça que continha os 20 motoredutores responsáveis pela propulsão da cabeça de corte foi retirada inteira.



Figura 33: Içamento do primeiro quarto da parte frontal do “shield”



Figura 34: Içamento do primeiro quarto da parte frontal do “shield”

- 7) Desmontagem do backup em 5 etapas (carros). As peças menores puderam ser desmontadas simultaneamente à parte frontal;



Para os serviços de desmontagem, a equipe do consórcio trabalhou em dois turnos diários de 8 horas, 6 dias por semana. O primeiro turno (dia) era composto em média por 15 profissionais do consórcio, mais um técnico de segurança e um engenheiro da SELI. O segundo turno era composto por 6 profissionais do consórcio e um encarregado.

Durante as duas últimas semanas da desmontagem, a equipe foi reforçada com um engenheiro suíço da fabricante da máquina Herrenknecht que ficou responsável por garantir que a desmontagem fosse realizada corretamente e que as peças fossem armazenadas de modo a manter suas características de uso.

4.2. Equipamentos para transporte vertical das peças

Para o içamento das peças, foram utilizados dois guindastes fornecidos pela empresa “IV - Guindastes”, sendo um deles de lança telescópica sobre pneus e outro com lança treliçada sobre esteira. Abaixo as especificações técnicas dos equipamentos:

- Guindaste LIEBHERR LTM-6.1 ^[12]:

Dados técnicos:

Capacidade máxima de carga no alcance: 250 t num raio de 3 m;

Lança telescópica: 15,5 m – 72 m;

Jib treliçado: 5,4 m – 70m;

Motor do veículo / potência: Liebherr, 8 cilindros, Diesel, 450 KW;

Motor do Guindaste / potência: Liebherr, 4 cilindros, Diesel, 180 KW;

Velocidade de trânsito: 80 Km/h;

Peso Operacional: 72 t;

Contrapeso total: 97,5 t.



Figura 35: Guindaste móvel sobre pneus Liebherr LTM 1250-6.1

- Guindaste sobre esteira Manitowoc 2250 ^[13]

Dados técnicos:

Capacidade máxima de carga no alcance: 800 t num raio de 7 m;

Lança treliçada: 21 m – 140 m;

Jib treliçado: 28 m – 105 m;

Velocidade de trânsito: 1,65 Km/h;

Peso Operacional: 105 t;

Contrapeso total: 715 t.



Figura 36: Guindaste móvel sobre esteira Manitowoc 2250

4.3. Destino da Máquina

Segundo engenheiros do consórcio responsável pelas obras da Linha 4, a máquina ainda não chegou ao fim de sua vida útil e, nas condições que está no momento, pode escavar cerca de 10 Km de túnel sem a necessidade de manutenções especiais, somente as realizadas normalmente.

A empresa construtora da máquina, Herrenknecht, enviou ao Brasil um especialista para garantir que a desmontagem fosse realizada de maneira correta, entretanto, não está interessada em comprar a máquina novamente, como está sendo divulgado na mídia. Segundo a empresa, o destino da máquina depende somente da empresa Odebrecht, que comprou a máquina em 2006.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, a tecnologia TBM consiste em uma base sólida para escavações de túneis com alta performance e confiabilidade. Assim, é extremamente importante ter um alto grau de conhecimento do método (com suas variações) e das condições em que o mesmo é será utilizado.

Como foi exposto, máquinas tuneladoras estão sendo utilizadas cada vez mais em todo o mundo, entretanto, no Brasil essa tecnologia tem ainda pouca expressão no cenário de construções de obras subterrâneas. As previsões de crescimento da economia do país evidenciam a necessidade do aumento e melhoria da atual infra-estrutura disponível, o que abre espaço para uma maior disseminação do método TBM devido às diversas vantagens que o mesmo apresenta.

O trabalho de formatura, ao abordar tal método, permitiu ao grupo explorar um assunto não tratado durante a graduação, enriquecendo assim a formação dos alunos. Além disso, o acompanhamento das obras de escavação da nova linha de metrô da cidade de São Paulo (Linha 4 – Amarela), trouxe uma vivência prática no que diz respeito ao funcionamento de uma obra de tal porte. Portanto, o grupo considera que os resultados obtidos com o trabalho foram extremamente satisfatórios e atingiram os objetivos propostos pela disciplina.



6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Revista Tunnels and Tunnelling, fevereiro de 2008 – páginas 39, 40 e 41;
- [2] Azevedo, Adalberto Aurélio - A incorporação de incertezas de natureza geológica no projeto e construção de túneis urbanos;
- [3] Barbara, Stack – Handbook of Mining and Tunneling Machinery – Ed. John Wiley and Sons;
- [4] U. Rehm, M. Marchionni – Mechanised full face tunneling
- [5] S. Babendererde, E. Hoek, P.G. Marinos, A.S. Cardoso – EPB-TBM Face Support Control in the Metro do Porto Project – Portugal;
- [6] L. Babendererde – Selection criteria for mechanized tunneling method;
- [7] S. Babendererde, L. Babendererde, Cláudio Maia – Face Support – A key aspect in TBM full face driving;
- [8] E.H. Martin Herrenknecht, K. Bappler – State-of-the-art TBM technology;
- [9] Luiz Gustavo de Souza e Antunes, Alexandre Menezes Kesque de Oliveira – Principais tipos de tuneladoras (TBM's) utilizadas para escavação mecanizada de túneis e obras subterrâneas – Estudo de caso do túnel Sorenberg, Suíça;
- [10] <http://fhapgood.fastmail.fm/TBM01.html>
- [11] <http://www.madehow.com/Volume-6/Tunnel.html>



- [12] http://www.liebherr.com/at/pt/products_at.asp?menuID=106082!3666-0
- [13] <http://www.manitowoc.com>
- [14] <http://www1.folha.uol.com.br/folha/videocasts/ult10038u582620.shtml>