



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise de Construção de Túneis com Tuneladoras

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Especialidade de Geotecnia

Autor

António César de Moura Nôro

Orientadores

Prof. Doutor Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa

Prof. Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2014

“Uma sociedade só pode progredir quando os seus membros possuam uma desenvolvida educação e uma instrução essencialmente prática. (...) É necessário criar homens que pelo seu trabalho e esforço próprios se mantenham na vida com (...) dignidade; é preciso formar cidadãos úteis à Pátria”

General António Xavier Correia Barreto

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, que não o podendo fazer pessoalmente, tributo esta dissertação e agradeço o seu carinho, dedicação e longas conversas, que sem dúvida ajudaram a minha formação pessoal e académica.

À minha mãe que me criou, educou, apoia e acompanha, um especial agradecimento por toda a dedicação e sacrifício para fazer de mim, alguém sempre melhor.

À minha querida Mónica, por estar sempre presente nos momentos mais difíceis, pela ajuda, paciência e companheirismo nesta passagem por Coimbra.

Ao António e à Zizi, que acima de tudo, foram como pais para mim, apoiando-me sempre ao longo deste percurso académico, à semelhança do que sempre fizeram durante o meu crescimento.

Destacar o papel do Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto, pela orientação, disponibilidade e colaboração ao longo de todo o trabalho.

Ao Professor Doutor Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa pela orientação e pelo entusiasmo fomentado ao mostrar “como é bonita a Geotecnia”.

Um agradecimento particular a todos os Professores e Colegas da especialidade de Geotecnia, pela boa disposição e simpatia que lhes é característica. De salientar o grande apoio do Emanuel Marques na realização desta dissertação.

A todos os meus amigos pelas noites longas e pela amizade, camaradagem, incentivo e ajuda que foram necessárias ao longo destes anos. Em especial ao Carlos Proença, João Pedro e João Nunes por todos os bons momentos que passamos em Coimbra.

À minha irmã, sobrinho e cunhado pela alegria e apoio prestado.

Por fim, um agradecimento sincero, a toda a minha restante família pelo interesse e apoio ao longo deste percurso.

RESUMO

A escolha do método construtivo a empregar na construção de um túnel depende de diversos factores, os principais dos quais são as condições naturais do maciço envolvente, a geometria, os efeitos ambientais, os prazos de obra, os níveis de segurança desejados e, ainda, as condições locais, como o nível de desenvolvimento tecnológico, os equipamentos disponíveis, a experiência dos construtores, a natureza e o custo da mão-de-obra.

De entre os métodos disponíveis, aquele a que a escavação se processa com recurso a tuneladoras (TBMs, Tunnel Boring Machines) tem ganho importância crescente, particularmente em meios urbanos, uma vez que a sua utilização, entre outras vantagens, permite a possibilidade de atravessar complexas condições geológicas e hidrológicas com segurança e relativa economia.

De vários tipos são as tuneladoras existentes, não existindo máquinas de utilização universal. Na escolha da máquina devem ser levados em conta parâmetros elementares como condicionantes naturais, parâmetros físicos como apreciação global da qualidade, descontinuidades, alterabilidade, existência e química da água, parâmetros mecânicos como a dureza do solo/rocha, deformabilidade e potencial de liquefacção, parâmetros hidrológicos, parâmetros de projecto como dimensões e forma, alinhamento vertical ou horizontal, sensibilidade a assentamentos, anomalias no solo como obstáculos naturais ou artificiais e por fim outros parâmetros como a abrasividade, a propensão do solo a colar, a fricção maciço/máquina e a presença de gás.

Existindo, na bibliografia de língua portuguesa, muito pouca informação disponível sobre esta técnica de escavação mecanizada de túneis, pretende-se com este trabalho suprir tal lacuna. Para a concretização de tal objectivo, far-se-á uma revisão da bibliografia da especialidade procurando-se situar e equacionar os diversos aspectos relacionados com a técnica, designadamente os respeitantes ao princípio de funcionamento das tuneladoras, às vantagens e desvantagens do seu emprego, aos tipos de tuneladoras existentes, aos parâmetros a considerar para a escolha do tipo adequado bem como a explanação de um modelo de prognóstico de performance na escavação com tuneladoras em maciços rochosos. Será também efectuada a análise da aplicação desta técnica construtiva em Portugal, mais concretamente no Metro do Porto, onde se pretende sucintamente, caracterizar o maciço e apresentar as principais características da tuneladora escolhida para o escavar.

ABSTRACT

The choice of the construction method to employ in construction of a tunnel depends on several factors, the main of which are the natural conditions of the surrounding mass, geometry, environmental effects, work periods, the desired security levels and also local conditions such as the level of technological development, the equipment availability, the contractors experience, the nature and the hand labour cost.

Among the available methods, the one where the excavation takes place using Tunnel Boring Machines (TBMs) has gained increased importance, particularly in urban areas, since its use, among other advantages, allows for the possibility of crossing complex geological and hydrological conditions safely and with relative economy.

Of various types are the existing TBMs, in the absence of universal use machines. In choosing the machine, must be taken into account parameters such as elementary natural constraints, physical parameters such as overall assessment of quality, discontinuities, alterability, water existence and its chemistry, mechanical parameters such as the hardness of the soil/rock, deformability and liquefaction potential, hydrological parameters, design parameters such as size and shape, vertical or horizontal alignment, settlements sensibility, anomalies in the soil as natural or artificial obstacles and eventually other parameters such as abrasiveness, soil propensity to stick, the mass/machine friction and the gas presence.

Existing, in the bibliography of portuguese language, very little information available about this tunnelling mechanized excavation technique, it is intended to fill such gap with this work. For the achievement of such objective, a review of the literature of the speciality will be made seeking to situate and equate the various aspects related with the technique, namely those relating to the operation principle of TBMs, the advantages and disadvantages of its use, the TBMs existing types, the parameters to be considered when choosing the appropriate type as well as the explanation of a predictive performance model in the excavation with TBMs in rock masses. There will also be done an analysis of the application of this construction technique in Portugal, specifically in Oporto Subway, which aims to briefly characterize the mass and present the main features of the tunnelling machine chosen for the dig.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do Tema	1
1.2 Resenha Histórica	2
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS	5
2.1 Escavação a Céu Aberto (<i>Cut and Cover</i>)	5
2.1.1 Construção de Baixo para Cima	6
2.1.2 Construção de Cima para Baixo	7
2.2 Construção Sequencial – NATM.....	9
2.3 Construção Mecanizada com TBMs.....	12
2.3.1 Conceito Geral de Funcionamento	13
2.3.2 Condução da TBM	14
2.3.3 Suporte Final	14
2.3.4 Ferramentas de Escavação para Rocha.....	16
2.3.5 Ferramentas de Escavação Para Solo	18
2.3.6 Sistema de Apoio de uma Tuneladora.....	19
2.3.7 Cabine de Comandos	21
3 TUNELADORAS PARA ROCHA.....	22
3.1 Tuneladoras para Rocha Sã.....	23
3.1.1 <i>Open</i> TBM.....	23
3.1.2 <i>Reamer</i> TBM.....	28
3.2 Tuneladoras Para Rocha com Condições de Alteração Variáveis	32
3.2.1 <i>Single Shield</i> TBM	32
3.2.2 <i>Double Shield</i> TBM.....	36
4 TUNELADORAS PARA SOLO	40
4.1 Tuneladoras para Solo ou para Rocha Muito Alterada e/ou Abaixo do Nível Freático	41
4.1.1 <i>Earth Pressure Balance</i> TBM.....	41

4.1.2	<i>Slurry Shiled</i> TBM	49
4.1.3	<i>Mixshield</i> TBM.....	54
5	GEO-PARÂMETROS E SUA APLICABILIDADE À CONSTRUÇÃO MECANIZADA COM TBM'S.....	59
5.1	Geo-Parâmetros	59
5.1.1	Parâmetros do Estado de Tensão	60
5.1.2	Parâmetros Físicos	60
5.1.3	Parâmetros Mecânicos	61
5.1.4	Parâmetros Hidrogeológicos.....	62
5.1.5	Parâmetros de Constructibilidade.....	62
5.2	Aplicabilidade dos Geo-Parâmetros à Escavação Mecanizada com TBMs	62
5.3	EPBM <i>versus</i> SFM	64
5.4	Modelo de Prognóstico “ Q_{TBM} ”	65
6	ESTUDO DE CASO – A TUNELADORA DO METRO DO PORTO	69
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Tema

A construção de túneis sob zonas urbanas e em maciços complexos, bem como a conjuntura económica mundial, levaram à necessidade de concepção de equipamentos que efectuem a escavação de forma a manter a maior segurança possível, bem como tornar o processo de escavação economicamente viável tendo em conta uma relação custo-benefício.

A escavação de túneis com recurso a tuneladoras é um tema que compreende diversas áreas de conhecimento, sendo a geotecnia e a mecânica as dominantes. A escolha da máquina a utilizar e o seu dimensionamento exigem o conhecimento de ambas as áreas sendo necessário equipas multidisciplinares para o efeito. A utilização de uma TBM (*Tunnel Boring Machine*) permite melhorar as condições de trabalho dos operários, a possibilidade de atravessar complexas condições geológicas e hidrogeológicas com segurança, dentro e fora do túnel, e relativa economia.

Estas máquinas levam o processo de escavação de um túnel para uma escala industrial com consequente diminuição de custos e tempo e uma boa qualidade de produto final, ou seja, menor alteração do maciço envolvente, possibilidade de colocação de suporte imediato, revestimento pré-fabricado e paredes de escavação mais regulares.

Em termos de objectivos, esta dissertação pretende reunir, num mesmo documento e em língua portuguesa, informação sobre a escavação de túneis com recurso a tuneladoras, apresentando as diferentes técnicas e tipos de tuneladora utilizadas actualmente em todo o mundo de acordo com a sua adequabilidade à escavação de um determinado maciço. Pretende-se também apresentar quais os parâmetros dos maciços a ter em consideração para a escolha adequada e dimensionamento de uma TBM.

Procura-se também apresentar um estudo de caso, relevante em termos técnicos e operacionais, da construção de um túnel com uma TBM em território nacional.

1.2 Resenha Histórica

A antiguidade do uso do espaço subterrâneo assume-se quase tão antiga como a própria humanidade, sendo que esta utilizava cavernas e grutas naturais como abrigos, nos quais ainda nos dias de hoje existem vestígios dessa utilização. Também se encontram vestígios da escavação de túneis e poços para extracção mineral como é exemplo o caso da mina “Grimes Grave”, Inglaterra, ao longo do período Mesolítico, do Neolítico até ao início da Idade dos Metais, mais concretamente a Idade do Bronze, ou seja, entra cerca de 10000 e 1500 a.C. em que eram utilizados chifres de veados vermelhos como ferramentas de escavação.

O túnel mais antigo de que há registo foi construído entre 2180 e 2160 a.C. na Babilónia sob o rio Eufrates, tendo sido desviado o rio do seu leito original e utilizada a técnica hoje denominada de “*Cut and Cover*”. Este túnel tinha como objectivo ligar o palácio real ao templo, estando estes distanciados cerca de 1 km. Na Idade Antiga, entre 95 e 326 d.C., foi construída a maior rede de túneis dessa época. Com cerca de 940 km a ligar 60 catacumbas, alberga 6 milhões de cristãos no subsolo de Roma da época de perseguição aos cristãos (Figura 1.1).

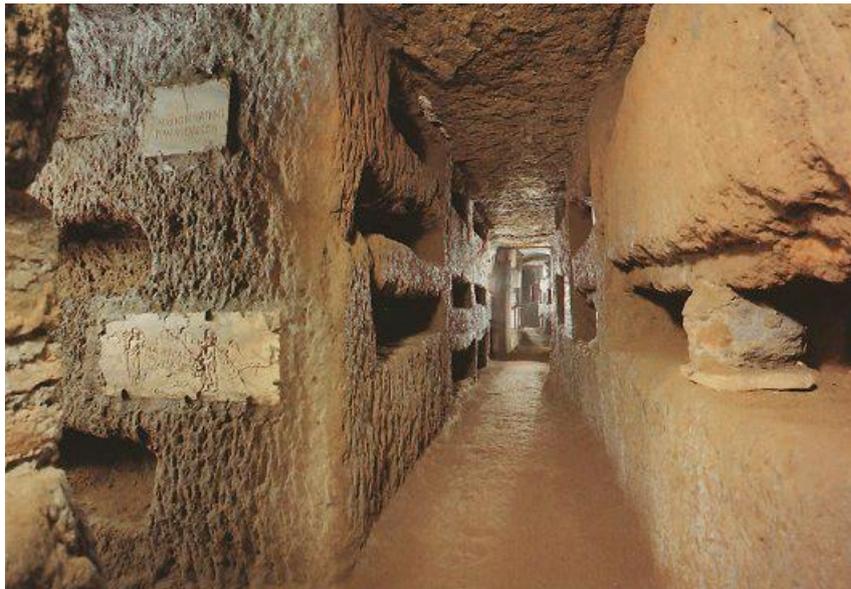


Figura 1.1 – Catacumbas de Santa Domitila, Roma, Itália (Crandell, 1985)

No decorrer da Idade Média, eram construídos túneis apenas para fins militares sendo que a utilização do subsolo diminui tendencialmente. Com a Revolução Industrial e as máquinas a vapor veio uma das épocas mais produtivas para a engenharia de túneis (Almeida e Sousa, 2005) com a necessidade de abrir caminho para a passagem dos comboios.

As tuneladoras de hoje têm origem no escudo de tunelacção desenvolvido pelo engenheiro francês Sir Marc Isambard Brunel para a escavação do túnel sob o rio Tamisa em Londres,

Reino Unido em 1825, sendo este o primeiro túnel construído sob um rio navegável – Figura 1.2. A escavação deste túnel, parada por cerca de 15 anos devido à inviabilidade da mesma por questões construtivas, foi o motivo pelo qual se tornou necessário criar métodos que fornecessem suporte imediato aquando da escavação. A primeira tuneladora de que há conhecimento, a “*Mountain Slicer*”, remonta a 1845 tendo sido desenvolvida por Henri-Joseph Maus para a perfuração do túnel ferroviário do Fréjus ligando França a Itália através dos Alpes. Mais tarde, por volta de 1950, James S. Robbins um engenheiro americano formado na então “*Michigan School of Mines*”, actualmente “*Michigan Technological University*”, foi consultado por forma a escavar através de uma formação geológica de Xisto de Pierre existente no Colorado, EUA, sendo a mais difícil de escavar de então. Robbins baseou-se no mesmo princípio da “*Mountain Slicer*” mas o que tornava a sua invenção tão eficiente, possibilitando a escavação de cerca de 50 metros em 24 horas, foi tornar a cabeça da tuneladora rotativa (Hapgood, 2004). Hoje em dia é segundo este princípio que funcionam as tuneladoras tendo estas evoluído de acordo com os avanços tecnológicos e as circunstâncias técnicas para as quais são solicitadas.

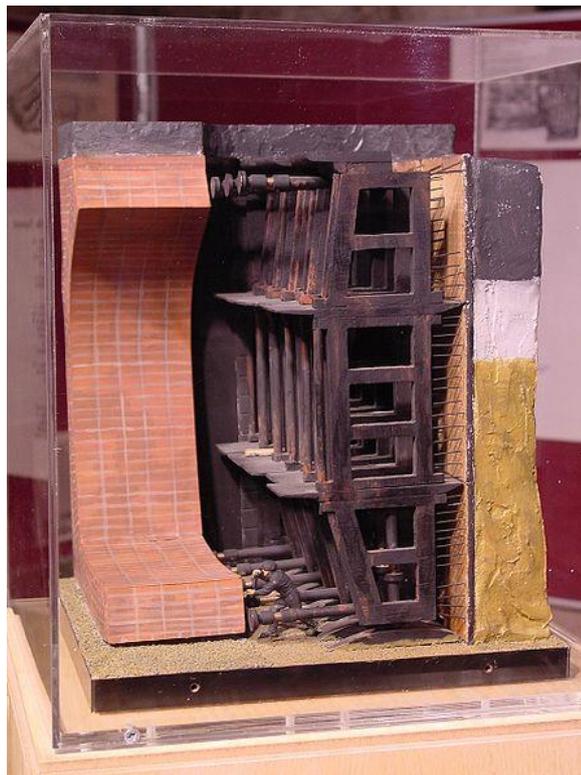


Figura 1.2 – Réplica do escudo desenvolvido por Sir Marc Brunel para o túnel sob o Tamisa em 1825, Museu Brunel, Londres, Inglaterra.

1.3 Estrutura da Dissertação

Para além do capítulo introdutório, presente capítulo, em que se explanam algumas considerações gerais e motivações que levaram à elaboração do presente documento, este é composto por mais 7 capítulos, sendo os aspectos mais relevantes destes apresentados seguidamente.

No segundo capítulo são apresentadas as técnicas de escavação de túneis correntes sendo levada mais ao pormenor, ainda que em termos gerais no que toca aos diferentes tipos de máquinas existentes, a escavação de túneis com recurso a tuneladoras.

O terceiro capítulo compreende a apresentação e explicação dos tipos de tuneladoras utilizadas para a escavação de maciços rochosos muito competentes até ligeiramente alterados.

No quarto capítulo, à semelhança do anterior, são igualmente apresentadas as TBMs passíveis de serem utilizadas na escavação de maciços terrosos ou de maciços rochosos com presença de água e/ou muito alterados.

No quinto capítulo são apresentados os parâmetros dos maciços a considerar na escolha de uma determinada TBM. Este capítulo subdivide-se em quatro subcapítulos referentes aos parâmetros geológicos e geotécnicos, a sua relação com a escavação mecanizada com tuneladoras, uma comparação genérica entre duas das tuneladoras apresentadas no capítulo anterior – mais utilizadas para a escavação de túneis em maciços terrosos mas também em maciços rochosos com presença de água e/ou muito alterados – e apresentação do modelo Q_{TBM} , desenvolvido para o prognóstico da performance da escavação de maciços rochosos com tuneladoras.

O sexto capítulo consiste na apresentação do caso da escavação do Metro do Porto, mais propriamente no tramo em que foi utilizado uma tuneladora, a “Micas”. É feita uma caracterização geral do maciço bem como da máquina utilizada e consequentes técnicas de escavação mas também as dificuldades enfrentadas ao longo do projecto.

O sétimo capítulo conclui esta dissertação em termos gerais, isto é, consiste num conjunto de considerações e ideias obtidas ao longo da execução desta dissertação.

Por fim, é apresentada uma lista das referências bibliográficas utilizadas para a realização da presente dissertação.

2 TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS

São diversas as técnicas existentes para a escavação de túneis bem como as suas variantes, que se referem à especialização de uma determinada técnica de acordo com o tipo de maciço a escavar. A evolução destas técnicas advém de um conhecimento prático obtido ao longo dos anos e que com a necessidade de abrir túneis mais longos, em maciços geologicamente mais complexos, com maior segurança e economicamente mais viáveis, foi moldando e por conseguinte fazendo progredir estas técnicas. A melhor compreensão do comportamento dos maciços, que se vem obtendo através de estudos possíveis de efectuar recorrendo à tecnologia moderna, alavancou estas técnicas até ao ponto em que hoje as conhecemos. No presente capítulo pretende-se, então, apresentar e explanar de forma sucinta as diferentes técnicas de construção de túneis incluindo a construção com TBMs, sendo neste capítulo e referente a esta última, apresentadas as operações comuns aos diversos tipos de tuneladoras.

2.1 Escavação a Céu Aberto (*Cut and Cover*)

Num túnel escavado a céu aberto (*Cut and Cover*), a estrutura final do túnel é construída dentro da zona escavada e posteriormente coberta com o material extraído da escavação. Esta técnica é normalmente utilizada quando o túnel é relativamente superficial, sendo que para profundidades entre 12 e 18 metros esta técnica é em norma mais económica do que por exemplo a técnica mineira ou escavação com recurso a uma tuneladora, podendo esta profundidade ir até cerca de 30 metros (FHWA, 2009).

É, no entanto, importante referir que esta técnica compreende uma grande interferência com a superfície, isto é, não é possível construir um túnel com esta técnica sem que haja alteração da superfície, o que em alguns casos, nomeadamente em espaços urbanos, afecta em larga escala o normal funcionamento destas zonas.

Este tipo de escavação compreende duas técnicas distintas em termos de procedimentos, “De Baixo para Cima” e “De Cima para Baixo”, sendo que cada uma delas apresenta as suas vantagens e desvantagens, devendo ser a sua escolha cuidada e de acordo com as características do projecto em si, visto que cada técnica compreende determinadas restrições como será apresentado em seguida.

2.1.1 Construção de Baixo para Cima

Nesta técnica o trecho onde se irá construir o túnel é completamente escavado, sendo o túnel posteriormente construído *in situ* e finalizada a sua construção, coberto com o material extraído. Este trecho pode ser realizado escavando em profundidade, fazendo taludes não suportados, quando existe espaço à superfície que o permita. No caso de falta de espaço à superfície ou quando existe necessidade de controlar os deslocamentos do maciço, a escavação pode ser feita com recurso a uma contenção periférica, podendo esta ser constituída por uma cortina de estacas, de paredes moldadas, de estacas prancha ou ainda de uma contenção do tipo Berlim. Na Figura 2.1 apresenta-se a sequência de escavação segundo esta técnica e uma ideia geral dos respectivos passos.

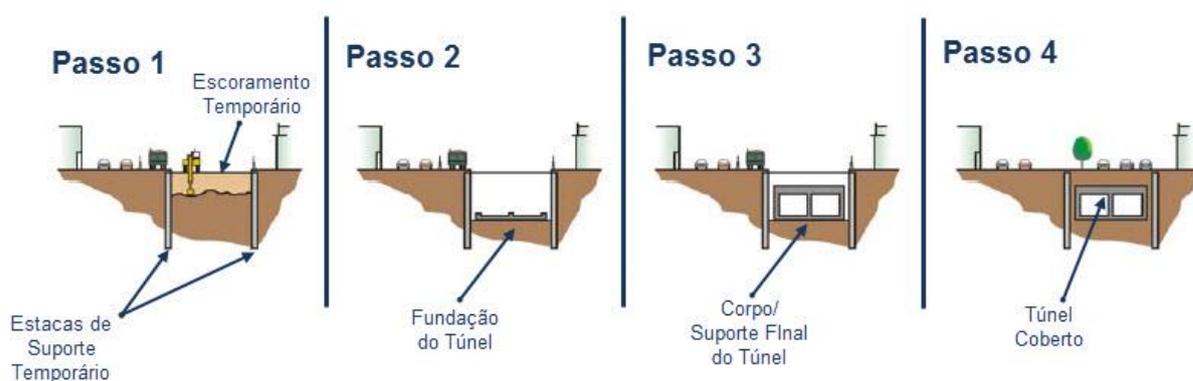


Figura 2.1 – Sequência da construção de baixo para cima a céu aberto de (adaptado de FHWA, 2009).

LEGENDA:

- Passo 1a - Instalação de suporte provisório de escavação como por exemplo estacas moldadas;
- Passo 1b - Rebaixamento do nível freático caso necessário;
- Passo 1c - Escavação e instalação de suporte às paredes provisórias, por exemplo escoras;
- Passo 2 - Construção da fundação do túnel e caso necessário execução de melhoramento do maciço de fundação;
- Passo 3 - Finalização da construção do corpo do túnel e instalação caso necessário de elementos impermeabilizantes;
- Passo 4 - Enchimento do trecho e restabelecimento da superfície.

Esta técnica tem as seguintes vantagens:

- Ser facilmente dominada pelos construtores de túneis;
- Possibilidade de aplicação de elementos impermeabilizantes no exterior do túnel;
- Possibilidade de instalação de sistemas de drenagem e/ou desvio de água no exterior do túnel;
- O interior da escavação tem acesso mais facilitado em relação à técnica de “Cima para Baixo”.

Como desvantagens esta técnica tem:

- Ser necessária uma maior área à superfície para realizar a escavação;
- Impossibilidade de restabelecimento da superfície até a finalização da construção;
- Requer suporte provisório;
- Na necessidade de rebaixamento do nível freático, este poderá provocar efeitos adversos na envolvente.

2.1.2 Construção de Cima para Baixo

Na técnica de construção a céu aberto de cima para baixo, também denominada de método invertido, as paredes do túnel são construídas em primeiro lugar com recurso por exemplo a estacas moldadas secantes, ou seja, neste método o suporte de escavação é usualmente o suporte final do túnel. De seguida é construído o topo do túnel apoiado nas paredes previamente executadas, sendo seguidamente restabelecida a utilização da superfície. A restante escavação, construção do túnel e acabamentos é efectuada sob a laje do topo do túnel permitindo assim o regresso antecipado à regularidade da superfície. À semelhança do ponto anterior, na Figura 2.2, apresenta-se a sequência de escavação desta técnica e uma ideia geral dos respectivos passos



Figura 2.2 – Sequência da construção de cima para baixo a céu aberto (adaptado de FHWA, 2009).

LEGENDA:

Passo 1a - Instalação de suporte de escavação/final, por exemplo estacas moldadas secantes;

Passo 1b - Rebaixamento do nível freático caso necessário;

Passo 2 – Escavação do topo do trecho, construção da laje do topo do túnel e caso necessário instalação de elementos impermeabilizantes no exterior da laje;

Passo 3a – Enchimento do trecho escavado e restabelecimento da superfície;

Passo 3b – Escavação do interior do túnel e execução do ancoramento das paredes do túnel;

Passo 3c – Execução da fundação do túnel e execução de melhoria do maciço de fundação caso necessário;

Passo 4 – Execução de acabamentos no interior do túnel.

Esta técnica tem as seguintes vantagens:

- Permitir o restabelecimento precoce da superfície;
- O suporte provisório é usualmente utilizado como suporte final do túnel, com respectivos acabamentos;
- As lajes estruturais actuam como escoras permitindo a redução de ancoragens nas paredes do túnel;
- Necessita de menor espaço à superfície do que a técnica anterior;
- Poderá levar a um menor tempo de construção permitindo a execução de diversas tarefas em simultâneo;
- Poderá resultar num menor custo global por possível diminuição de suporte a utilizar bem como da possível redução do tempo de execução.

As desvantagens desta técnica são as apresentadas de seguida:

- Impossibilidade de instalar elementos de impermeabilização no exterior excepto sobre a laje do topo do túnel;
- Possibilidade de infiltrações nas juntas dos elementos estruturais;
- Ligações entre lajes e paredes são de execução mais complexa;
- Risco de na execução das paredes haver desvios das mesmas para o interior do túnel;
- O acesso à escavação é limitado;
- Espaço limitado para escavação do interior do túnel e construção da laje inferior.

Na Figura 2.3 apresenta-se um exemplo de escavação a céu aberto, no caso um túnel do Metro de Lisboa.

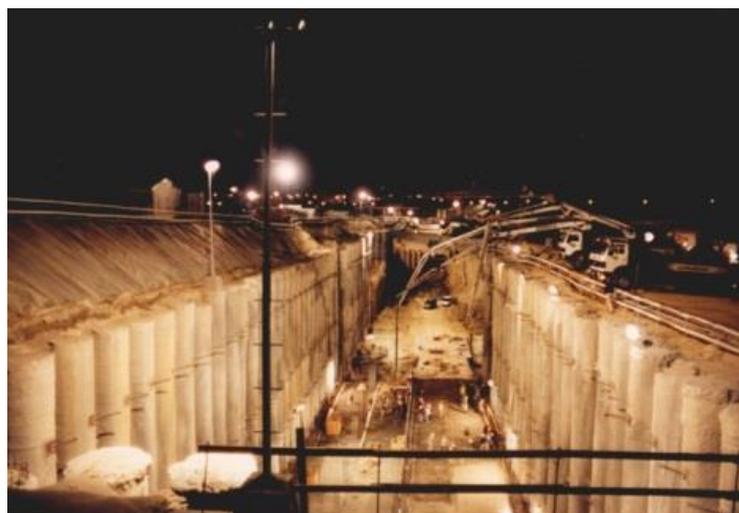


Figura o 2.3 – Escavação a céu aberto do Metro de Lisboa, Chelas, Lisboa (Unibetão S.A. @, 2013).

2.2 Construção Sequencial – NATM

O método de escavação sequencial, também conhecido como NATM (*New Austrian Tunneling Method*), “Novo Método Austríaco de Construção de Túneis”, é um conceito baseado no conhecimento do comportamento do maciço aquando da criação de uma abertura no mesmo. O intuito desta técnica é tirar partido da capacidade de auto suporte do maciço por forma a maximizar os recursos, isto é, diminuir a quantidade de suporte imediato levando assim a uma maior economia. Para isto, é de extrema importância que aquando da escavação o maciço seja o menos perturbado possível, para que assim este mantenha as suas características o mais aproximadas possível às suas características iniciais. Após cada secção escavada é necessário fornecer suporte imediato, sendo que este deve ser o mais leve e flexível possível de modo a tirar partido do efeito de arco do maciço (Almeida e Sousa, 2005). Após abertura da totalidade do túnel é então colocado o suporte final por forma a satisfazer a finalidade do túnel. Para satisfazer estas condições é deveras relevante instrumentar e observar o maciço ao longo da obra por forma a avaliar tanto o comportamento do maciço como do suporte instalado.

Esta técnica foi inicialmente desenvolvida, no início da década de 60, para escavar em rocha dura sendo que no final dessa década começou a ser utilizada em maciços terrosos em zonas urbanas. Actualmente é utilizada em ambos os tipos de maciços, em ambientes urbanos ou rurais. A capacidade do método de se adaptar a várias geometrias mantendo os níveis de segurança e economia levou a que esta seja uma das técnicas mais utilizadas em todo o mundo.

O esquema ou faseamento de escavação de um túnel com o método NATM depende maioritariamente mas não só, as condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas do maciço, da secção transversal do túnel a escavar e da possibilidade da presença de água. Assume-se então que quanto maior for a secção transversal do túnel e menor a capacidade geomecânica do maciço, mais numerosas deverão ser as fases de escavação. Na Figura 2.4 são apresentadas diferentes tipos de sequências de escavação em secção parcial para o método NATM. De notar que a sequência f), utilizada para escavação de uma das galerias da estação Baixa/Chiado do Metro de Lisboa, advém da necessidade, muito habitual, de efectuar o rebaixamento do nível freático dentro do próprio túnel invés de o fazer à superfície, exigindo assim o uso de pequenas secções de escavação, devido à redução da capacidade resistente do solo e conseqüente diminuição da capacidade de auto suporte, em virtude da presença de água (Almeida e Sousa, 2005).

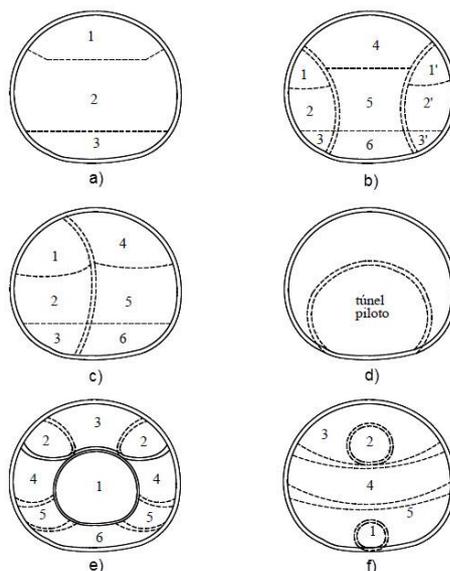


Figura 2.4 – Exemplo de sequências de escavação para o NATM (Almeida e Sousa, 2005).

No que concerne à escavação, quando o maciço a escavar é terroso, sem elevadas tensões *in situ* ou rochoso sendo a rocha relativamente branda, não muito abrasiva e com alguma fracturação é possível aplicar técnicas de escavação de ataque pontual. Estas técnicas consistem em efectuar a escavação com recurso a equipamentos preparados para o efeito, tais como as máquinas roçadoras normalmente utilizadas no caso de maciços com resistência à compressão entre 80 e 120 MPa (Figura 2.5) e as escavadoras equipadas com baldes ou martelos pneumáticos, para maciços terrosos ou maciços rochosos muito brandos. Estes equipamentos são por vezes empregues também na escavação de zonas em que a utilização de explosivos não é possível por exemplo devido a limitações de vibrações ou problemas de estabilidade.



Figura 2.5 – Máquina roçadora (Sandvick AB@, 2014).

Caso o maciço seja formado por rocha de alta resistência, com velocidades sísmicas superiores (V_p) a 2000 – 2500 m/s, torna-se então necessário recorrer à utilização de explosivos. Esta utilização acarreta com ela a necessidade de efectuar estudos de viabilidade, por forma a prever e prevenir possíveis danos que possam ocorrer a estruturas pré-existentes à superfície ou em subterrâneo na área circundante, bem como ao próprio maciço. A utilização de explosivos baseia-se na fracturação da rocha através da dispersão de gases pelas fracturas preexistentes, bem como pela onda de choque (energia), ambos gerados pela detonação, provocando assim o deslocamento de parte do maciço em relação à face livre (face de escavação) proporcionando a sua extracção. Como referido, a utilização de explosivos provoca alterações sobre o maciço remanescente, podendo ser estas alterações nefastas para o mesmo, traduzindo-se em fenómenos de sobrecavação, com consequências essencialmente económicas, e sobrefracturação, o que poderá levar, por exemplo, à diminuição da capacidade resistente do maciço e/ou aumento da permeabilidade do mesmo (Dinis da Gama, 2013).

A execução de um desmonte com explosivos prende-se essencialmente com a aplicação de um diagrama de fogo. Este é um documento que abrange questões como produção requerida por pega de fogo, carga máxima admissível por retardo, diâmetro e comprimento dos furos, número de furos e sua disposição, tipo de explosivo, carga específica, grau de fragmentação a obter entre outros. Os explosivos podem ser deflagrantes ou detonantes dividindo-se estes últimos em primários ou secundários. Para uso industrial, como a escavação de túneis, são utilizados explosivos detonantes devido à sua decomposição se dar a velocidades elevadas, entre 1500 a 8000 m/s, e produzir um grande volume de gases a temperaturas elevadas e pressões extremamente elevadas. A subdivisão destes explosivos deve-se essencialmente à sua sensibilidade ao choque sendo que os explosivos primários, como o fulminato de mercúrio, são altamente sensíveis ao choque, sendo portanto normalmente utilizados em detonadores e os explosivos secundários menos sensíveis ao choque tornando-se necessário recorrer a um primário por forma a iniciar a sua detonação. Dentro dos explosivos secundários e atendendo à sua composição química existem no mercado actualmente 3 tipos de explosivos: gelatinosos (com base em nitroglicerina), granulados (com destaque para o ANFO, mistura de nitrato de amónio com hidrocarbonetos líquidos, nomeadamente gasóleo) e emulsões (mistura complexa de pequenas partículas de nitrato de amónio com gasóleo e agentes emulsionantes).

A escolha do explosivo correcto para um dado maciço pode ser desafiante, havendo necessidade de ter em conta não só questões técnicas - em que o explosivo ideal é daquele que resulta o melhor encontro de impedâncias, isto é, a impedância do explosivo (produto da velocidade de detonação pela densidade do explosivo) mais próxima da impedância da rocha (produto da velocidade de propagação das ondas sísmicas pela densidade da rocha) - mas também questões económicas, ambientais e de segurança.

2.3 Construção Mecanizada com TBMs

A necessidade de escavar túneis através de maciços mais complexos, as elevadas restrições a nível de segurança, tanto para os trabalhadores no interior do túnel como à superfície quando as escavações se procedem sob zonas urbanas, e questões que se predem com a viabilidade do empreendimento, nomeadamente questões económicas, levou à criação de máquinas que garantissem tais requisitos, as TBMs.

As técnicas de escavação com tuneladoras são diversas, dependendo por exemplo das propriedades do maciço em que se irá proceder a escavação e se esta se encontra sob uma zona urbana ou não. Estes dois importantes factores influenciam a escolha de uma determinada técnica e por conseguinte a necessidade de concepção de uma máquina específica, visto que existem características específicas de cada uma, como o exemplo evidente da existência ou não de escudo, que fornece suporte imediato periférico, ou da sua forma de propulsão, que caracterizam cada máquina, como será exposto neste capítulo.

No presente trabalho estas técnicas irão ser divididas em dois grupos: tuneladoras para rocha e tuneladoras para solo. Cada um destes grupos subdivide-se nas várias técnicas de escavação com tuneladora, diferenciando-se no tipo de escudo utilizado, tipo de suporte frontal, forma de avanço entre outros factores intrínsecos a cada técnica. De referir que apenas serão analisadas máquinas de escavação total da frente, sendo que algumas delas poderão também ser usadas para escavação parcial. No Quadro 2.1 apresentam-se estas técnicas ordenadas pelo tipo de maciço para os quais são apropriadas, tipo de suporte imediato fornecido, categorias, tipos de escudo possíveis em cada categoria e tipo de escavação efectuada.

Quadro 2.1 – Esquematização das técnicas de escavação com tuneladora por grupo de utilização (adaptado de AFTES, 2000).

Tipo de Maciço	Tipo de Suporte	Grupo	Categoria	Tipo de Escudo	Tipo de Escavação
Rocha Dura	Nenhum	TBMs Abertas	Main-beam TBM	-	Secção Total
			Open-gripper TBM	-	Secção Total
			Kelly-driver TBM	-	Secção Total
		Tunnel Reaming Machine	-	-	Secção Total/Parcial
Rocha com Condições Variáveis	Periférico	TBMs de Escudo de Face Aberta	Gripper Shield	Escudo de Tecto	Secção Total
				Escudo de Tecto e Escudo Lateral	
				Escudo de Cabeça de Corte	
			Single Shield	Escudo Periférico	Secção Total
Double Shield	Duplo Escudo Periférico	Secção Total			
Rocha Muito Alterada ou Solo	Periférico e Frontal	TBMs de Escudo de Face Fechada	Slurry Shield (SFM)	Escudo Periférico e Frontal de Lamas	Secção Total
			Earth Pressure Balance Machine (EPBM)	Escudo Periférico e Contra Pressão Frontal de Terras	Secção Total
			Mixed Face Shield	Modo Aberto e Escudo Periférico e Contra Pressão Frontal de Terras	Secção Total
				Modo Aberto e Escudo Periférico e Frontal de Lamas	
Escudo Periférico, Contra Pressão Frontal de Terras, Frontal de Lamas e Modo Aberto					

2.3.1 Conceito Geral de Funcionamento

O conceito de funcionamento de uma tuneladora advém, como referido anteriormente, da combinação entre o escudo de tunelação desenvolvido pelo engenheiro francês Sir Marc Isambard Brunel e da cabeça de corte rotativa criada por James S. Robbins.

Este conceito baseia-se numa escavação cíclica na qual é, em norma e dependendo do tipo de máquina, fornecido suporte imediato ao maciço escavado. A cabeça de corte da máquina é empurrada contra a frente de escavação com o auxílio de macacos hidráulicos, enquanto esta roda e escava o maciço, fazendo uso das ferramentas de corte nela instaladas. Após os macacos atingirem a sua máxima extensão, a cabeça de corte pára e os macacos são retraídos para a sua posição original. Estes macacos actuam directamente no suporte final colocado imediatamente atrás da máquina, ainda dentro do escudo desta - Figura 2.6 a) -, com excepção para as máquinas que não efectuem a colocação do suporte final, em que os macacos hidráulicos de propulsão estão conectados a garras que actuam contra as paredes do maciço escavado – Figura 2.6 b). A conclusão deste processo fecha assim um ciclo de escavação também denominado por avanço de escavação.



a) Avanço com tracção no suporte final.

b) Avanço com tracção no maciço.

Figura 2.6 – Esquemas dos ciclos de avanço de TBMs com sistemas de propulsão distintos.

Torna-se assim evidente que apesar do princípio de funcionamento ser semelhante em todas as máquinas, com a sua evolução, estas apresentam diferentes funcionalidades e sistemas. Todos estes processos e funcionalidades são apresentados mais pormenorizadamente nos capítulos seguintes, afectos a cada técnica.

2.3.2 Condução da TBM

A condução de uma TBM tem como objectivo conduzir a máquina de acordo com o alinhamento previsto para o túnel. A condução da máquina depende do tipo de sistema de propulsão que esta dispõe. Existem 4 sistemas de propulsão: Garras Simples, Garras tipo “X”, macacos de propulsão que actuam no suporte final e uma combinação das garras simples com macacos de propulsão actuantes no suporte. Estes sistemas bem como a condução da TBM serão pormenorizados nos capítulos seguintes. É importante ter em conta que a condução de uma tunneladora não tem uma precisão exacta, sendo que antes do início de cada avanço esta deve ser direccionada segundo o alinhamento pretendido.

2.3.3 Suporte Final

O suporte final de um túnel construído com uma TBM, baseia-se em anéis constituídos por cinco a oito segmentos mais o segmento chave, a colocar na parte superior do anel fechando-o desta forma – Figura 2.7. Estes segmentos ou aduelas são elementos pré-fabricados em betão reforçado com fibras metálicas – Figura 2.8. São produzidos no exterior e trazidos para o interior do túnel e da TBM através do sistema de apoio.

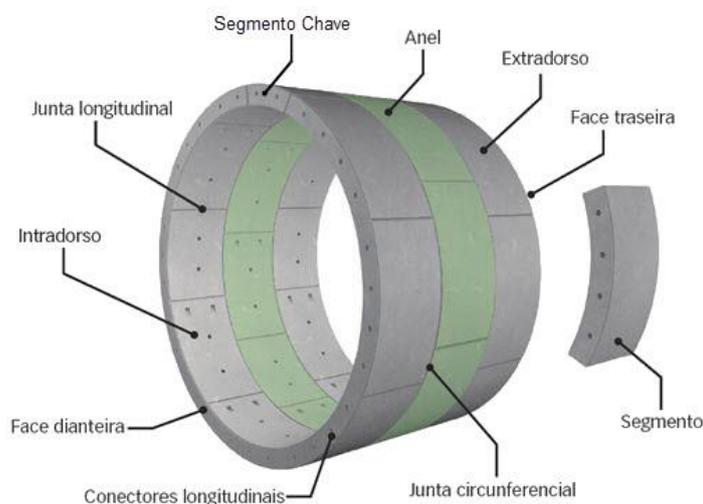


Figura 2.7 – Esquema de um anel de suporte final (infraestruturaurbana@, 2013).

Por forma a instalar estes segmentos, os macacos de propulsão recolhem e um componente das TBMs, denominado de “erector”, Figura 2.9, movimentam-os com recurso a um sistema de sucção até à sua posição final. Após cada segmento estar no seu local estes são aparafusados entre si para garantir tanto a impermeabilização como a sua estabilidade, e os macacos voltam a actuar agora contra um novo anel. O fecho de cada anel representa assim o fim de um ciclo de escavação, permitindo que a TBM avance uma vez mais.



Figura 2.8 – Conjunto de seis segmentos que perfazem um anel de suporte final (TunnelTalk@, 2007).



Figura 2.9 – Erector de dois braços da EPBM “Bertha” (WSDOT@, 2014).

É importante preencher o espaço vazio entre os anéis e o maciço por forma a controlar as deformações tanto neste como à superfície. Visto que o diâmetro de escavação e o diâmetro externo do suporte final são diferentes devido à sobrecavação da cabeça de corte, à espessura do escudo e ao espaçamento entre este e o suporte final, sendo esta folga necessária para a correcta colocação dos anéis, é gerado um vazio à retaguarda de valores entre 10 a 20 cm (Almeida e Sousa, 2005). Por forma a proporcionar uma adequada transferência de esforços entre o maciço e o suporte sem que haja deformações excessivas são efectuadas injeções de

caldas de cimento sobre pressão de modo a preencher esse espaço, recorrendo-se a equipamento instalado no sistema de apoio da tuneladora.

2.3.4 Ferramentas de Escavação para Rocha

Este tema é deveras vasto sendo que a escolha dos cortantes, é como se poderá compreender, algo de importância relevante para uma escavação correcta e produtiva. Os cortantes utilizados em rocha foram adaptados da tecnologia de escavação de poços de petróleo, sendo que ao longo do tempo estes passaram a ser dimensionados para a sua utilização na escavação de túneis mecanizada, nas TBMs.

Os primeiros discos de corte eram de 10'' ou 254 mm, sendo que com a necessidade de uma maior força de corte, por forma a utilizar a escavação mecanizada também em rocha dura, foi necessário aumentar significativamente estes diâmetros. Actualmente são utilizados diâmetros desde as 8'' (203mm), até diâmetros de 15^{1/2}'', 17'' e 19'' respectivamente 394 mm, 432 mm e 483 mm. Estes grandes diâmetros levaram a um aumento considerável na capacidade de carga possível de aplicar, mas também à duração da vida dos cortantes e sendo eles itens consumíveis ao longo de uma escavação, ou seja, existe a necessidade de serem substituídos com alguma frequência, este aumento de vida veio promover também o desempenho da escavação (B. Maidl *et al*, 2008). Na Figura 2.10 apresentam-se, a título de exemplo, dois tipos de cortantes utilizados actualmente na escavação de rocha dura.

Estes discos são colocados na cabeça de corte juntamente com rolamentos e numa determinada posição, por forma a garantir que sobre elevadas pressões estes continuar a rolar juntamente com o movimento da cabeça de corte. A forma como estes são acoplados na cabeça de corte depende muito do fabricante. De referir que é necessário garantir, que como ferramenta descartável, a sua substituição deve ser simples e rápida. Normalmente em tuneladoras de diâmetro superior a 4 metros, esta substituição é exequível a partir da parte de trás da cabeça de corte.



a) Disco de corte duplo.

b) Disco de corte simples.

Figura 2.10 – Discos de corte (INSUPPA@, 2013).

Existem várias teorias sobre a fragmentação da rocha pela acção dos cortantes. Segundo Ernst Büchi (1984) aquando da passagem do cortante decorre a formação de fendas radiais sob o disco de corte, a formação de fendas de tracção entre duas zonas de actuação dos cortantes formando assim lascas paralelas a face de escavação, uma zona de rocha esmagada sob o disco de corte, e pequenos fragmentos devido a fendas de tracção junto ao disco de corte, como esquematizado na Figura 2.11.

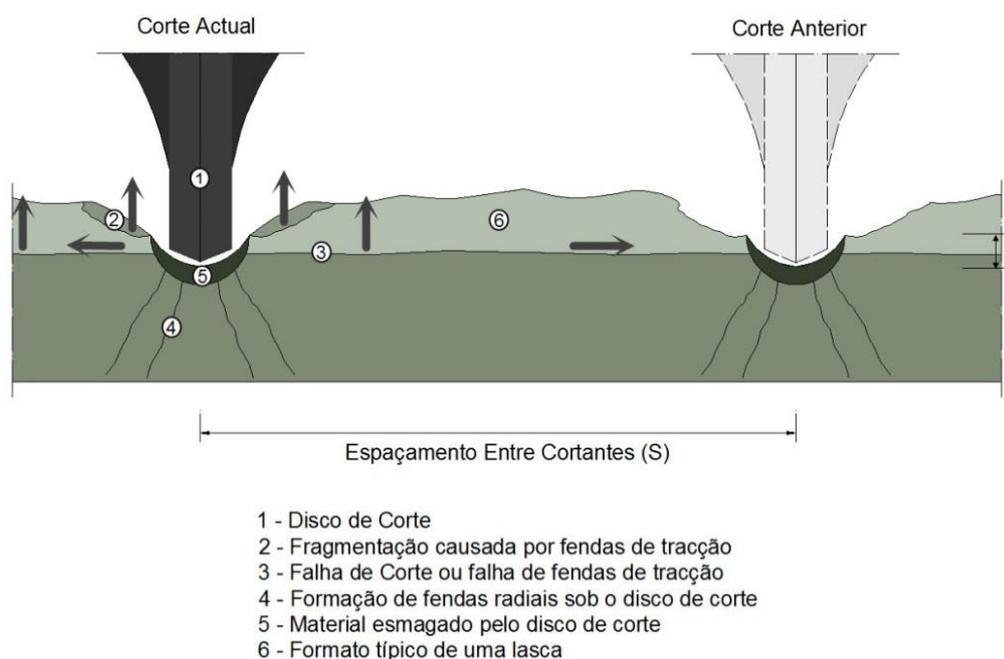


Figura 2.11 – Método de funcionamento dos cortantes (adaptado de Ernest Büchi, 1984).

Importante também para a escavação e adequado funcionamento dos cortantes é a determinação do espaçamento (S) entre estes. Esta distância irá definir o mecanismo de fragmentação e conseqüentemente a eficiência da escavação. Também a penetração dos cortantes é um parâmetro a considerar visto que a sua relação com o espaçamento, o rácio entre estes dois (S/P) deve ser mantido entre 10 e 20, sendo aconselhados rácios menores para rocha mais competente e os superiores para rocha mais quebradiça (M. Cigla *et al*, 2001).

O desgaste dos discos de corte, medido em quilómetros percorridos, depende essencialmente da penetração e da abrasividade da rocha. Pequenas penetrações levam a elevadas distância de rotação e assim a um elevado desgaste. Por forma a aumentar o tempo de vida destes foram criados diâmetros superiores e têm vindo a ser utilizados aços mais resistentes e mais duros. O diâmetro mais utilizado hoje em dia é de 17'' ou 432 mm. Dentro da cabeça de corte o desgaste dos cortantes também não é igual, sendo que os que se encontram mais externamente percorrem maiores distâncias sendo o seu desgaste superior tendo que ser substituídos mais cedo que os que se encontram no centro da cabeça de corte. De referir que estes discos são

fabricados com aço de alta resistência, HRC 55 – 66, muitas vezes combinados com ligas de carboneto de cromo ou tungstênio o que irá elevar a sua resistência consideravelmente.

2.3.5 Ferramentas de Escavação Para Solo

As ferramentas de escavação para solo são essencialmente ferramentas estáticas de escavação, também aplicáveis em combinação com discos quando o maciço a escavar é composto por rocha branda ou com algum grau de alteração. Estas ferramentas são de extrema importância pois permitem desagregar a rocha no caso de esta ser alterada, cortar no caso de a rocha ser branda, até cerca de 80 MPa de resistência à compressão, e retirar da face de escavação rocha já escavada à sua passagem, possibilitando assim otimizar a escavação, sendo que os discos de corte aquando da sua passagem irão cortar apenas rocha dura, função para a qual foram desenhados. O mundo destas ferramentas é extremamente amplo e a sua forma, material e consequente resistência varia amplamente de acordo com cada fornecedor. São peças fabricadas em aço, normalmente aço de alta resistência HRC 55 – 60, com a possibilidade de acordo com as necessidades da obra, utilizar nestas ferramentas “capas” de carboneto de cromo, dando-lhe uma resistência de cerca de HRC 60 – 63, ou mais usualmente carboneto de tungstênio que elevam esta resistência para valores superiores a HRC 65.

Existem ferramentas para funções variadas como “*Buckets*” para os baldes de recolha de escombros que facilitam a sua remoção, “*Scrapers*” e “*Rippers*” que retiram o material escavado da face, “*Cutting Knives*” e “*Cutting Shoes*” para desagregar a rocha alterada e fragmentada da face de escavação. Na Figura 2.11 apresentam-se alguns exemplos destas ferramentas.

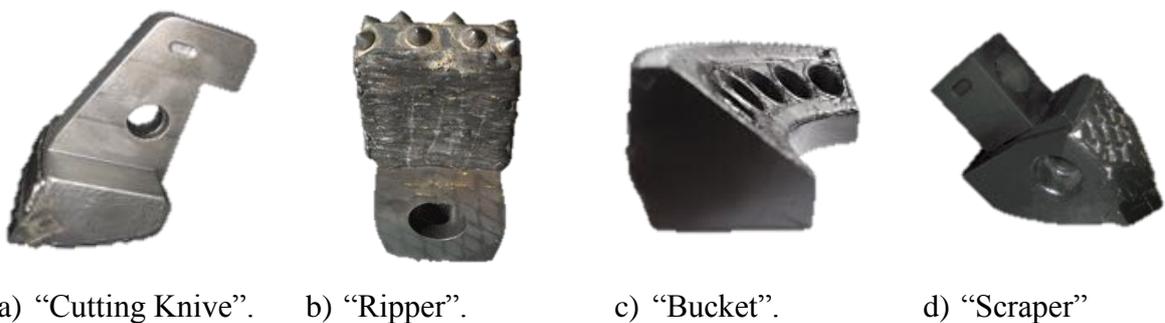


Figura 2.12 – Exemplos de ferramentas de corte de aço de elevada resistência com liga de carbonato de tungstênio, HRC 75 - 80 (INSUPPA@, 2013).

O último avanço a nível tecnológico destas ferramentas consiste em incorporar nestas, sensores que irão transmitir ao operador da TBM o estado das ferramentas, isto é, quando estas atingem níveis de desgaste elevados o operador sabe quando devem ser substituídas. Isto permite que além dessa enorme mais-valia, que possibilita um controlo mais pormenorizado da escavação e assim uma maior eficiência, quando as TBMs estão equipadas para isso,

efectuar a injeção de aditivos na face de escavação por forma a diminuir a abrasividade do material escavado e por conseguinte diminuir o desgaste das ferramentas de escavação.

2.3.6 Sistema de Apoio de uma Tunneladora

O sistema de apoio (Figura 2.13), constituído pelo equipamento atrelado à tunneladora, é de importância técnica semelhante à própria tunneladora. A velocidade de avanço de uma tunneladora é muitas vezes limitada à capacidade de extracção dos escombros bem como ao fornecimento de materiais críticos à construção do túnel (Robbins Co@, 2014). Dependendo das necessidades, os construtores de TBMs têm para oferecer uma panóplia de equipamento a incorporar ao sistema de apoio, além do equipamento dito obrigatório para o bom funcionamento da tunneladora como equipamento de abastecimento de energia, quer hidráulico quer eléctrico, sistema de ventilação entre outros.



Figura 2.13 – Gripper TBM e parte do sistema de backup construídos para abertura do Túnel Ferroviário Base de Lötschberg, Suíça, 2003 (Herrenknecht AG@, 2013).

- **Sistema de Abastecimento de Energia**

Uma tunneladora necessita de vários tipos de energia para cumprir a sua função. Por forma a se obter um abastecimento eficiente de energia aos vários componentes de uma tunneladora, o seu sistema de apoio é equipado de acordo com essas necessidades. Os sistemas eléctrico, hidráulico e de ar comprimido são os sistemas básicos e essenciais a uma tunneladora, sendo compostos por vários elementos como bombas, compressores, transformadores bem como as redes de tubaria e de cabos que lhes corresponde. Estas redes são tanto mais complexas quanto mais complexo for o modo de escavação da tunneladora (B. Maidl *et al*, 2008).

- **Ventilação**

O sistema de ventilação, e tudo o que o compõe, é um dos elementos cruciais no sistema de apoio de uma TBM. Se não for fornecido ao interior do túnel uma correcta renovação de ar torna-se perigoso e por vezes impossível ao ser humano aí trabalhar. A escavação de um túnel é feita em “fundo de saco” produzindo-se, no caso das TBMs abertas, poeiras que irão contaminar o ar e em todo o tipo de tunneladoras o próprio funcionamento promove o

aquecimento do ar, sendo que torna-se necessário, por motivos de segurança e respeito pela produtividade humana. Além destes factores há a ter em conta a presença de gases no interior do maciço. Estes gases são nocivos para os humanos e de elevado perigo. São na maioria metano e outros hidrocarbonetos, gases com baixo limite inferior de explosão, isto é, gases que mesmo em baixas concentrações tendem a ser sensíveis a fontes de ignição provocando assim explosões. Esta pragmática leva à necessidade de instalação de detectores de gases no ar.

A ventilação de uma tuneladora divide-se em duas zonas, toda a área da tuneladora e equipamento e a área da retaguarda da TBM. A zona ventilação da retaguarda é dimensionada como se de uma obra subterrânea normal se tratasse, sendo que para a zona do corpo da TBM são necessárias considerações especiais devido ao que já foi exposto. Sendo a câmara de escavação separada do corpo da máquina em todas as TBMs, e assumindo que o equipamento de extracção de poeiras é bem dimensionado, então para o corpo da TBM a ventilação é dimensionada por forma a garantir a renovação de ar devido ao seu aquecimento e contaminação pela respiração dos operários mas principalmente por contaminantes que possam existir nos componentes da TBM. Para assegurar a não contaminação da zona de trabalho da tuneladora e uma eficiente extracção de poeiras da câmara de escavação, a abertura para o transportador de correia para extracção de escombros deve ser o mais pequena possível sendo ainda admissível a instalação de cortinas plásticas. Estas poeiras são então extraídas e filtradas até que a sua concentração no ar atinja valores abaixo do limite admissível. Todas estas medidas irão mitigar a contaminação da atmosfera dentro do túnel, bem como possíveis perigos, promovendo assim a eficiência dos trabalhos.

- **Equipamento de Saneamento do Maciço**

Por forma a manter os níveis de segurança e de produção, dependendo do tipo de maciço a escavar, são necessárias tomar medidas no que toca ao saneamento do maciço escavado. Desta feita é possível incorporar no sistema de apoio de uma tuneladora equipamento para esse efeito. Dentro deste equipamento incluem-se o erector de segmentos, já referido, e a zona de armazenagem destes, sistemas de injeção de calda de cimento, equipamento de perfuração, erectores de redes metálicas e de cambotas, equipamento de pregagens bem como a zona de armazenagem de material para o efeito.

- **Transporte de Material Escavado**

A escavação de um túnel implica a extracção de várias toneladas de material, material este que tem ser transportado para o exterior do túnel e encaminhado a escombrelas. Sendo a escavação mecanizada, nomeadamente a escavação com recurso a tuneladoras, um processo normalmente contínuo torna-se importante garantir que o sistema de transporte de escombros é bem dimensionado. Este sistema é normalmente composto por longos transportadores de correia que seguem ao longo do alinhamento do túnel até ao exterior – ver Figura 2.52. Em

longas extensões é necessária a instalação de torvas para armazenamento temporário do material em caso de avarias do transportador ou mesmo por limite de extensão da correia transportadora. No caso das SFMs e de algumas Mishield TBMs em que a extracção de escombros é hidráulica torna-se nestes casos necessário instalar uma rede de tubagem adequada ao efeito bem como válvulas e bombas para o seu adequado funcionamento.



Figura 2.14 – Transportador de correia desenvolvendo-se ao longo do alinhamento de um túnel (Herrenknecht AG@, 2013).

2.3.7 Cabine de Comandos

Do sistema de apoio faz parte também a cabine de comandos onde se controla o funcionamento da tuneladora e por conseguinte toda a escavação – Figura 2.14. É neste compartimento que se controla a propulsão da máquina, força de torque, pressões na frente de escavação, quantidade de material escavado entre muitas outras variáveis que compõem a escavação de um túnel com recurso a uma tuneladora.



Figura 2.15 – Sala de comandos de uma Single Shield TBM (Metrostav a.s.@, 2014).

3 TUNELADORAS PARA ROCHA

Este tipo de tuneladoras é utilizado exclusivamente em maciços rochosos de média a alta resistência, não sendo as condições de estabilidade do maciço críticas, tornando-se assim a preocupação dominante a efetividade dos cortantes (Figura 3.1). Contudo devido à possibilidade de alterabilidade do maciço pode-se tornar necessário fornecer algum tipo de suporte periférico ao maciço. Como apresentado no Quadro 2.1, do capítulo anterior, as tuneladoras que se adequam à escavação de túneis sem que haja necessidade de fornecer qualquer tipo de suporte imediato, seja ele periférico ou frontal, são as *Open TBMs* e as *Reamer TBMs*, idealizadas com o intuito de maximizar a performance da escavação e descritas no presente capítulo. No mesmo quadro apresentam-se as tuneladoras para escavação de maciços rochosos com condições variáveis, isto é, maciços que se poderão encontrar alterados na sua totalidade ou em trechos a escavar. Ao longo deste capítulo são apresentadas estas tuneladoras no que concerne ao tipo de suporte imediato que fornecem, ao seu sistema de propulsão, às características da cabeça de corte e ao seu sistema de remoção de escombros.



Figura 3.1 – Frente de escavação em rocha dura no túnel hidráulico de Gilgel Gibe II, Etiópia (TunnelTalk@, 2009).

3.1 Tuneladoras para Rocha Sã

As tuneladoras utilizadas em rocha sã, com bom comportamento geomecânico e sem a presença de água, não fornecem suporte imediato ou apenas suportam periféricamente o maciço escavado, o que acontece normalmente apenas por questões de segurança, por forma a proteger os operários de quedas esporádicas de blocos de rocha ou devido à utilização que se quer dar ao túnel, levando assim à colocação das cambotas e/ou redes metálicas e/ou betão projectado que darão o suporte periférico final ao túnel.

3.1.1 *Open TBM*

Este tipo de tuneladora é normalmente utilizada em maciços rochosos duros, sãos ou com muito baixo grau de alteração, sem presença de água, sendo estas condições geológicas favoráveis ao modo de propulsão deste tipo de equipamento e à não necessidade de suporte imediato após escavação. A escavação é efectuada em cada passagem da cabeça de corte que escava toda a face do túnel (*Full Face Excavation*). A propulsão (*Thrust*) é feita através de macaco hidráulicos conectados a garras (*Grippers*) que actuam sobre as paredes do túnel escavado fornecendo a tracção necessária. O avanço da TBM é feito em sequência, escavação/propulsão, retracção das garras de tracção, retracção dos macacos de propulsão, actuação das garras de tracção no maciço, extensão dos macacos de propulsão e novamente propulsão/escavação. Esta TBM tem normalmente uma cabeça de corte equipada maioritariamente por discos de corte podendo ter em menor quantidade outro tipo de ferramentas de corte (Figura 3.2). O suporte do túnel é independente da máquina, sendo colocado posteriormente ou com auxílio de equipamento adicional a acoplar na TBM. Os escombros são normalmente retirados por raspadores e baldes, existentes na cabeça de corte, sendo de seguida transferidos para transportadores de correia na retaguarda da TBM e levados para o exterior. Este tipo de tuneladoras compreende diâmetros entre 2 a 12,5 metros, sendo que abaixo de 3,8 metros o *design* da tuneladora torna-se deveras complicado (Herrenknecht AG@, 2014).



Figura 3.2 – Gripper TBM do túnel ferroviário base de São Gotardo, Alpes Suíços (Herrenknecht AG@, 2014).

Por forma a compreender da melhor forma a descrição desta TBM efectuada de seguida, na Figura 3.3 apresenta-se um esquema tridimensional dos principais componentes mecânicos desta tuneladora. Note-se que este esquema é meramente ilustrativo, podendo os elementos mecânicos e sua disposição variar de acordo com cada fabricante.

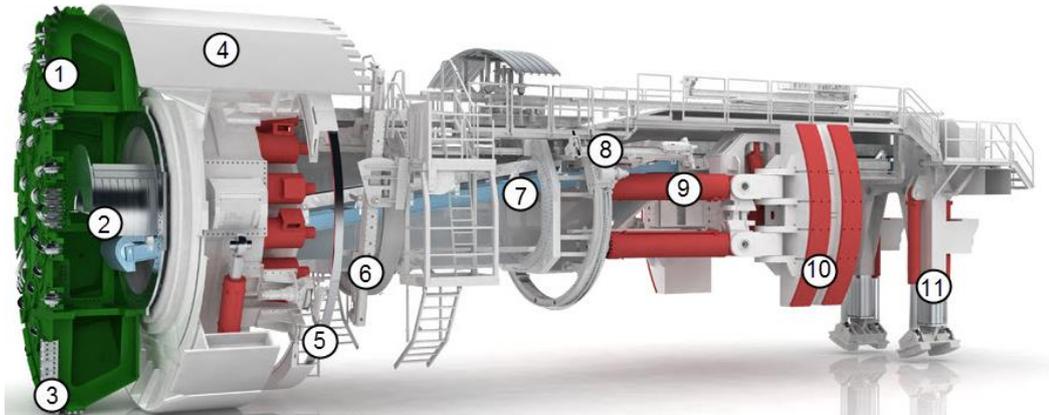


Figura 3.3 – Esquema tridimensional de uma Open TBM (adaptado de Herrenknecht AG@, 2014).

LEGENDA:

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1) Cabeça de corte; | 7) Transportador de correia da TBM; |
| 2) Anel de escombros; | 8) Unidade de perfuração de sondagem; |
| 3) “Baldes” da cabeça de corte; | 9) Macacos hidráulicos de propulsão; |
| 4) Escudo de tecto; | 10) Garras do sistema de propulsão; |
| 5) Erector de cambotas metálicas; | 11) Suporte estático da TBM. |
| 6) Unidade de colocação de pregagens; | |

• Suporte Imediato

Este tipo de tuneladoras não oferece qualquer tipo de suporte imediato exceptuando aquele que o seu próprio mecanismo oferece, ou como adiante apresentado, se lhe é acoplado um escudo. Havendo esta possibilidade, que não altera drasticamente o seu modo de funcionamento, esta máquina tem uma ampla área de utilização dentro da escavação de túneis em maciços rochosos. Estes escudos são utilizados por forma a proteger a integridade do equipamento e a dos que o manobram, de ocasionais quedas de destroços do maciço escavado, conferindo também alguma estabilidade à própria tuneladora.

Actualmente são usados 3 tipos de escudos (Figura 3.4), o escudo de tecto (*Roof Shield*), uma combinação entre este escudo e o escudo lateral e o escudo da cabeça de escavação (*Cutter Head*). Os escudos de tecto oferecem apenas protecção para possíveis quedas de destroços, sendo esta considerada uma protecção estática. As TBMs equipadas com escudo de tecto e escudo lateral além da componente estática da protecção inerente à existência de escudos têm a possibilidade através dos escudos laterais de suportar o maciço junto à cabeça de corte durante a escavação e durante a propulsão. O escudo da cabeça de corte serve exclusivamente para proteger a equipa que manobra a máquina aquando do avanço desta.

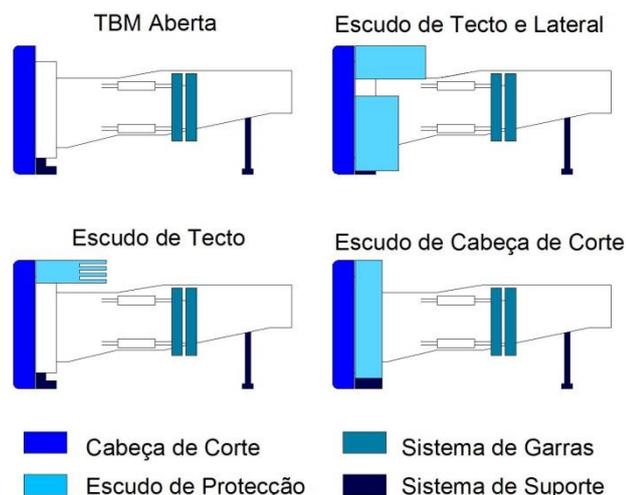


Figura 3.4 – Esquema de possíveis escudos a acoplar nas Open TBMs.

• Propulsão

A força de propulsão necessária depende do tipo de rocha a escavar, sendo que cada TBM é usualmente construída para um determinado tipo de rocha. Este tipo de TBMs é utilizada em rocha dura ou muito dura, tornando-se assim necessário na previsão de que ao longo da escavação ocorra o aparecimento de rocha menos capaz em termos geomecânicos, considerar todo o sistema de apoio por forma a lidar com os problemas que daí advêm.

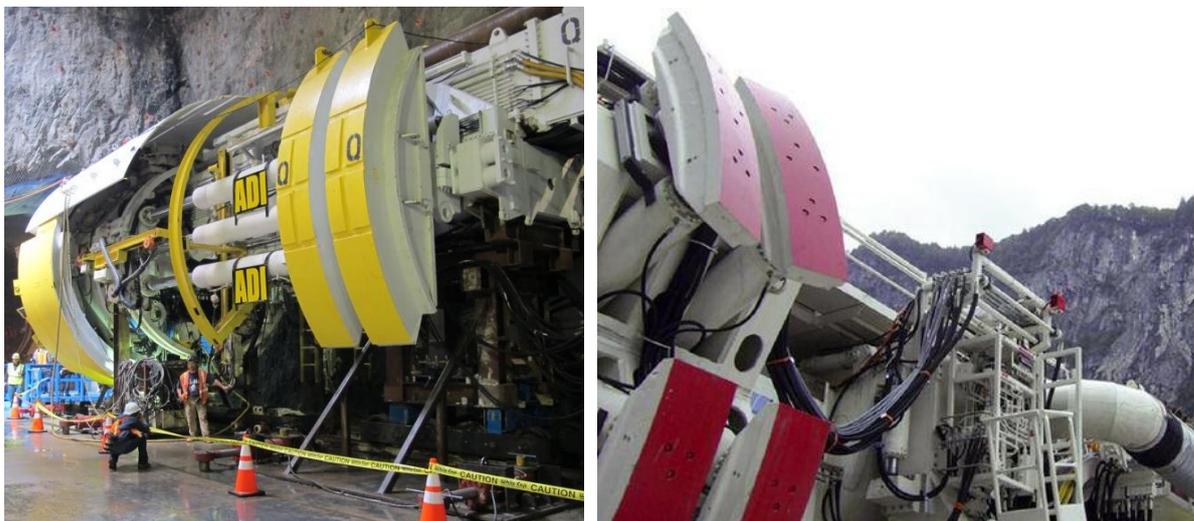
Como já referido, a força total de propulsão neste tipo de tuneladoras, a ser exercida axialmente, é efectuada através de um sistema de garras/macacos de propulsão que actuam radialmente no maciço. Em rocha branda é necessário acautelar-se em relação às forças aplicadas nas paredes do túnel, visto que se esta força for demasiado elevada esta pode levar à rotura da rocha e conseqüente deformação. Em rochas muito duras o contrário acontece, visto que existe limite de expansão, criado pelo maciço, tal pode comportar um aumento massivo das tensões no mesmo. Estas forças são cerca de duas vezes a força de propulsão a aplicar.

Este sistema é composto por garras que actuam directamente contra as paredes do túnel com o auxílio de braços hidráulicos e por um outro conjunto de braços hidráulicos que após o “aperto” (*Clamping*) propulsiona a TBM e todo o equipamento que a compõe contra a face do túnel, gerando assim a força necessária na frente de escavação para que esta ocorra.

Dentro das várias empresas que produzem TBMs com este tipo de propulsão foram criados dois tipos de sistemas de garras ao longo do tempo (B. Maidl *et al*, 2008). Tanto a Robbins como a Herrenknecht utilizam apenas um conjunto de garras radiais que actuam nos hasteais do túnel sendo que o estator da TBM, parte estática do motor de indução que gira a cabeça de corte, e a unidade de direcção, deslizam sobre um pé (*Invert Shoe*) que assenta na base do túnel (Figura 3.5 a)). Este sistema de garras serve também para direccionar a escavação de acordo com a linearização pretendida. A condução da tuneladora é efectuada ajustando horizontalmente a posição da cabeça de corte com recurso ao sistema de garras mas também

verticalmente fazendo uso do “*Invert Shoe*” que levanta ou baixa a cabeça de corte. São por vezes também utilizados, na necessidade de se efectuarem curvas com raios menores, pés de direcção laterais (*Side Steering Shoes*) que auxiliam o redireccionamento horizontal da tuneladora proporcionando também a estabilização da mesma. As tuneladoras do tipo “*Main-beam*” e “*Open-gripper*” fazem uso deste sistema de propulsão sendo que o que difere entre estas duas é a sua construção, a zona imediatamente atrás da cabeça de corte na qual esta está apoiada bem como onde o sistema de garras está acoplado.

Um outro sistema de garras utilizado por exemplo pela Jarva e pela China Railway Tunneling Equipment (CRTE), que adquiriu a patente da tecnologia de tuneladoras da alemã Aker Wirth, é um sistema de garras em “X” (Figura 3.5 b)). Este sistema é utilizado nas “*Kelly-drive*” TBMs ou também denominadas de *Double Gripper* TBMs e consiste em dois conjuntos de garras dispostas em cruz. Estas garras trabalham em conjunto com o corpo principal da TBM (*Outer Kelly*) deslizando numa secção rectangular (*Inner Kelly*) à qual está acoplada a cabeça de corte.



a) Garras simples.

b) Garras tipo “X”.

Figura 3.5 – Sistemas de garras (Robbins Main-beam TBM, thelaunchbox@ e Wirth Driver-kelly TBM, tunnelonline@).

A condução em tuneladoras com este sistema de propulsão é executada antes de cada avanço, não podendo ser alterada aquando da fase de escavação. O direccionamento da TBM é realizado horizontal e verticalmente com recurso à unidade de garras traseiras que posicionam o *Outer Kelly* e por conseguinte toda a tuneladora. É necessário ter em conta que a cabeça de corte tem que estar a rodar para se efectuar o redireccionamento da tuneladora, por forma a evitar danos tanto nesta como no *Outer Kelly*. Este sistema torna-se então muito bom em termos de condução, pois ocorrências como o escorregamento da cabeça de corte, devido à rocha na frente de escavação ser dura de um lado e macia do outro, não acontecem.

- **Cabeça de Corte**

A cabeça de corte, além de ser o elemento ao qual estão acopladas as ferramentas de escavação, descritos em seguida, tem como funções a retirada do material escavado (Muck) da frente de escavação através de “baldes” nela implantados, efetuar o suporte da frente de escavação em caso de derrocada até a rocha ser devidamente suportada e permitir a realização de tarefas de manutenção em situações normais de interrupção da escavação, tais como a manutenção dos cortantes.

A forma da cabeça de corte varia desde ligeiramente abobadada quando o diâmetro da TBM é inferior a 5 metros, até completamente plana para TBMs de diâmetros superiores (B. Maidl et al, 2008). A cabeça de corte, neste tipo de tuneladora, pode ser aberta se a rocha a escavar for dura ou fechada se a rocha for fracturada ou susceptível a explodir. Dentro destas vertentes existem vários tipos de cabeças de corte em que variam o número de baldes para remoção de escombros, se estes são internos ou externos e com ou sem “lábios” ajustáveis, a posição, tipo e número de cortantes, e a existência de orifícios para injeção de caldas para consolidação da frente de escavação, ou seja, dependendo do projecto em questão ir-se-á obter uma cabeça de corte diferente e adequada a esse projecto. Na Figura 3.6 a) pode-se observar uma cabeça de corte aberta utilizada numa das TBMs que escavaram os Túneis Gémeos de Seymour – Capilano, Vancouver, Colúmbia Britânica, Canadá (tunneltalk@, 2006) e na Figura 3.6 b) uma cabeça de corte fechada da TBM utilizada no Túnel Hidráulico do Niágara, Ontário, Canadá (tunneltalk@, 2013).



a) Cabeça de corte aberta.



b) Cabeça de corte fechada.

Figura 3.6 – Cabeças de corte.

- **Remoção de Escombros**

Os escombros são inicialmente retirados da frente de escavação por “baldes” implantados na cabeça de corte e despejados num anel em forma de funil, que seguidamente transfere os escombros para um transportador de correia. Este transportador deve ser suficientemente

potente para extrair o material escavado e deve ser instalado por forma a não prejudicar o sistema de suporte da tuneladora. Após os escombros serem depositados nestes transportadores são transferidos para outros transportadores de correia, vagões ou veículos para assim serem retirados para o exterior do túnel.

3.1.2 Reamer TBM

As Reamer TBMs, também denominadas de TBEs (*Tunnel Boring Extender*), são no fundo tuneladoras de mandril, isto é, são máquinas utilizadas para alargar um furo pré-existente ou pré-construído com o intuito destas serem utilizadas. O seu funcionamento é similar ao funcionamento da tuneladora apresentada atrás, excepto que a sua cabeça de corte é puxada contra a face de escavação em vez de empurrada. Este movimento é executado através de uma unidade de tracção com garras que actuam num furo piloto na frente de escavação, a ser escavado previamente por uma *Open TBM* comum. A cabeça de escavação é, similarmente, como na máquina anterior, rodada com o auxílio de motores eléctricos ou hidráulicos. O suporte da escavação é também similar ao anterior, excepto no furo piloto em que no caso de utilização de suporte provisório este deve ser destrutível ou retirável por forma a não danificar a cabeça de corte que irá alargar o furo. A extracção de escombros é uma vez mais efectuada da mesma forma que nas *Open TBMs* sendo que esta é também uma tuneladora aberta.

Sendo uma técnica ainda pouco utilizada, existem autores que defendem o seu sucesso em termos técnicos, quando usada em rocha competente, e muitos outros o seu insucesso financeiro, no presente trabalho irá ser apresentada a tuneladora de mandril mais conhecida e com a tecnologia mais avançada em termos de técnica de escavação, a técnica de “Undercutting”, a ser explicada de seguida.

A tuneladora referida, apresentada na Figura 3.7, foi usada para a escavação do Túnel Uetliberg, Zurique, Suíça finalizado a 1 de Fevereiro de 2005. A sua criadora e detentora da patente da técnica de “Undercutting”, vencedora do prémio de inovação de 2005 era à data a empresa Aker Wirth.

- **Método de Funcionamento**

A forma de funcionamento desta técnica consiste na abertura de um túnel piloto com uma *Open TBM* de técnica semelhante à apresentada no ponto anterior. De seguida é montada a *Reamer TBM* que desta forma irá alargar o túnel para a secção final desejada. Esta tuneladora consiste numa cabeça de corte que gira sobre um eixo interno (*Inner Kelly*) que trabalha axialmente num corpo externo (*Outer Kelly*) ao qual está acoplado o sistema de propulsão, instalado no túnel piloto, que por sua vez irá puxar a cabeça de corte contra a face de escavação e assim aplicar a força necessária para que os cortantes desagreguem a rocha.

Quando equipadas com a técnica de “Undercutting” as TBEs têm o seu avanço limitado pelo deslocamento axial dos cortantes nos braços da cabeça de corte, visto que os cortantes perfazem um caminho em espiral desde o centro até ao exterior da face de escavação, tendo que ser reposicionados ao centro no início de cada avanço (Amberg Engineering, 2003).



Figura 3.7 – *Reamer* TBM utilizada no alargamento e no túnel piloto do Túnel de Uetliberg, Zurique, Suíça (Aker Wirth GmbH@, 2005).

- **Suporte Imediato**

Como referido atrás, esta tuneladora apenas oferece o suporte imediato gerado pelo seu próprio corpo. Este mesmo suporte é referido por vários autores como deficiente em relação às *Open* TBMs convencionais, essencialmente nas arestas do túnel piloto, nas quais nem sempre é possível garantir a segurança necessária dos trabalhos. São comuns os desabamentos da face de escavação, o que leva a trabalhos a mais e pouco seguros na frente. A utilização de suporte provisório como pregagens está limitada no túnel piloto devido à possibilidade de deterioração da TBE. Por conseguinte, a instalação de suporte na secção final do túnel também está limitada ao tempo de auto suporte de maciço, sendo que estas TBEs não fazem uso de qualquer tipo de escudo, ficando assim o seu uso confinado a maciços bastante competentes e com um tempo de auto suporte considerável.

- **Propulsão**

O movimento da TBE de encontro à face de escavação por forma a aplicar a força axial necessária para escavar a rocha é gerada a partir de macacos hidráulicos que puxam a *Outer Kelly*, esta por sua vez empurra a cabeça de corte que roda em torno da *Inner Kelly*. O sistema de garras está colocado na *Inner Kelly* dentro do furo piloto. Estas garras, à semelhança das *Open* TBMs convencionais, actuam sobre a parede deste túnel dando assim a estabilidade necessária para que o processo de escavação ocorra. A Figura 3.8 é um esquema sucinto da mecânica da TBE.

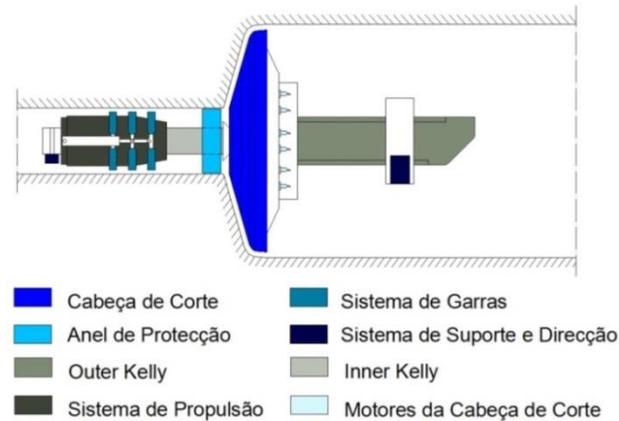


Figura 3.8 – Esquema ilustrativo da mecânica de uma TBE (adaptado de Amberg Engineering@, 2013).

- **Técnica de “Undercutting”**

Esta técnica, utilizada pela TBE fabricada para o alargamento do Túnel de Uetliberg, Zurique, Suíça, consiste na reorientação dos discos de corte. Estes em vez de actuarem perpendicularmente à face de escavação estão colocados angularmente permitindo assim solicitar a rocha à tracção e não à compressão, sendo da compreensão de todos que a energia necessária para tal é amplamente menor. Na Figura 3.9 pode-se ver uma frente de escavação escavada com esta técnica bem como os cortantes posicionados na cabeça de corte.



a) Face escavada com recurso à técnica de “Undercutting” (Aker Wirth@, 2005).

b) Cortantes instalados na cabeça de corte (Amberg Engineering@, 2013).

Figura 3.9 – Técnica de “Undercutting”.

Os cortantes são colocados de maneira a que o seu percurso descreva uma espiral, sendo os braços nos quais estes estão instalados, deslocados no seu eixo axial para que toda a face de escavação seja percorrida. Isto leva a que sejam necessárias mais do que uma rotação da cabeça de corte para fechar um ciclo. Este ciclo leva cerca de 8 a 10 rotações da cabeça de corte e poderá chegar aos 20 cm de avanço, sendo que na presença de rocha dura os avanços

poderão ser inferiores. O deslocamento axial dos braços da cabeça de corte varia entre 60 a 80 cm tendo em conta o seu diâmetro de 14,4 m (Amberg Engineering, 2003). De referir mais uma vez que estes valores se referem à TBE acima mencionada. As restantes TBEs fazem uso do método de escavação normal com os cortantes perpendiculares à face de escavação.

- **Cabeça de Corte**

A cabeça de corte, à semelhança das *Open TBMs* convencionais, tem também a função de suporte imediato à frente de escavação e de remoção de escombros através de “baldes” convencionais de uma TBM aberta para um transportador de correia. Nesta TBE em concreto a cabeça de corte tem uma particularidade, além do posicionamento dos cortantes, que são as calhas onde estes se encontram. Estas calhas deslizam axialmente permitindo que os cortantes percorram toda a face a escavar no seu caminho espiral. Estas cabeças de corte têm como vantagem a redução de energia necessária para escavar, visto que a rocha é escavada em face livre. A construção da cabeça de corte, sendo esta simples no que toca à maquinaria à sua retaguarda, permite o rápido saneamento das paredes do túnel imediatamente atrás desta. Na Figura 3.10 é possível verificar com clareza a disposição dos cortantes bem como as calhas onde estes estão instalados. É possível ver ainda o local onde a cabeça de corte encaixa na *Inner Kelly*.



Figura 3.10 – Cabeça de corte com tecnologia de “*Undercutting*” (Aker Wirth®, 2005).

- **Cortantes e Remoção de Escombros**

Sendo uma tuneladora adequada para rocha dura os cortantes são discos, tendo em conta que se for utilizada a técnica de “*Undercutting*” os discos têm que ser de corte simples.

No que toca à remoção de escombros a única alteração prende-se com questões mecânicas de construção.

3.2 Tuneladoras Para Rocha com Condições de Alteração Variáveis

As tuneladoras utilizadas em rocha com possibilidade das suas condições variarem em termos de alteração ou capacidade geomecânica (rocha branda) e sem presença de água, necessitam de fornecer suporte imediato periférico ao maciço escavado para que a escavação decorra sem problemas de segurança graves. Só assim é possível limitar as deformações das paredes do túnel antes da colocação do suporte final. O seu mecanismo de propulsão, em caso de rocha branda ou muito alterada, também tem que ser diferente visto que um sistema de garras comum iria penetrar no maciço sem que este lhe ofereça a resistência necessária para estabilizar a tuneladora e redireccionar a força para a cabeça de corte. Assim estas tuneladoras, podendo estar equipadas com garras, dispõem também de um sistema de propulsão através de macacos hidráulicos que actuam nas aduelas que perfazem o suporte final do túnel, a instalar imediatamente atrás da TBM e instaladas por esta.

3.2.1 *Single Shield* TBM

As *Single Shield* TBMs, tuneladoras de escudo único, oferecem suporte periférico imediato às paredes do túnel. São máquinas deveras versáteis no que toca ao maciço a escavar, podendo escavar desde rocha dura a rocha branda ou com algum grau de alteração. Um estudo geológico adequado permite dimensionar as ferramentas de escavação a acoplar à cabeça de corte, que poderão ser discos de corte ou a combinação destes com outro tipo de ferramentas. O seu sistema de propulsão baseia-se em macacos hidráulicos que actuam sobre o suporte final colocado na sua traseira por equipamento existente na própria TBM. A conjugação destas características faz desta TBM uma máquina versátil mas também segura e produtiva. A Figura 3.11 apresenta a *Single Shield* TBM construída para a escavação de um túnel rodoviário na Rússia. Este tipo de tuneladoras compreende diâmetros entre 1,5 e 14 metros (Herrenknecht AG@, 2014). A possibilidade da utilização de diâmetros tão pequenos deve-se essencialmente à disposição periférica do seu sistema de propulsão que deixa o interior da tuneladora livre para a colocação dos componentes necessários a esta.



Figura 3.11 – *Single Shield* TBM (Herrenknecht AG@, 2014).

O esquema seguinte, Figura 3.12, é uma representação geral dos componentes principais no caso de uma *Single Shield* TBM, podendo os seus elementos mecânicos e a sua disposição variar de acordo com cada fabricante.

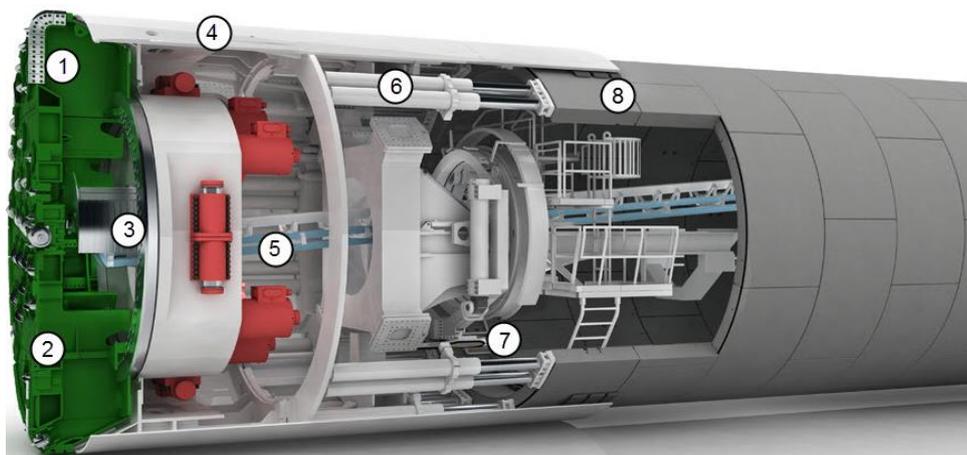


Figura 3.12 – Esquema tridimensional de uma Single Shield TBM (adaptado de Herrenknecht AG@, 2014).

LEGENDA:

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1) “Baldes” da cabeça de corte; | 5) Transportador de correia da TBM; |
| 2) Cabeça de corte; | 6) Macacos hidráulicos de propulsão; |
| 3) Anel de escombros; | 7) Erector de segmentos; |
| 4) Escudo; | 8) Sistema de isolamento do escudo. |

- **Suporte Imediato**

Como o nome indica esta tuneladora está equipada com um único escudo que a protege e sustem o maciço perifericamente. Alguns fabricantes destes equipamentos fornecem escudos opcionais a acoplar à TBM para usos vários, como por exemplo, proteger a colocação das aduelas. Este escudo consiste num aro metálico ao qual é ligada a cabeça de corte. Esta irá rodar sobre rolamentos colocados no orifício onde esta encaixa. Isto permite além do suporte periférico, garantir a segurança na retaguarda da cabeça de corte através da separação desta do restante corpo da TBM. A Figura 3.13 a), permite visualizar exactamente este pormenor.

- **Propulsão**

A força a exercer na face de escavação pela cabeça de corte por forma a levar à cedência da rocha é, nesta TBM, gerada por macacos hidráulicos que actuam na mesma direcção da força a exercer, ou seja, paralelamente ao eixo do túnel. Estes macacos fazem parte do corpo da TBM, estando colocados radialmente no extremo do escudo, actuando nas aduelas colocadas imediatamente atrás deste. Na Figura 3.13 b), apresenta-se um exemplo de disposição dos macacos no escudo da TBM. Como foi referido, alguns fabricantes oferecem a possibilidade de acoplar mais escudos à unidade principal, fazendo com que por exemplo as aduelas sejam colocadas dentro de um escudo e consequentemente o sistema de propulsão actue protegido.

Estando toda a tuneladora assente no escudo, a força necessária para o avanço desta é substancialmente superior à requerida para a cabeça de corte. Tal deve-se tanto à massa da própria tuneladora como ao atrito entre esta e o maciço que afecta praticamente toda a metade de baixo do escudo. De evidenciar que, ao contrário de um sistema de garras, este sistema não provoca acréscimos de tensão no maciço e no que toca à rotação infligida pela TBM a acção dos macacos hidráulicos é o suficiente para a contrariar.

A condução de tuneladoras com este sistema de propulsão é executada exclusivamente pelos macacos de propulsão. Estes estão organizados em grupos que exercem pressões distintas e que dependem da sua localização. Na parte de baixo do escudo, devido ao atrito gerado entre este e o maciço, existem em norma dois grupos de macacos que irão aplicar uma pressão superior em relação aos grupos colocados lateralmente, normalmente um de cada lado, e na parte superior do escudo também um grupo. A pressão que cada grupo exerce depende assim do atrito, que depende do peso da tuneladora e da geologia do maciço, e da direcção que se pretende dar à máquina. Estando esta direccionada segundo o alinhamento pretendido, as diferentes pressões geradas por cada grupo de macacos deve-se traduzir numa igual pressão ao nível do eixo da máquina.



a) Sistema de propulsão.

b) Escudo e rolamento.

Figura 3.13 – Componentes de uma *Single Shield* TBM (Metrostav a.s.@, 2014).

- **Cabeça de Corte**

A cabeça de corte de uma *Single Shield* TBM tem essencialmente as mesmas funções do que nas TBMs apresentadas acima, a possível alteração mais evidente poderá surgir dependendo da geologia do maciço, isto é, as ferramentas de escavação poderão ser só discos de corte ou uma combinação entre estes e outras ferramentas de escavação. Também o tamanho dos “baldes” de extracção de escombros poderá ser significativamente superior ao de uma *Gripper* TBM por exemplo. Na Figura 3.14 é possível verificar uma cabeça de corte aberta de

uma *Single Shield* TBM com uma combinação de discos de corte com bits de escavação e baldes de grandes dimensões.



Figura 3.14 – Cabeça de corte para um maciço alterado de uma Single Shield TBM (Metrostav a.s.@, 2014).

Um pormenor muito importante na construção destas tuneladoras é a posição do eixo da cabeça de corte em relação ao eixo da máquina. O diâmetro da cabeça de corte é ligeiramente superior ao diâmetro do escudo e o seu eixo está posicionado acima do eixo da máquina. Esta característica leva a um corte a mais, denominado de “*Overcut*”, que torna possível um melhor controlo da máquina, em termos direccionais, e impede que esta emperre contra o maciço. Além disto promove a estabilização da máquina durante a escavação reduzindo significativamente as vibrações.

- **Remoção de Escombros**

A remoção de escombros é efectuada como nas TBMs apresentadas atrás. Os escombros são removidos da frente de escavação por “baldes” incorporados na cabeça de corte e despejados no anel de escombros que transfere os escombros para um transportador de correia. É necessário salientar que estando a cabeça de corte num compartimento diferente do corpo da tuneladora, a correia de transporte faz-se passar pelo orifício do rolamento da cabeça de corte. Sendo esta uma tuneladora que no seu caminho poderá encontrar desde rocha dura a rocha alterada torna-se importante saber exactamente o volume de escombros retirados da frente de escavação. Assim estas tuneladoras vêm, em norma, equipadas com equipamentos que permitem ao controlador da TBM, posicionado numa sala de comandos na retaguarda da TBM, saber exactamente a quantidade de material que está ser escavado. Isto permite identificar bolsas de material muito alterado e assim controlar possíveis assentamentos e consequentes acidentes que daí advêm bem como manter o desempenho da escavação.

3.2.2 *Double Shield* TBM

As *Double Shield* TBMs, tuneladoras de escudo duplo, são consideradas por muitos, as TBMs mais tecnicamente sofisticadas para escavação de túneis em maciços rochosos. Tal deve-se ao facto de esta unir os princípios funcionais das *Open* TBMs com os da *Single Shield* TBMs, isto é, esta é equipada com os dois tipos de sistemas de propulsão das anteriores o que lhe permite, em maciços de bom comportamento geomecânico, escavar sem a necessidade de parar e além disso permite a colocação do suporte final do túnel. Esta conjugação de especificações leva a que esta TBM tenha um rendimento de escavação elevado, tornando-se assim ideal para a abertura de túneis longos em rocha. A Figura 3.15 mostra uma *Double Shield* TBM com uma cabeça de corte preparada para a escavação em rocha dura. Este tipo de tuneladoras pode ser construído com diâmetros entre 2,8 e 12,5 metros (Herrenknecht AG@, 2014). Tuneladoras com diâmetros entre 2.8 e os 6 metros são equipadas com macacos de propulsão permanentes colocados longitudinalmente ou em forma de V. Nas tuneladoras com diâmetros superiores a 6 metros existe a possibilidade de acoplar macacos de propulsão (amovíveis) que conferem à TBM um deslocamento longitudinal extra, ou seja, uma maior capacidade de carga na frente.



Figura 3.15 – Uma de duas *Double Shield* TBM construídas pela Herrenknecht AG para a escavação dos túneis gémeos “Legacy Way”, Brisbane, Austrália (Transcity@, 2014).

Na Figura 3.16 apresenta-se um esquema tridimensional à semelhança dos anteriores, mas neste caso representando os componentes principais de uma *Double Shield* TBM, podendo os seus elementos mecânicos e a sua disposição variar de acordo com cada fabricante.

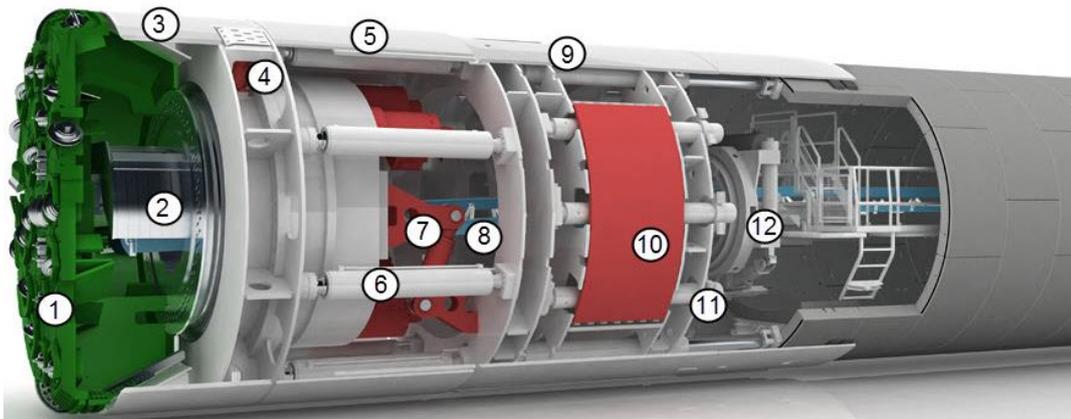


Figura 3.16 – Esquema tridimensional de uma Single Shield TBM (adaptado de Herrenknecht AG@, 2014).

LEGENDA:

- | | |
|---|--|
| 1) Cabeça de corte; | 7) Macacos hidráulicos de torque; |
| 2) Anel de escombros; | 8) Transportador de correia da TBM; |
| 3) Escudo frontal; | 9) Escudo do sistema de garras; |
| 4) Estabilizadores (diminuição de vibrações); | 10) Garras do sistema de propulsão; |
| 5) Escudo telescópico; | 11) Macacos hidráulicos auxiliares de propulsão; |
| 6) Macacos hidráulicos de propulsão principais; | 12) Erector de segmentos. |

- **Suporte Imediato**

O suporte imediato à escavação oferecido por esta tuneladora é efectuado por dois escudos formados por aros metálicos ao qual é ligada a cabeça de corte à semelhança da *Single Shield TBM*. Esta divisão de compartições permite além do suporte periférico, garantir a segurança na retaguarda da cabeça de corte através da separação desta do restante corpo da TBM. É no entanto necessário referir que, em ambos os casos, o acesso à cabeça de corte e à frente de escavação é garantido por aberturas criadas para o efeito. Na Figura 3.17 é possível visualizar tanto os dois escudos como a separação destes em relação à cabeça de corte e o rolamento da cabeça de corte. Esta tuneladora é por vezes denominada também como *Telescopic Shield TBM*, devido à existência de um escudo que funciona dentro dos escudos principais por forma a garantir a segurança entre cada ciclo dos sistemas de propulsão. Cada um dos sistemas promove o deslocamento de um dos escudos tornando-se assim necessário colmatar o espaçamento gerado entre eles. A Figura 3.18 é um esquema que representa exactamente essa situação. O escudo da frente alberga a cabeça de corte e a unidade de tração desta (*Main Drive*), sob o escudo telescópico encontram-se os macacos hidráulicos de propulsão, os macacos hidráulicos de torque e o transportador de correia e por fim no segundo escudo está instalado o sistema de garras e macacos hidráulicos auxiliares de propulsão.



Figura 3.17 – Escudos e rolamento de uma *Double Shield* TBM construída para a escavação do túnel hidráulico de 18 Km da Barragem de Srisailam, Índia, 2008 (Herrenknecht AG).

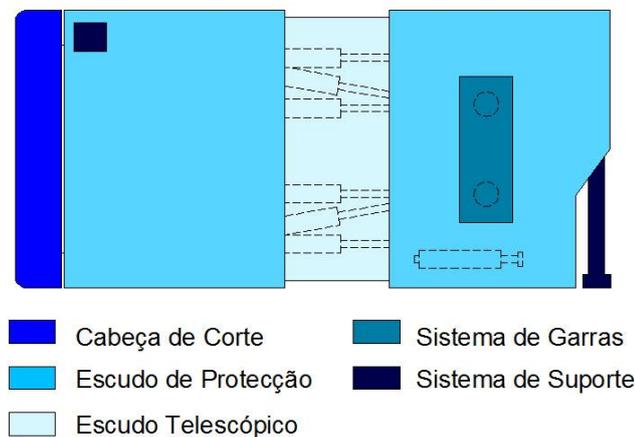


Figura 3.18 – Esquema dos escudos da *Double Shield* TBM.

• Propulsão

A propulsão nestas TBMs é algo exclusivo a elas mesmas, visto que é a única tuneladora, que quando na presença de um maciço competente, a sua escavação não tem ciclos aparentes, isto é, é possível escavar sem haver a necessidade de parar trazendo assim ao empreendimento uma performance de escavação muito boa. Como mencionado em cima, a força necessária fornecer à cabeça de corte para que esta escave a rocha é, neste caso, fornecida ou por um sistema de macacos hidráulicos ou por um sistema de garras ou pelos dois alternadamente. O sistema de macacos hidráulicos é constituído por um conjunto principal de propulsão radialmente distribuídos e instalado sob o escudo telescópico, um conjunto auxiliar também radialmente distribuído mas menos denso na retaguarda da unidade de garras, que actuam nas aduelas de suporte final em simultâneo com os macacos hidráulicos principais, e por macacos hidráulicos de torque instalados no primeiro escudo, que tem como objectivo travar o movimento de rotação da máquina provocado pela rotação da cabeça de corte contra o maciço. Quando os macacos hidráulicos chegam ao seu limite de extensão entra em

funcionamento o sistema de garras, sendo o seu método de funcionamento semelhante ao de uma *Gripper* TBM. Nesta altura os macacos auxiliares retraem por forma a se proceder à instalação das aduelas de suporte final e os macacos principais retraem à medida que o segundo escudo se aproxima do primeiro. Quando o sistema de garras completar o seu ciclo, volta a entrar em funcionamento o primeiro sistema, tornando assim a escavação num processo contínuo. Deve ser realçado que uma vez mais esta conjugação de métodos só é possível num maciço competente, pois quando este não é o caso irão haver problemas associados ao sistema de garras como anteriormente foi referido. Na Figura 3.19 é possível ver o pormenor dos macacos de propulsão entre os dois escudos, estando aqui a descoberto sem o escudo telescópico. A condução desta tuneladora é efectuada exclusivamente pelos macacos de propulsão colocados em “V” na ligação dos dois escudos. A pressão exercida por estes é continuamente controlada por forma a efectuar o correcto posicionamento da máquina como fornecer a força necessária à cabeça de corte.

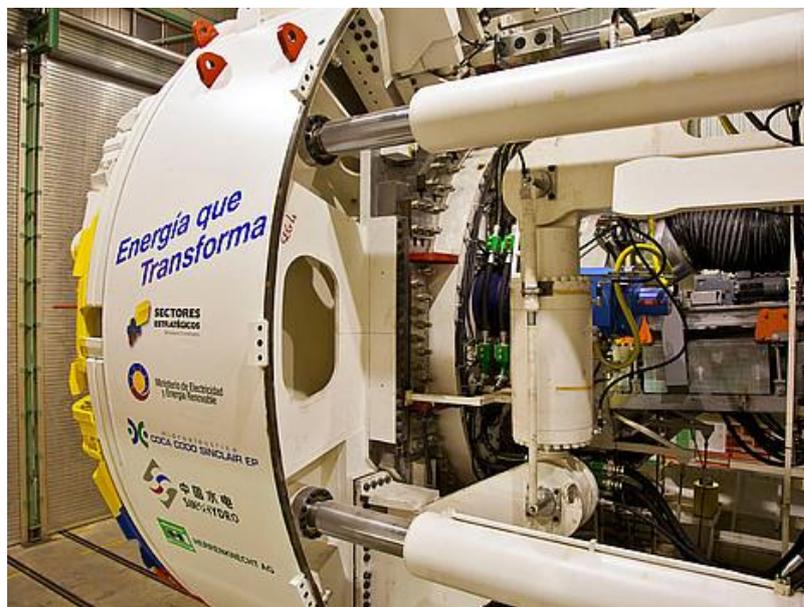


Figura 3.19 – Sistema de propulsão de uma das duas Double Shield TBM construídas para a abertura de um túnel hidráulico em São Miguel, Equador, 2012 (Herrenknecht AG@, 2014).

- **Cabeça de Corte**

O funcionamento da cabeça de corte de uma *Double Shield* TBM é em tudo idêntico ao de uma *Single Shield* TBM, apresentada no ponto 3.2.1.

- **Ferramentas de Corte**

Mais uma vez, também as ferramentas de corte utilizadas na cabeça de corte de uma *Double Shield* TBM seguem o princípio e as especificações das utilizadas numa *Single Shield* TBM. Estas ferramentas devem ser escolhidas dependendo das características do maciço, tendo em conta a sua resistência, o seu grau de alteração, abrasividade entre outros.

4 TUNELADORAS PARA SOLO

A escavação de túneis em maciços terrosos ou mesmo maciços rochosos altamente alterados é uma das tarefas mais complexas dentro das obras subterrâneas. Ao contrário do que acontece com a escavação em rocha, aqui a maior dificuldade prende-se não com a escavabilidade do maciço mas sim com problemas de estabilidade e com a consequente necessidade de suportar o maciço escavado. A possível existência de água, a baixa capacidade resistente do maciço e o subsequente diminuto tempo de auto-sustentação, são por norma os problemas presentes e mais relevantes neste tipo de obra. Além das dificuldades de execução de uma escavação subterrânea num maciço deste género, como a propensão do solo colar na cabeça de corte da TBM, a existência de gases, quando o maciço é rico em matéria orgânica, a necessidade de fornecer à escavação suporte tanto periférico como frontal antes da colocação do suporte final, existem ainda outras dificuldades relacionadas com a localização da obra. Normalmente sobre este tipo de maciços, e para projectos de infra-estruturas (metros, esgotos, tuneis para abastecimento de água, etc.), encontram-se zonas urbanas, que levam ao aumento da exigência de cuidados que se prendem por exemplo com a sobrecavação, assentamentos, vibrações, rebaixamento do nível freático, subsidências. Na Figura 4.1 pode-se ver um exemplo de subsidência em zona urbana, provocada pela escavação de um túnel utilizando uma TBM. No caso estavam a ser utilizadas duas tunneladoras do tipo *Mixshield*, apresentadas de seguida, para escavar o Túnel Brightwater, em Seattle, Washington, EUA no ano de 2009. Julga-se que a causa do sucedido se deveu à sobrecavação efectuada pelas TBMs (TunnelTalk@, 2009).



Figura 4.1 – Subsidência devido à abertura de um túnel (TunnelTalk@, 2009).

4.1 Tuneladoras para Solo ou para Rocha Muito Alterada e/ou Abaixo do Nível Freático

Existem vários tipos de tuneladoras, que fazem uso de diferentes tecnologias, para a escavação deste tipo de túneis. Estas tuneladoras, apesar de o método de escavação ser semelhante às das anteriormente apresentadas e os princípios fundamentais das suas tecnologias serem de fácil compreensão, a sua construção e funcionamento são substancialmente mais complexos. De acordo com o apresentado no Quadro 2.1 as tuneladoras indicadas para este tipo de maciço, devido ao facto de poderem fornecer suporte periférico e frontal são as *Earth Pressure Balance* TBMs, as *Slurry Face* TBMs e as *Mixshields* TBMs caracterizadas no presente capítulo no que toca ao tipo de suporte imediato que fornecem e suas características, ao seu sistema de propulsão, às características da cabeça de corte e ao seu sistema de remoção de escombros.

4.1.1 *Earth Pressure Balance* TBM

Como referido, em escavações de maciços moles ou solos coesivos, há que garantir, por motivos de segurança e executabilidade, o fornecimento de suporte imediato em todas as faces de escavação, periféricas e frontal. A tecnologia das tuneladoras EPB, também designadas EPBMs (*Earth Pressure Balance Machines*), faz uso do material escavado, tornando-o num solo maleável e denso através da injeção de água e/ou aditivos sobre pressão na câmara estanque (plenum) imediatamente atrás da cabeças de corte, para suportar a frente de escavação. O nome desta tuneladora advém daí mesmo, da pressão gerada na frente de escavação pela mistura água/solo mantida no plenum. Esta pressão é garantida/controlada fazendo variar a quantidade de mistura retirada do plenum, pelo “sem-fim”, bem como pela pressão efectuada pelo sistema de propulsão na frente de escavação. É no entanto de extrema importância o controlo contínuo desta pressão por forma a garantir tanto a estabilidade da face de escavação como a não existência de subsidências à superfície. Na Figura 4.2 é possível ver os testes de funcionamento de uma EPBM.



Figura 4.2 – Teste de funcionamento da tuneladora construída pela Seli-Kawasaki para o metro de Copenhaga (Tunneltalk@, 2012).

Por forma a melhor compreender a descrição desta TBM efectuada de seguida, na Figura 4.3 apresenta-se um esquema tridimensional dos principais componentes mecânicos desta tuneladora. É de salientar que este esquema é meramente ilustrativo, podendo os elementos mecânicos e sua disposição variar de acordo com cada fabricante.

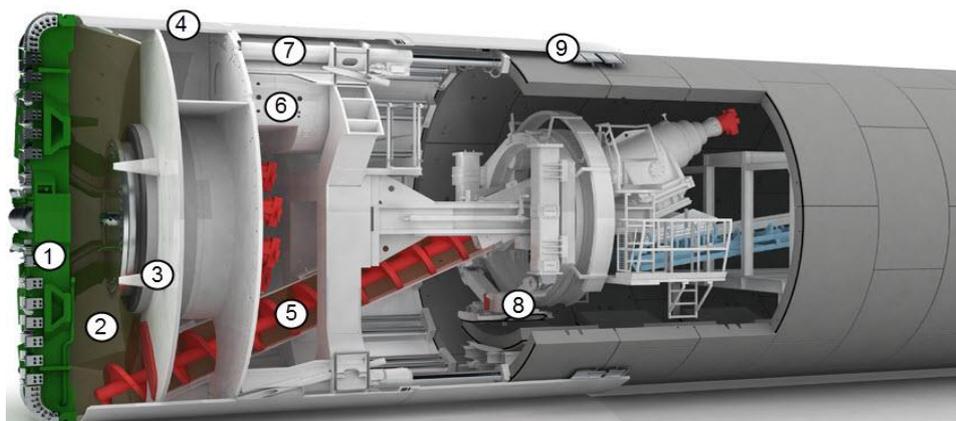


Figura 4.3 – Esquema tridimensional de uma tuneladora EPB (adaptado Herrenknecht AG@, 2014).

LEGENDA:

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1) Cabeça de corte; | 6) Câmara hiperbárica; |
| 2) Câmara de estanque (plenum); | 7) Macacos hidráulicos de propulsão; |
| 3) Braços misturadores; | 8) Erector de segmentos; |
| 4) Escudo; | 9) Sistema de isolamento do escudo. |
| 5) “Sem-fim”; | |

• **Suporte Imediato**

Como já referido é de extrema importância o fornecimento de suporte imediato aquando da escavação de túneis em maciços de baixa capacidade resistente. O suporte periférico gerado pelas EPBMs deve-se, à semelhança das tuneladoras apresentadas anteriormente, à custa de um escudo circular rígidos que envolve o corpo da tuneladora. Existe no entanto uma pequena diferença que se prende com o facto de esta utilizar água e espumas sobre pressão e mantendo o material escavado dentro da câmara de escavação para garantir o suporte da face de escavação. O suporte final é colocado ainda dentro do escudo existindo uma membrana que garante a selagem entre o exterior e o interior do túnel e máquina. Esta selagem é efectuada por elementos denominados de “*Wire Brushes*” que estão acoplados ao escudo da máquina e que actua entre este e as aduelas. Esta é a única selagem necessária, periféricamente, visto que, como mais à frente será explicado, as aduelas garantem a impermeabilização do interior do túnel. No que toca ao suporte frontal este é em tudo diferente às restantes TBMs apresentadas atrás, as quais apenas ofereciam o suporte gerado pela cabeça de corte aquando da escavação. Neste caso o processo de suporte é substancialmente mais complexo com o intuito de ser assim também mais eficaz. O pressuposto desta técnica é gerar um campo de pressões que tenta substituir na íntegra o material escavado, isto é, a escavação é feita com o

intuito de que o maciço não se “aperceba” que esta está a acontecer. Estas pressões são obtidas mantendo e controlando a quantidade de material escavado dentro do plenum bem como a pressão exercida na frente de escavação gerada pelo sistema de propulsão da TBM. A Figura 4.4 ilustra exactamente os diagramas das pressões referidas.

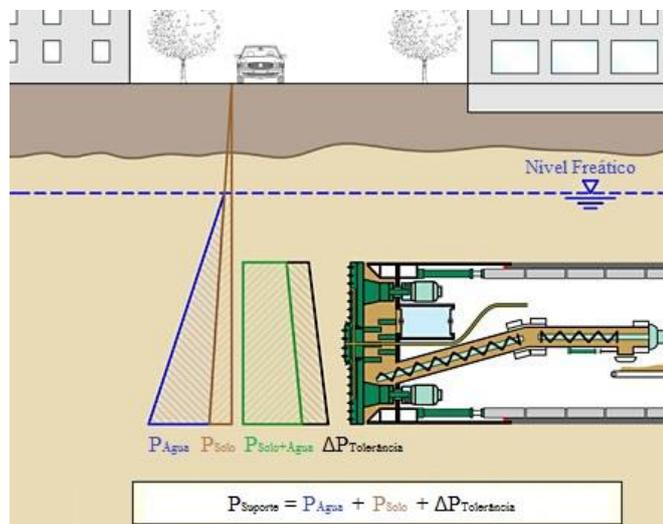


Figura 4.4 – Diagramas esquemáticos das pressões do solo, hidrostática e pressão de suporte de uma EPBM (adaptado de facesupport@, 2012).

Esta técnica leva geralmente à utilização de espumas e aditivos. As espumas têm a função de facilitar o confinamento, a escavação e a extracção de escombros. Os aditivos são utilizados por forma a diminuir a propensão do solo a colar na cabeça de corte o que acontece normalmente quando se escava argilas, conferir efeitos de coesão quando perante solos não coesivos, controlo de viscosidade e agentes anti-abrasivos quando perante solos muito abrasivos ou maciços rochosos para desta forma a diminuir o desgaste das ferramentas de corte, da cabeça de corte e do sem-fim que efectua a extracção dos escombros. Esta mistura permite também a utilização de forças de torque inferiores a transmitir à cabeça de corte. É possível também a adição de bentonite e/ou partículas finas que servem de suporte às espumas e aditivos adicionados, isto é, conferem à mistura partículas finas quando estas são em pequena quantidade no solo escavado. Isto, juntamente com aditivos, diminui também a permeabilidade do maciço para que não haja perda de fluídos e consequente perda de pressão que poderia levar a problemas de estabilidade.

Os escombros são então misturados com a água, espumas e aditivos, ver Figura 4.5, por meio de pás mecânicas, sendo continuamente controladas as características e quantidade de mistura na câmara de escavação, controlando assim a pressão que está a ser exercida. De referir que esta pressão é verificada por sensores instalados na cabeça de corte e controlada através da quantidade de escombros retirados da câmara pelo “sem-fim”. A mistura deverá então criar uma pressão igual à pressão do solo mais a pressão hidrostática quando a escavação decorre abaixo do nível freático.



Figura 4.5 – Solução de água e espumas utilizada numa EPBM (TunnelTalk@ 2009).

As espumas e aditivos utilizados são escolhidos de acordo com as propriedades do solo a escavar (AFERNAC, 2005). No Quadro 4.1 são apresentadas possíveis utilizações de tipos de espumas e aditivos de acordo com o solo a escavar. As espumas utilizadas em tuneladoras dividem-se em três tipos: Tipo A - alta capacidade de dispersão, com o intuito de quebrar as ligações das argilas, e/ou boa capacidade de revestimento das partículas de argila por forma a reduzir efeitos de empolamento; Tipo B - uso geral, com estabilidade média; Tipo C - propriedades de alta estabilidade e anti-segregação por forma a desenvolver e manter um solo coesivo o mais impermeável possível.

Quadro 4.1 – Tipos de espumas e aditivos a utilizar nas EPBMs para os diferentes tipos de solo (EFERNAC, 2005).

Solo	Tipos de Espuma				Aditivos Poliméricos
	A	B	C	FIR	
Argila	X			30-80	Polímero anti-entupimento
Argila Arenosa	X	X		40-60	Polímero anti-entupimento
Silte					
Areia		X		20-40	Polímero para control de consistência
Silte Argiloso					
Areia		X	X	30-40	Polímero para controlo de consistência e falta de coesão
Gravilha Argilosa			X	25-50	Polímero para controlo de consistência e falta de coesão
Gravilha Arenosa			X	30-60	Polímero para controlo de consistência e falta de coesão

Para utilizar estas espumas são necessários alguns conhecimentos básicos sobre parâmetros a esta ligados, como a sua concentração em solução aquosa, o seu rácio de expansão (FER) e o rácio de injeção (FIR). A concentração da solução de espuma (C_F) varia normalmente entre 0,5% e 5,0%, devendo estas de acordo com as indicações do fabricante, e depende da quantidade de água injectada e da água presente no solo. Esta concentração pode ser obtida a partir Equação 1 abaixo:

$$C_F = \frac{m_{\text{Surfactante}}}{m_{\text{Solução}}} \times 100 \quad (1)$$

sendo C_F a concentração do surfactante, assumam-se agente gerador de espuma, na água, $m_{\text{Surfactante}}$ a massa do surfactante e $m_{\text{Solução}}$ a massa da solução. O rácio de expansão da espuma (FER) deve-se localizar entre 5 e 30 (AFERNAC, 2005). Quanto maior o FER e mais húmido o solo, respectivamente, mais seca irá e deverá ser a espuma e vice-versa. Este rácio é também de simples obtenção através da Equação 2 que se segue:

$$\text{FER} = \frac{V_{\text{Espuma}}}{V_{\text{Solução}}} \quad (2)$$

sendo FER, como referido, o rácio de expansão da espuma, V_{Espuma} o volume da espuma à pressão de trabalho, assumam-se pressão dentro da câmara de escavação e $V_{\text{Solução}}$ o volume da solução. É necessário ter presente também a noção de rácio de injeção da espuma (FIR). Este pode variar entre 10% e 80%, sendo habitual utilizar valores entre 30% e 60% (AFERNAC, 2005). A determinação do valor de FIR mais adequado a uma escavação é efectuada através de testes laboratoriais, sendo a quantidade de água existente no solo e a água injectada os aspectos principais a ter em conta nestes testes. A Equação 3 dá o valor de FIR como apresentado de seguida:

$$\text{FIR} = \frac{V_{\text{Espuma}}}{V_{\text{Solo}}} \times 100 \quad (3)$$

sendo FIR, como referido, o rácio de injeção da espuma, V_{Espuma} o volume da espuma à pressão de trabalho, assumam-se pressão dentro da câmara de escavação e V_{Solo} o volume de solo a escavar *in situ*. É importante ter em conta que os testes realizados, apesar de complexos e completos, apenas fornecem indicações iniciais sobre as soluções de espuma e/ou espuma e aditivos. Para que os valores sejam o mais aproximado possível à realidade *in situ* há que utilizar solo da zona de escavação e tentar aproximar ao máximo as condições geradas pela TBM.

- **Remoção de Escombros**

O sistema de remoção de escombros da câmara de escavação faz, como mencionado anteriormente, parte do sistema de suporte imediato frontal gerado pela EPBM. A quantidade de material retirado da câmara está directamente relacionado com a pressão exercida na face de escavação. Assim este sistema é mais complexo do que os apresentados para as TBMs anteriores, havendo a necessidade tanto de controlar a quantidade de material exacta que se retira da frente bem como manter a pressão na câmara. Este sistema é composto por um helicóide, vulgo parafuso “sem-fim”, que funciona dentro de uma câmara que está à pressão da câmara de escavação – Figura 4.6. A quantidade de escombros retirados da câmara de escavação é controlada através da variação da velocidade do “sem-fim”. Os escombros são então depositados em correias de transporte para assim serem retirados para o exterior do túnel.



Figura 4.6 – Montagem do “sem-fim” da EPBM construída para a escavação de um túnel da Australia’s Anglo-American Coal Mine (trenchlessonline@, 2014).

- **Propulsão**

A propulsão necessária para a penetração da cabeça de corte da EPBM na face de escavação é gerada por macacos hidráulicos que actuam directamente nas aduelas colocadas no final de cada ciclo de escavação. Estes macacos fazem parte do corpo da TBM, estando colocados radialmente no interior do escudo de suporte periférico imediatamente atrás da câmara de escavação. Seguindo a linha dos componentes da EPBM referidos atrás, também aqui a propulsão não tem a função única de propulsionar a máquina para a frente, isto é, a pressão exercida na frente de escavação depende também do sistema de propulsão de uma EPBM, sistema este que tem que ser continuamente vigiado por forma a evitar a penetração descontrolada no solo ou entrada de solo em excesso, devido à sobrescavação, na câmara de escavação que pode gerar alguns acidentes como referindo no início deste ponto. Na Figura 4.7 é possível ver estes macacos a actuarem contra as aduelas do túnel.



Figura 4.7 – Macacos hidráulicos de uma EPBM a actuar no suporte final do túnel (evergreenline@, 2014).

- **Cabeça de Corte e Ferramentas de Corte**

As ferramentas de corte a incorporar na cabeça de corte de uma EPBM depende, como nas outras TBMs, do tipo de maciço a escavar. Sendo tuneladoras dedicadas a escavação de túneis em maciços menos resistentes, como por exemplo maciços terrosos, são utilizados frequentemente menos discos de corte e mais ferramentas de corte adequadas à escavação de solo como as “*cutting knives*”, os “*grippers*” e os “*scrappers*” apresentados anteriormente.

A cabeça de corte de uma EPBM é ligeiramente diferente das restantes tuneladoras, isto deve-se à necessidade de utilização de sensores indicadores da pressão na frente de escavação sendo estes absolutamente necessários e não facultativos. A existência de injectores de espumas e aditivos são aqui também obrigatórios pois são parte essencial à técnica das EPBMs, sendo que nas TBMs abertas a utilização de água e aditivos é facultativo, fazendo uso destes essencialmente para controlo de poeiras ou na tentativa de diminuição de desgaste das ferramentas de corte.

A cabeça de corte de uma EPBM tem que ser também mais aberta que de uma tuneladora que não oferece suporte frontal, ou seja, o rácio entre a secção aberta da cabeça de corte e a secção de escavação. Este rácio tem influência directa tanto na pressão exercida na frente como no suporte mecânico oferecido pela cabeça de corte. Numa EPBM este rácio varia entre 20% e 35% sendo que a efectividade do suporte de uma EPB se baseia na mistura escombros/espuma/água acumulados na câmara de escavação (Pelizza, 2011). Existem quatro tipos de cabeças de corte possíveis de instalar numa EPBM, estas diferenças prendem-se essencialmente com o fabricante da tuneladora, sendo que cada um defende o seu ponto de vista em termos de performance mas também em termos económicos. Na Figura 4.8, são apresentados esquemas deste tipo de cabeças de corte.

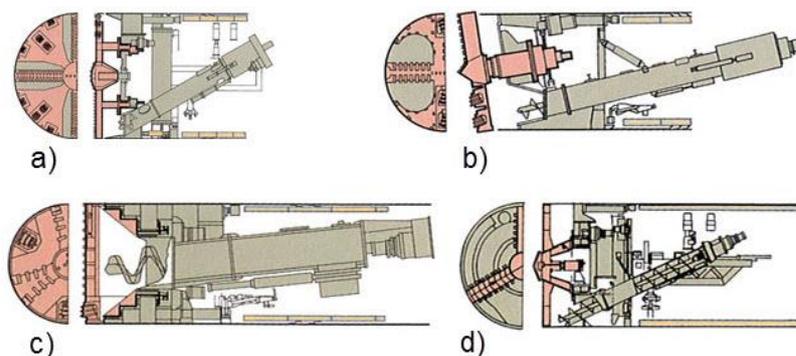


Figura 4.8 – Tipos de cabeça de corte utilizados nas EPBMs: a) Sistema de suporte de corte intermédio; b) Sistema de suporte de corte de eixo central; c) Sistema de suporte de corte de tambor central; d) Sistema de suporte de corte de cone central (JSCE, 1996).

É no entanto importante referir que dentro destas diferenças de patentes, existem diferenças a realçar. As tuneladoras com sistema de suporte de corte de eixo central, fazem uso de uma pequena inclinação da cabeça de corte por forma a aumentar a estabilidade da face escavada

sendo a sua rotação garantida não por um rolamento como é usual mas por um eixo. Além disso o seu “sem fim” é de maior dimensão que o usual e no seu plenum poderão ser instalados trituradores de “mandíbula” e de “tambores” para triturar possíveis escombros de maiores dimensões. Uma outra diferença de relevante importância, neste caso nas tuneladoras com sistema de suporte de corte com tambor central, é a sua ampla câmara de escavação e a dimensão do “sem-fim” utilizado para remover os escombros desta câmara que como se pode verificar no esquema é consideravelmente superior aos das restantes. Estas diferenças prendem-se com o destino de utilização desta EPBM ser diferente das de mais. Estas tuneladoras foram criadas para escavar solos complexos com falta de finos ou água para uma EPBM ou solos demasiado grossos para uma *Slurry Shield* TBM. Nestas tuneladoras é injectado na câmara de escavação uma lama densa denominada de “lodo” em vez de espumas ou bentonite, sendo então denominada frequentemente por EPB “*High-density Slurry Machine*” (FHWA, 2013). São também utilizados aqui trituradores de “mandíbula” e de “tambores”.

Um outro componente muito importante nestas tuneladoras é a câmara hiperbárica. Esta câmara é de toda a importância pois na necessidade de trocar as ferramentas de corte, que se faz a partir da parte de trás da cabeça de corte, é fulcral manter a câmara de escavação pressurizada por forma garantir a estabilidade da frente de escavação. Nesta situação é diminuído o volume de mistura solo/água/espuma nesta câmara, sendo esse volume substituído por ar pressurizado. Para que os operários possam trabalhar numa atmosfera pressurizada é necessário ambientar o seu corpo a esta atmosfera, ou seja, efectuar a compressão, bem como para sair desta é necessário passar por um processo de decompressão. Estes processos são efectuados dentro de uma câmara hiperbárica que garante assim tanto a integridade física, em termos de pressões, dos operários, bem como a estabilidade da face de escavação. Na Figura 4.9 é possível ver uma câmara hiperbárica construída para ser utilizada numa tuneladora.



Figura 4.9 – Câmara hiperbárica tipo a instalar numa tuneladora (2014, TunnelTalk.com).

- **Suporte Final**

A colocação de suporte final é nesta técnica também um elemento obrigatório, não só para fornecer uma zona de actuação ao sistema de propulsão, mas também como elemento constituinte da técnica em si. A colocação de aduelas no interior do escudo da EPBM, permite a impermeabilização do interior do túnel garantindo assim a segurança dos trabalhadores mas também impedindo o desabamento do maciço que se tem como pouco competente periférica e frontalmente, pois caso não fosse garantida esta impermeabilização não era possível efectuar a pressurização da frente de escavação provocando que todos os fluidos, devido à pressão, convergissem para o interior do túnel e da EPBM. A Figura 4.10 mostra o suporte final do Túnel “Alaskan Way Viaduct”, Seattle, EUA.



Figura 4.10 – Suporte final do Túnel “Alaskan Way Viaduct”, Seattle, EUA (WSDOT, 2014).

4.1.2 *Slurry Shielded* TBM

As *Slurry Shield* TBMs ou *Slurry Face Machines* (SFM) ou ainda *Hydro Shield* TBMs são, bem como as EPBMs, os tipos de tuneladoras mais utilizadas para escavação de túneis em maciços terrosos variando a sua aplicabilidade com o tipo de solo a escavar, como será explicado mais à frente. Este tipo de tuneladoras é no entanto de funcionamento e construção mais complexo que as EPBMs devido ao seu sistema de pressurização da face de escavação. Este sistema consiste em injectar e pressurizar bentonite na câmara de escavação fornecendo assim o suporte necessário tanto para a estabilização da face de escavação como para evitar a penetração descontrolada da tuneladora. O sistema de abastecimento e remoção, respectivamente de bentonite e da mistura bentonite/escombros é deveras complexo visto ser necessário garantir em permanência a pressurização da câmara de escavação e requer a construção de uma grande rede de tubaria bem como uma central para a preparação da bentonite como para o tratamento da mistura retirada da frente de escavação.

- **Suporte Imediato**

O suporte periférico imediato gerado por uma SFM deve-se ao seu escudo circular que sustém os hasteais e tecto da escavação promovendo assim a segurança tanto da máquina como do pessoal que nela trabalha. À semelhança das EPBMs, devido ao suporte frontal se dever à pressurização da frente, também nas SFMs existe um mecanismo de selagem, a funcionar entre o escudo e o suporte final, que impermeabiliza o interior da tuneladora.

A pressurização da frente de escavação de uma SFM é proporcionada pela injeção de uma “lama” na câmara de escavação que se irá misturar com o material escavado servindo assim de suporte a frente, facilitando a extracção do material escavado e a lubrificação e arrefecimento das ferramentas de corte. A pressão na frente é controlada regulando o fluxo de injeção de bentonite e o fluxo de extracção da mistura escombros/bentonite. Esta “lama” é criada em tanques instalados à superfície e depois bombeada para o interior do túnel até à tuneladora pela rede de abastecimento de lama sendo depois bombeada, agora juntamente com escombros, para o exterior da câmara de escavação e para o exterior do túnel de volta à central de lamas – ver Figura 4.11. Nesta central além da criação de lamas, é efectuada a reciclagem da mistura retirada da frente de escavação através de processos mecânicos como agitadores, hidrociclones, centrifugadores entre outros equipamentos. Após o processo de reciclagem destas lamas é necessário controlar os valores de densidade, pH, perda de água, viscosidade plástica, a existência de sólidos e o mais importante o seu rendimento, sendo por vezes necessário retractor as lamas, isto é, aplicar processos de diluição da lama, adição de nova bentonite e/ou aditivos como polímeros, estabilizadores de pH entre outros.



Figura 4.11 – Estação de tratamento de lamas da SFM construída para escavar o Túnel “Water Lee” sob o rio Tamisa para o projecto “Crossrail”, Londres, Reino Unido (MS SA@, 2014).

O processo de funcionamento desta lama baseia-se na criação do chamado “bolo de lama” que consiste numa fina membrana entre o solo e a lama que é formada pela segregação da água da

lama devido às pressões instaladas. Este bolo de lama é o responsável pela estabilização da frente de escavação e para o seu sucesso é necessário que este seja de baixa permeabilidade e sejam mantidas as pressões dentro da câmara de escavação. A performance deste “bolo de lama” está directamente ligada às propriedades da lama sendo por isso necessário realçar a importância do correcto tratamento destas.

A qualidade das lamas pode ser afectada por contaminação através de sólidos existentes no solo como por elementos químicos como sulfatos solúveis ou sais de cálcio (EFERNAC, 2005). Estes elementos provocam a floculação da lama fazendo que esta perca as suas características essenciais aumentando a sua viscosidade ou perda de água por exemplo. Na criação das lamas o produto principal é como referido a bentonite, com concentrações entre 60% e 80%, sendo adicionados por vezes aditivos por forma a aumentar o rendimento destas.

A bentonite é uma forma processada de minerais de argila de grão muito fino – ver Figura 4.12. O mineral principal é a montmorilonite associada a pequenas quantidades de quartzo, micas, feldspato, calcite entre outros. A bentonite ocorre naturalmente em forma Sódica ou Cálcica, normalmente por alteração de cinzas vulcânicas, sendo que a bentonite sódica com a sua grande capacidade de expansão quando molhada é a mais utilizada em lamas bentoníticas, vulgo lamas. A bentonite cálcica pode ser tratada quimicamente por forma a satisfazer as características para utilização em lamas. As características da lama a utilizar num dado projecto devem ser definidas de acordo com as características geológicas do solo a escavar e mantidas e controladas por um especialista da área, um engenheiro de lamas.



Figura 4.12 – Bentonite sódica utilizada nas SFMs (AMCOL®, 2014).

Existem vários aditivos que podem ser utilizados para melhorar as propriedades reológicas das lamas bentoníticas. A escolha dos aditivos a utilizar depende essencialmente das características geológicas do solo a escavar. Quando o solo tem um elevado teor em sal um dos polímeros mais utilizados, por forma a diminuir a sensibilidade da bentonite ao sal, é o CMC e para solos ricos em argila utilizam-se polímeros para diminuir a dispersão da argila, isto é, a sua floculação. Geralmente os polímeros são utilizados com o intuito de aumentar a

performance das lamas em termos de tensões e viscosidade. Alguns tipos de polímeros utilizados são os Bio-polímeros, CMC (Carboximetilcelulose), PAC (Policloreto de Alumínio) e a Poliacrilamida.

- **Remoção de Escombros**

A remoção de escombros da câmara de escavação é efectuada através de bombagem da mistura escombros/lama para o exterior, seguindo a rede de abastecimento e remoção de lamas até à central de tratamento de lamas.

Como mencionado anteriormente a quantidade de lama extraída tem que ser continuamente verificada e regulada por forma a manter a pressurização desejada na frente de escavação.

- **Cabeça de Corte**

Numa SFM, a cabeça de corte é semelhante à de uma EPBM, havendo também necessidade de ser mais aberta que de uma tuneladora que não oferece suporte frontal (Figura 4.13). No entanto o rácio entre a secção aberta da cabeça de corte e a secção de escavação é substancialmente superior podendo ser superior a 50% (Pelizza, 2011). Tal deve-se à necessidade de facilitar a formação do “bolo de lama” entre a lama e a face de escavação.



Figura 4.13 – “Mary”, a SFM contruída para a escavação do Túnel “Water Lee” sob o rio Tamisa para o projecto “Crossrail”, Londres, Reino Unido (TunnelTalk@ 2013).

Estão patenteados três tipos de cabeças de corte para uma SFM e à semelhança do que acontece com as EPBMs também estas diferenças se prendem essencialmente com o fabricante da tuneladora. Na Figura 4.14, apresentada abaixo, são apresentados esquemas deste tipo de cabeças de corte.

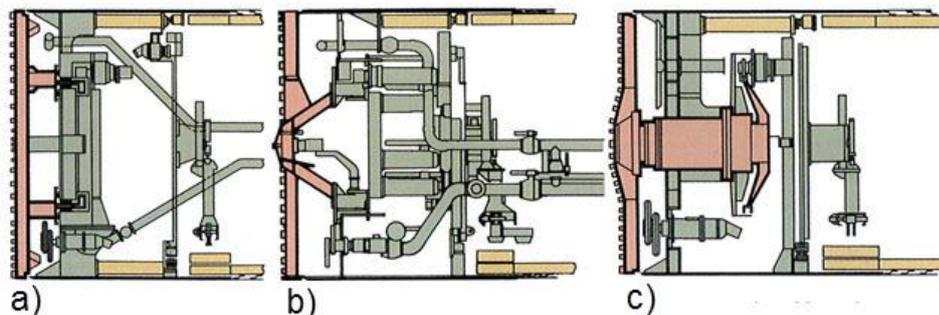


Figura 4.14 – Tipos de cabeça de corte utilizados nas SFMs: a) Sistema de suporte de corte intermédio; b) Sistema de suporte de corte de cone central c) Sistema de suporte de corte de eixo central (JSCE, 1996).

- **Propulsão, Suporte Final e Ferramentas de Corte**

A propulsão de uma SFM é realizada por macacos hidráulicos que trabalham axialmente actuando no suporte final colocado pelo “erector” da tuneladora dentro do escudo desta. Em relação às EPBMs a grande diferença é exclusivamente mecânica pois o “erector” na EPBM funciona em torno do “sem-fim” e nas SFM este não existe. Na Figura 4.15 é possível ver a colocação de um segmento num dos túneis do projecto “Crossrail”, Londres, Reino Unido.

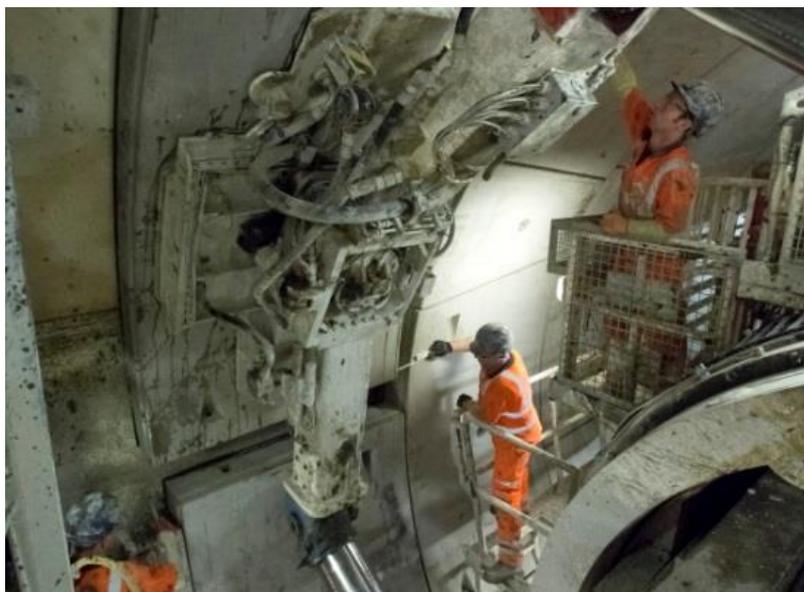


Figura 4.15 – Colocação de um segmento do suporte final (Crossrail Ltd@, 2013).

Neste tipo de tuneladoras as ferramentas de corte são semelhantes às de mais com a excepção da possibilidade de integrar trituradores de rocha, como os referidos para as EPB “High-density Slurry Machine”. Estes dispositivos permitem desmantelar pedaços de rocha maiores que poderiam entupir o sistema de remoção de escombros. Na Figura 4.16 é possível ver tanto um triturador de “mandíbula” como um triturador de “tambor”.



Figura 4.16 – Trituradores de “Mandíbula” e de “Tambor” (Herrenknecht AG@, 2014).

4.1.3 *Mixshield* TBM

A complexidade geológica dos maciços é provavelmente o elemento mais relevante no que toca à escolha de uma tuneladora. A existência de maciços heterogêneos, ou a presença de água num maciço leva por vezes à incapacidade de escavar um túnel com apenas uma das tecnologias apresentadas neste capítulo. Tal levou à criação de uma tuneladora que combine duas, e mais recentemente, três das tecnologias apresentadas. Quando se está perante um maciço rochoso a escolha da tuneladora para a escavação de um túnel recairia sobre uma Open TBM ou tuneladora de suporte periférico no caso de a rocha ser ligeiramente alterada, mas se a obra tiver que ser executada abaixo do nível freático é necessário recorrer a uma tuneladora que forneça suporte frontal e consequente impermeabilização do interior da máquina e do túnel o que as TBMs referidas não são capazes de fornecer. Esta combinação de factores, bem como outras, são o que a escavação de um túnel pode enfrentar. Como tal foram criadas as *Mixshield* TBMs, tuneladoras de escudo misto, desenhadas com o intuito de ultrapassar as problemáticas da heterogeneidade dos maciços e da sua reologia. Abaixo serão apresentadas as duas configurações possíveis desta mistura de tecnologias bem como a mais recente inovação da empresa Herrenknecht AG que combinada numa tuneladora três modos de escavação.

- **EPBM e *Open* TBM**

Uma das combinações de técnicas é a união da tecnologia de uma EPBM com a de uma Open TBM. Esta união de características permite avançar por entre maciços de elevada heterogeneidade ou mesmo maciços rochosos havendo presença de água.

A não necessidade de em parte do alinhamento do túnel ter que fazer uso da tecnologia EPB, ou por que o maciço é mais resistente ou deixou de existir água no maciço naquele trecho, podendo-se avançar a escavação apenas fornecendo suporte periférico, irá diminuir os custos da obra em larga escala. Se houver conhecimento da existência destes trechos mais favoráveis à escavação, o que se irá poupar com a execução, menor ou mesmo a não utilização da

mistura água/espumas de aditivos, melhor e mais fácil executabilidade da escavação, menor gasto de energia, entre outros, poderá compensar o investimento numa *Mixshield* TBM. Estas tuneladoras são optimizadas de acordo com a geologia do maciço, dependendo se por exemplo o este é composto por mais ou menos rocha dura ou solo. Esta optimização depende das patentes de cada empresa, mas essencialmente prende-se com a capacidade de a tuneladora escavar com frente pressurizada, sem pressurização da frente mas mantendo a utilização de espumas, tendo esta questão a ver com a reologia do maciço, ou sem a utilização de qualquer mistura na câmara de escavação (*Open Face*), sendo assim necessário projectar os componentes que compõe a TBM para os diferentes modos de utilização. Nesta situação é necessário que o sem fim esteja habilitado a trabalhar com ou sem pressurização, que este possa funcionar em velocidades mais elevadas ou a existência de um transportador de correia com anel de escombros retráctil para o modo aberto, do tipo e número de cada ferramentas de corte a instalar na cabeça de corte, o rácio de abertura da cabeça de corte entre outras alterações. A Figura 4.18 representa um esquema da junção destas tecnologias no que toca à remoção de escombros do plenum, pressupondo um sem fim a funcionar pressurizado quando no modo EPB e um transportador de correia com anel de escombros retráctil para o modo de frente “aberta”.

- **SFM e Open TBM**

As *Mixshields* TBMs que combinam a tecnologia SF e OF, não são mais do que uma SFM mais avançada. Estas tuneladoras permitem controlar com elevada precisão a pressão na frente de escavação fazendo uso de uma “almofada” de ar. Esta tecnologia permite escavar túneis com elevadas pressões de água mesmo para grandes diâmetros de escavação.

Por forma a “acomodar” esta “almofada” de ar algumas mudanças a nível mecânico foram necessárias. Nestas tuneladoras a câmara de escavação é dividida pela denominada “parede submersa” sendo que a secção da frente está completamente preenchida pela mistura lama/escombros por forma a promover o suporte da frente de escavação. Na secção traseira do plenum a mistura chega apenas um pouco acima do eixo da máquina sendo o restante volume preenchido então pela “almofada” de ar que irá controlar a pressão na câmara e por consequência na frente de escavação. Estas duas secções estão conectadas através de uma abertura na parte inferior da “parede submersa”. De referir que ao contrário de uma SFM convencional o sistema de adução de lamas está completamente desassociado da pressurização. Este sistema leva à possibilidade de controlar com muito mais precisão a pressurização da frente levando assim a melhores performances em termos de escavação mas também de segurança, diminuindo assim os riscos de assentamentos ou de empolamento do solo à superfície. A efectividade da tecnologia destas tuneladoras permite-lhes trabalhar com pressões acima de 15 bar (Herrenknecht AG@, 2014). À semelhança das SFM também neste tipo de *Mixshield* é usual serem instalados na base do plenum triturados de blocos de rocha, como os apresentados anteriormente, por forma a garantir o correcto funcionamento do sistema de remoção de escombros. Além disto sempre que se preveja a existência de material

fino, principalmente argilas, ao longo do alinhamento do túnel devem ser tomadas algumas medidas por forma a evitar que estas “colem” na cabeça de corte ou no interior da câmara de escavação como o bom dimensionamento das aberturas da cabeça de corte por forma a garantir um bom fluxo de material escavado para o interior do plenum, jogar com o sistema de adução e remoção de escombros por forma a aumentar o fluxo de lamas nestas zonas, a escolha adequada do posicionamento dos jactos de lama e garantir bordas lisas tanto na cabeça de corte como na câmara de escavação. Estas medidas irão diminuir o desgaste das ferramentas de corte e a consequente necessidade de manutenção, que podem ser extremamente dificultadas pela necessidade de manter a frente pressurizada e através tanto de lamas como de ar comprimido – ver Figura 4.17.



Figura 4.17 – Operário equipado com equipamento de mergulho para efectuar manutenção na cabeça de corte de uma Mixshiled TBM (tunnelonline@, 2013).

A Figura 4.18 apresenta-se um esquema tridimensional de uma Mixshield TBM, referindo novamente, que os seus elementos mecânicos bem como a sua disposição podem variar de acordo com cada fabricante.

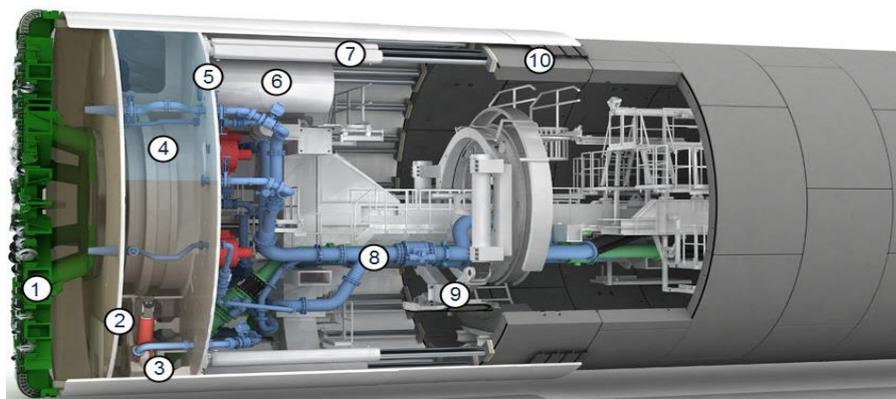


Figura 4.18 – Esquema tridimensional de uma *Mixshiled* TBM com tecnologia de SF e de OF (adaptado de Herrenknecht AG@, 2014).

LEGENDA:

- | | |
|--------------------------|--------------------------------------|
| 1) Cabeça de corte; | 6) Câmara hiperbárica; |
| 2) “Parede submersa”; | 7) Macacos hidráulicos de propulsão; |
| 3) Triturador de blocos; | 8) Circuito de lamas; |
| 4) “Almofada” de ar; | 9) Erector de segmentos; |
| 5) Bulkhead; | 10) Sistema de isolamento do escudo. |

- **Multi-mode TBM (EPBM, SFM e Open TBM)**

No topo da tecnologia das tuneladoras híbridas, para escavar túneis em maciços altamente complexos e com a possível presença de água, a Herrenknecht AG desenvolveu recentemente uma tuneladora que combina três tecnologias, EPB, SFM e *Open TBM* podendo escavar em quatro modos distintos. Esta tuneladora denominada de *Multi-mode TBM*, foi desenvolvida por forma a ultrapassar os limites técnicos e/ou económicos das tecnologias que a compõem quando solicitadas a escavar maciços com geologias peculiares. Ao longo da escavação de um túnel longo a geologia pode variar entre rocha dura até um solo saturado promovendo assim grandes desafios para uma tuneladora convencional preparada apenas para um determinado tipo de maciço. Com a junção destas tecnologias a alteração entre modos de escavação está apenas sujeita a pequenas paragens sem a necessidade de alterações mecânicas, por vezes irreversíveis, e por conseguinte a baixos custos de execução e ao aumento considerável das condições de segurança tanto dentro como fora do túnel. As *Multi-mode TBMs* permitem a escavação em modo aberto, em modo pressurizado por lamas (escudo SF) ou espumas (escudo EPB) ou sem pressurização mas com o plenum preenchido. São possíveis dois tipos de *design* (Herrenknecht AG): *Multi-mode TBM* com estrutura modular básica, em que o método de escavação é alterado com recurso a extensas alterações aos componentes da tuneladora dentro do túnel; *Multi-mode TBM* equipada com os componentes necessários para as técnicas a empregar. O método de escavação é alterado num menor tempo e com menores custos, no entanto estas são máquinas extremamente complexas a nível técnico. Esta tuneladora utiliza os pressupostos funcionais destas técnicas mencionados anteriormente sendo que as grandes diferenças se prendem com o *design* da câmara de escavação e do sistema de extracção de escombros. Em grandes diâmetros existe espaço para a instalação dos componentes necessários a cada técnica mas em tuneladoras de pequeno diâmetro torna-se extremamente complicada a comunhão destes, principalmente os necessários às técnicas de EPB e SF. Assim tornou-se indispensável criar uma tecnologia que conseguisse unir da melhor forma estes modos de escavação tirando partido do melhor de cada um deles. Desta forma a Herrenknecht AG criou a tecnologia “*TBM Variable Density*”. Esta tecnologia permite o controlo minucioso da escavação ao longo das alterações geológicas e hidrogeológicas do maciço. Nesta técnica existe uma câmara de escavação semelhante à de uma *Mixshield TBM* dividida em duas secções sendo a secção frontal completamente preenchida e a secção traseira apenas preenchida até ligeiramente acima do eixo da máquina, sendo o restante volume preenchido pela “almofada” de ar sobre pressão. A pressão na frente

é controlada pela pressurização da lama através da “almofada” de ar no caso do modo SF, ou através da velocidade de extracção do material escavado pelo sem fim e pelo avanço da tuneladora no modo EPB. O material escavado em qualquer um dos modos é extraído pelo sem-fim e a comunicação entre as duas secções do plenum é feita por tubos em vez de uma simples abertura. No modo EPB o sem-fim transfere os escombros para um transportador de correia e para o modo SF foi incorporado ao topo do “sem-fim” uma ligação a um depósito que transforma o material extraído em lamas (“*Slurryfier Box*”) por forma a ser bombeado para o exterior do túnel. Na Figura 4.19 apresenta-se um esquema tridimensional da *Multi-mode TBM*.

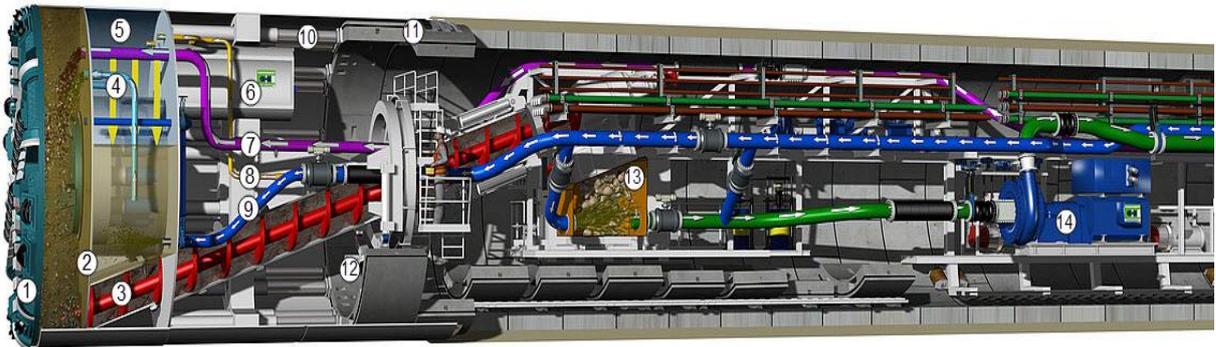


Figura 4.19 – Esquema tridimensional de uma *Multi-mode TBM* (adaptado de Herrenknecht AG@, 2014).

LEGENDA:

- | | |
|---|--|
| 1) Cabeça de corte; | 8) Circuito de ar comprimido; |
| 2) “Parede submersa”; | 9) Circuito adução de lamas à secção traseira do plenum; |
| 3) “Sem-fim”; | 10) Macacos hidráulicos de propulsão; |
| 4) Tubos de conexão entre as secções do plenum; | 11) Sistema de isolamento do escudo; |
| 5) “Almofada” de ar; | 12) Erector de segmentos; |
| 6) Câmara hiperbárica; | 13) “ <i>Slurryfier box</i> ”; |
| 7) Circuito adução de lamas à secção frontal do plenum; | 14) Bomba do circuito de extracção de lamas. |

5 GEO-PARÂMETROS E SUA APLICABILIDADE À CONSTRUÇÃO MECANIZADA COM TBM'S

Por forma a garantir condições de segurança e a viabilidade económica do empreendimento é necessário efectuar uma adequada caracterização geológica e geotécnica do maciço a escavar.

É assim, necessário levar a cabo uma meticulosa identificação das diferentes formações geológicas que compõem o maciço bem como a definição dos parâmetros geotécnicos que caracterizam cada uma delas. Também a condição hidrogeológica do maciço deve ser investigada e definida, sendo esta uma das principais em termos de escolha do método de escavação. Em termos gerais é de toda a importância, relativamente aos parâmetros físicos, identificar o material a escavar, o seu grau de alteração, expansibilidade e discontinuidades, aos parâmetros mecânicos, resistência e deformabilidade do maciço, e aos hidrogeológicos, a pressão neutra, permeabilidade, e possível existência de aquíferos. Outro tipo de parâmetros a ter em conta na escavação de um túnel, e que se prende essencialmente com a técnica de escavação escolhida, são os parâmetros de constructibilidade, como por exemplo a propensão do solo a colar e a abrasividade (Almeida e Sousa, 2005).

De notar que é de extrema importância efectuar prospecções e análises ao longo do decorrer da obra visto a construção de um túnel ser efectuada em meio subterrâneo, isto é, a heterogeneidade do maciço em profundidade poderá provocar dissabores à construção se a caracterização do mesmo não for devidamente executada e actualizada preferencialmente em cada avanço. Assim, torna-se possível ajustar a técnica utilizada por forma a otimizar o seu desempenho.

5.1 Geo-Parâmetros

Como referido, a correcta caracterização do maciço a escavar é a única forma de tornar a escavação de um túnel, um empreendimento seguro e economicamente viável. Com o conhecimento destes parâmetros torna-se possível escolher a técnica de escavação que mais se adequa a um determinado maciço mas também ao tipo de túnel a escavar. A finalidade a que o túnel se destina (que se prende com o seu comprimento, área de secção transversal, tipo de acabamento final, entre outros) influencia, em simultâneo com as características do maciço, amplamente a escolha do tipo de TBM a utilizar.

5.1.1 Parâmetros do Estado de Tensão

Estes parâmetros prendem-se directamente com a história do maciço. É necessário saber em concreto qual a magnitude e a orientação das tensões iniciais. Para a escavação mecanizada com tunneladoras é necessário obter informação sobre os seguintes parâmetros (ITA, 1998): Tensões Principais ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$); Tensão Vertical (σ_v); Rácio das Tensões Totais ($K_t = \sigma_h / \sigma_v$); Rácio das Tensões Efectivas ou Coeficiente de Impulso em Repouso (K_0); Grau de Sobreconsolidação (OCR). De referir que em túneis profundos, para além da acção da gravidade, um aspecto altamente condicionante do estado de tensão inicial são as forças de natureza tectónica originadas no interior da crosta terrestre (Almeida e Sousa, 2005).

5.1.2 Parâmetros Físicos

Este é, com certeza, o grupo de parâmetros mais extenso, sendo que para uma boa caracterização do maciço é necessário o conhecimento do maior número de parâmetros possível.

a) Parâmetros de Identificação

Os parâmetros de identificação são de extrema importância nomeadamente quando se pretende fazer uso de uma tunneladora de frente pressurizada. É necessário ter o conhecimento mais preciso possível sobre a granulometria do solo, porosidade e teor em água para a determinação do modo de confinamento da frente da tunneladora bem como, caso necessário, o tipo de aditivos a utilizar nesse confinamento. Os parâmetros que devem ser determinados são os apresentados de seguida (ITA, 1998): Peso Volúmico ($\gamma, \gamma_d, \gamma_s$); Teor de Água, Grau de Saturação, Índice de Vazios (w, S, e); Limites d'Atterberg (w_L, w_p); Porosidade (n); Características Granulométricas; Actividade da fracção argilosa; Características Mineralógicas e Petrográficas.

b) Apreciação Global do Maciço

A apreciação global do maciço pode ser efectuada com recurso à análise de parâmetros de fácil determinação, tanto em laboratório como em campo. Alguns dos parâmetros que transmitem a qualidade global do maciço são os seguintes (ITA, 1998): Índice de Alteração (A_M); Índice de Qualidade (t_0); Índice de Continuidade (IQ).

c) Descontinuidades

Na escavação de túneis relativamente superficiais em maciços rochosos, a estabilidade destas está directamente ligada com as descontinuidades do maciço. Como tal, toda a informação passível de se determinar sobre as descontinuidades torna-se uma mais-valia para todo o projecto. Genericamente a informação a ser recolhida é a abaixo apresentada: Densidade de Descontinuidades (RQD, λ); Número de Famílias (N_I, N_X); Características das Famílias (orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, material de preenchimento, tensão de corte e origem, se há xistosidade, plano de estratificação, diáclases, fissuras ou mesmo falhas).

d) Parâmetros Hidrológicos

A hidrologia é um elemento preponderante no que toca à afectação do maciço, isto é, a sensibilidade do maciço à água, as variações higrométricas, que se referem por exemplo aos níveis de água em rios, lagos e represas, índices pluviométricos entre outros. Estes são elementos importantes para a determinação do suporte imediato a fornecer ao maciço. As variações térmicas são também deveras importantes na definição da alterabilidade do maciço.

e) Química da Água

Após verificar os parâmetros anteriores, torna-se evidente a importância da composição química da água subterrânea. Esta poderá afectar em larga escala por exemplo o tipo de cimento a utilizar no suporte bem como a duração das pregagens instaladas, tornando-se de extrema importância aferir esta composição.

5.1.3 Parâmetros Mecânicos

Estes parâmetros dizem respeito ao comportamento/capacidade geomecânica dos maciços. Como é de conhecimento geral, a mecânica das rochas é distinta da mecânica dos solos sendo portanto necessário referir os parâmetros separadamente.

a) Maciços Rochosos

No que concerne à mecânica das rochas há que distinguir a resistência da matriz rochosa da resistência do maciço devido aos efeitos de escala existentes. Em relação à matriz rochosa é necessário determinar parâmetros que caracterizam a sua resistência como: Resistência à Compressão Uniaxial (σ_c); Resistência à Tracção (σ_t); Resistência ao Corte (τ); Índice de Resistência (I_c); Relacionando estes parâmetros com parâmetros físicos, como é o caso das descontinuidades e da higrometria, é possível obter uma indicação da resistência do maciço contabilizando assim o efeito de escala associado.

Importantes são também os parâmetros referentes à relação tensão-deformação do maciço por forma a analisar a interacção maciço-estrutura. Torna-se portanto necessário avaliar parâmetros como: Módulo de Young (E); Coeficiente de Poisson (ν); Anisotropia; Fluência; Potencial de Expansão (Índice de Expansão - C_g , Pressão de Expansão a Deformação Nula - σ_g). Com o intuito de verificar o comportamento de obras subterrâneas aos sismos e a explosões artificiais, há que avaliar parâmetros como: Velocidade de Propagação de Ondas S e P (V_s , V_p); Amortecimento (ξ); Módulos Dinâmicos.

b) Maciços Terrosos

Na análise mecânica de solos, o tipo de solo a escavar e o método de escavação definem se a análise é realizada para condições drenadas ou não drenadas. A resistência de um maciço efectuando uma análise drenada caracteriza-se essencialmente pelos seguintes factores de resistência em tensões efectivas (Matos Fernandes, 2006): Ângulo de Atrito (ϕ'); Coesão (c').

A escavação em solos saturados de baixa permeabilidade torna-se necessário efectuar também uma análise não drenada. A presença de água no solo leva a uma análise em termos de tensões totais, sendo os parâmetros de resistência neste caso parâmetros não drenados: Resistência ao Corte do Solo (c_u); Número de Estabilidade (N). À semelhança da análise feita para as rochas também em maciços terrosos é necessário avaliar os parâmetros de deformabilidade do maciço. Estes parâmetros são idênticos àqueles que se determinam para os maciços rochosos como o módulo de deformabilidade (E), coeficiente de Poisson (ν), influenciados pela anisotropia do maciço, a sua heterogeneidade, fluência entre outros. Também em termos dinâmicos, os mesmos parâmetros devem ser auferidos para uma correcta e completa caracterização do maciço.

5.1.4 Parâmetros Hidrogeológicos

Como mencionado ao longo deste documento, a presença de água num maciço condiciona amplamente tanto o método de escavação de um túnel como a sua viabilidade. Como tal é de extrema importância ter conhecimento de parâmetros relacionados com a presença de água no maciço como: Permeabilidade Isotrópica (k); Permeabilidade Anisotrópica (k_x, k_y, k_z); Carga Hidráulica (h); Gradiente Hidráulico (i); Localização do Nível Freático; Caudal Percolado (Q).

5.1.5 Parâmetros de Constructibilidade

Dependendo da técnica de escavação determinada para um túnel e no caso de utilização de uma tunneladora, é necessário ter presentes alguns parâmetros que afectam directamente essa técnica como os que se apresentam seguidamente: Abrasividade; Dureza; Rácio de Perfuração (DRI); Propensão do Solo a Colar; Coeficiente de Permeabilidade do Solo ao Ar.

5.2 Aplicabilidade dos Geo-Parâmetros à Escavação Mecanizada com TBMs

Os parâmetros que caracterizam o maciço estão directamente ligados ao tipo de técnica escolhida para escavação do túnel e por conseguinte à máquina a utilizar. O dimensionamento de uma tunneladora no que toca à sua cabeça de corte, ferramentas de escavação e estabilidade do túnel e da frente de escavação depende em tudo destes parâmetros. No Quadro 5.1 apresenta-se esta relação, relacionando o tipo de maciço, os elementos da tunneladora referidos e os geo-parâmetros apresentados. É também referido a importância da determinação de cada parâmetro e a fase da obra para a qual são necessários.

Quadro 5.1 – Relação entre geo-parâmetros e alguns elementos de uma TBM e fase da obra para os quais são necessários (adaptado de ITA, 1998).

Parâmetro	Relação com Escavação com TBMs				Fase da Obra em que o Parâmetro é		
	Estabilidade do Túnel e Frente	Escavação		Remoção de Escombros	Requerido		
		Cabeça de Corte	Ferramentas de Escavação		Projecto Preliminar	Projecto Detalhado	Construção
Estado de Tensão							
Tensões Principais	R					A	A
Tensão Vertical	S/R	S/R			A	N	
Rácio das Tensões Totais	S/R				A	N	
Rácio das Tensões Efectivas	S	S/R			A	N	N
Grau de Sobreconsolidação	S				A	N	
Físicos							
Identificação							
Peso Volúmico	S/R	S/R		S/R	A	N	A
Teor em Água, Grau de Saturação e Índice de Vazios	S/R	S/R		S/R	A	N	A
Límites d'Atterberg	S	S			A	N	A
Características Granulométricas	S		S/R	S/R	A	N	A
Actividade		S	S	S	A	N	A
Características Mineralógicas e Petrográficas			S/R		A	N	A
Apreciação Global do Maciço							
Índice de Qualidade Geral	S/R	S/R			N		N
Índice de Alteração	R	R	R			N	N
Índice de Qualidade	R	R	R			A	N
Descontinuidades							
Densidade	R	R			N	N	N
Número de Famílias	R	R			A	N	N
Características das Famílias	R	R			A	N	N
Atmosféricos							
Sensibilidade à Água	S/R	S/R		S/R	A	N	A
Sensibilidade às Variações Higrométricas	S/R	S/R		S/R	A	N	A
Sensibilidade às Variações Térmicas	S/R	S/R				A	A
Químicos da Água							
Características Químicas				S/R	A	N	A
Poluição				S/R		N	N
Mecânicos							
Resistência							
Corte	S/R	S/R	S/R		N	N	A
Compressão Uniaxial	S/R	S/R	S/R		N	N	A
Tração	R	R	R		A	N	A
Residual	S/R				A	A	A
Características Gerais de Resistência	S/R	S/R					A
Deformabilidade							
Elasticidade Anisotrópica	R	R				A	A
Elasticidade Isotrópica	S/R	S/R			N	N	A
Viscosidade	S/R				A	N	A
Expansibilidade	S/R	S/R			N	N	A
Características Dinâmicas							
Velocidade de Ondas P e S	S/R				A	N	A
Modulos de Deformabilidade	S/R				A	N	A
Potencial de Liquefação	S				A	N	A
Hidrogeológicos							
Permeabilidade Anisotrópica	S/R					A	
Permeabilidade Isotrópica	S/R				N	N	
Nível Piezométrico e Gradiente Hidráulico	S/R				N	N	N
Caudal Percolado	S/R			S/R		A	N
Constructibilidade							
Abrasiveidade		S/R	S/R		A	N	
Dureza		R	R		A	N	
Rácio de Perfuração			R			N	
Propensão do Solo a Colar		S/R	S/R	S/R	A	N	A

LEGENDA:

S – Solo

R – Rocha

A – Aconselhável

N – Necessário

5.3 EPBM versus SFM

O que leva à escolha entre uma EPBM e uma SFM são as condições geológicas e geotécnicas do maciço a escavar. Sobre a geologia é necessário conhecer parâmetros como o tipo de solo ou rocha e suas características reológicas, parâmetros e resistência do maciço, tamanho do grão e respectiva curva granulométrica, permeabilidade e a localização do nível freático, sendo que a presença de água tem um impacto determinante na escolha da máquina. Uma mudança simples na geologia ou a presença de água leva à alteração do tipo de máquina desde uma máquina de frente aberta para uma totalmente pressurizada.

A utilização destes tipos de máquinas pressupõe normalmente o uso de aditivos, sendo assim necessário saber a disponibilidade de fornecimento destes em grande quantidade ao local da obra bem como o seu preço. Os prazos a cumprir também poderão afectar esta escolha visto que no caso de uma SFM é necessária a instalação de uma central de tratamento de lamas cuja sua duração é de ter em consideração visto se tratar de instalações industriais de grande porte.

Em termos de velocidade de avanços, estes são distintos entre estas duas tuneladoras. Uma EPBM tem velocidade de avanço superior sendo, em boas condições, relativamente mais rápida do que uma SFM que tem uma velocidade de avanço mais restrita devido ao sistema de lamas que a acompanha. No entanto uma EPBM necessita normalmente de manutenção mais frequente à cabeça de corte. No curto prazo a EPBM tem velocidade de avanço superior, mas em longo prazo a velocidade da SFM irá ser muito próxima. As vantagens e desvantagens de cada uma delas têm que ser pesadas para cada projecto em concreto e de acordo com as características deste. No Quadro 5.2 são apresentadas algumas das principais vantagens de cada uma das tuneladoras.

Quadro 5.2 – Principais vantagens das EPBMs e das SFMs.

Vantagens das EPBMs	Vantagens das SFMs
Sistema geral mais simples de dominar, operar e manter.	Pressão requerida é controlada pelo sistema de lamas.
No caso de colapso da frente o solo não é passível de entrar no "plenum" visto este já estar cheio de material sólido.	Menor força de torque.
Possibilidade de tomar vantagem de um solo "auto-portante".	Menor força de corte.
Rácios de avanço superiores em relação às SFM.	Lamas contaminadas não são expostas até chegarem à superfície.
Menor Custo.	Possibilidade de integração de trituradores de rocha.
Estaleiro e poço de lançamento menores.	Ambiente do túnel mais limpo
Menor consumo de aditivos.	

Na Figura 5.1 é possível ver que ambas as tuneladoras podem ser utilizadas numa ampla variedade de solos. Actualmente, com a grande diversidade de aditivos existentes no mercado,

é possível fazer uso destas tunneladoras para condições geológicas diferentes daquelas para as quais foram criadas. As SFMs foram concebidas para escavar solos ligeiramente mais grosseiros, desde os siltes mais grosseiros até cascalho fino ou médio, com permeabilidades (k) entre 10^{-7} m/s e 10 m/s, sendo que para solos mais finos poderão resultar em problemas na central de lamas aquando da requalificação destas, visto as lamas utilizadas nas SFMs, como já referido, serem criadas com bentonite. A mistura de bentonite com outro tipo de material fino poderá até impossibilitar a requalificação da lama, isto é, torna-se extremamente complicado separar a bentonite das restantes partículas finas. Já as EPBMs fazendo uso apenas de água e espumas necessitam de solos finos para aumentar a densidade da mistura que irá fornecer o suporte, assim o seu campo de utilização vai das argilas até as areias médias podendo em ultima instancia ir até as areias mais grosseiras com permeabilidades a variar no intervalo de 10^{-3} m/s a 10^{-12} m/s sendo, nos casos de muito baixa permeabilidade, necessário a utilização de espumas mais “molhadas”, ou seja, com maior quantidade de água.

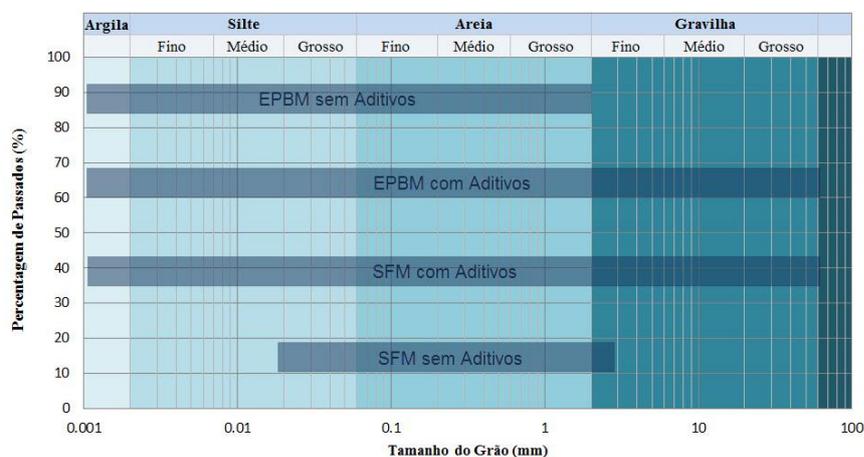


Figura 5.1 – Aplicabilidade das EPBMs e SFMs de acordo com o tipo de solo (adaptado de Lovat, 2006).

5.4 Modelo de Prognóstico “ Q_{TBM} ”

São vários os modelos de classificação de maciços rochosos existentes na bibliografia da área. De entre estes destaca-se o sistema de classificação “Q”, a partir do qual foi desenvolvido o modelo de prognóstico de performance da escavação de maciços rochosos com tunneladoras “ Q_{TBM} ”. O sistema de classificação “Q” foi desenvolvido entre 1971 e 1974 através de dados obtidos a partir da escavação de maciços rochosos com recurso a explosivos (Barton et al), 1974. Este sistema sofreu uma actualização em 1993 com a análise de 1050 novos casos (E. Grimstad e N. Barton, 1993), e outra em 2002 onde foram estudados 900 novos casos (Grimstad et al. 2002). Recentemente, com a análise de 145 casos de aplicação de tunneladoras e baseado no sistema “Q”, foi desenvolvido um modelo a partir do qual se torna possível estimar a performance de uma tunneladora, isto é, estimar a velocidade de avanço e a

velocidade de penetração da mesma (Barton et al, 1999). Entenda-se, velocidade de penetração, como a velocidade máxima teórica que a tuneladora consegue escavar de acordo com as características do maciço e dela própria, e velocidade de avanço, como a velocidade que a tuneladora realmente avança tendo em conta a velocidade de penetração e operações inerentes à utilização de uma tuneladora como a substituição de cortantes devido ao desgaste, limitação do sistema de remoção de escombros ou possíveis interrupções que possam decorrer e que levam à diminuição desta velocidade. Este modelo difere do sistema “Q” original, devido à introdução de parâmetros que caracterizam a relação maciço/máquina. A introdução de novos parâmetros, torna o modelo deveras complexo, visto que também a relação maciço/máquina é algo de difícil quantificação. A Equação 4, representa este modelo e os parâmetros referidos.

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \quad (4)$$

Desta equação verifica-se a grande semelhança com o sistema “Q” original, em que, o produto dos primeiros três quocientes se refere exactamente a este, apenas com ligeiras diferenças na obtenção dos parâmetros. Cada um dos quocientes avalia um aspecto do maciço da seguinte forma: o primeiro quociente, RQD_0/J_n (RQD – *Rock Quality Designation*, interpretado na direcção do alinhamento do túnel; J_n – número de descontinuidade referente ao número de famílias de descontinuidades), está relacionado com a geometria do maciço rochoso, sendo que, quanto mais fracturado estiver o maciço, menor será o valor de RQD e maior o de J_n , logo o valor de Q_{TBM} é reduzido pelo efeito combinado de ambos os factores; o segundo, J_r/J_a (J_r – número de rugosidade, referente à rugosidade das superfícies de descontinuidade; J_a – número de alteração das diaclases, dependente do grau de alteração da superfície das descontinuidades), depende da resistência ao corte entre blocos, correspondendo valores mais elevados a diaclases descontínuas, com bom contacto e sem enchimento, devendo ter em conta a direcção que mais afecta os cortantes; por fim, o terceiro quociente, J_w/SRF (J_w – factor de redução da água nas diaclases, dependente da pressão e caudal da água jorrando das descontinuidades; SRF – *Stress Reduction Factor*, factor de redução das tensões associado à presença de zonas de corte, concentração de tensões, esmagamento e expansão das rochas), introduz os efeitos do ambiente geológico, em que, a presença de água e a existência de concentrações de tensões provocam a rápida redução deste quociente (Pinto, 2012).

No que concerne aos parâmetros adicionais do modelo, que relacionam a interacção maciço/máquina, estes pretendem quantificar quatro classes básicas de um maciço rochoso a escavar (Figura 5.2), bem como a reacção da tuneladora a cada uma destas classes. Estas classes caracterizam-se da seguinte forma: a classe 1, representa um maciço rochoso duro e de extrema dificuldade de escavar, que leva à necessidade da substituição frequente dos cortantes devido ao desgaste, mas que não necessita de ser suportado; o maciço de classe 2, é um

maciço rochoso muito fracturado no qual existe erosão dos finos e elevada permeabilidade que culmina em elevados atrasos para drenagem, colocação de suporte e execução de injeções de preenchimento; a classe 3, representa um maciço rochoso ligeiramente alterado, formado por rocha porosa, o que o torna fácil de escavar com necessidade de colocação de suporte esporádica; finalmente, o maciço rochoso de classe 4, é um maciço rochoso com elevadas tensões *in situ* propício a “apertar” a TBM fazendo com que esta fique presa, havendo necessidade da colocação de suporte muito rígido.

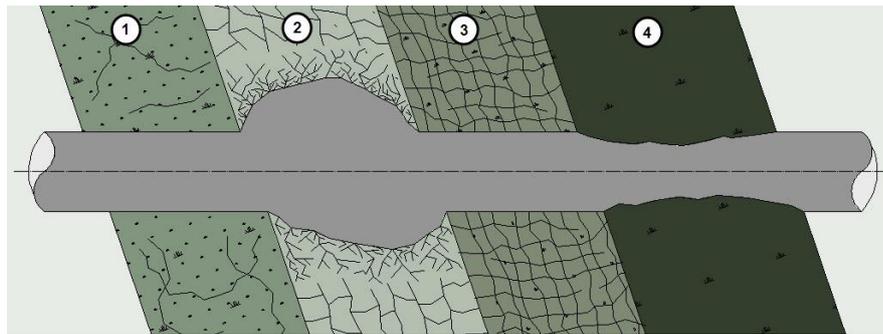


Figura 5.2 – Classes básicas de um maciço rochoso (adaptado de Barton, 1999).

Assim estes parâmetros referem-se à média da força aplicada na frente de escavação (F) por cada disco de corte (quanto maior esta força menor será o valor do “ Q_{TBM} ”), à resistência à compressão uniaxial da matriz rochosa na zona em causa ($SIGMA$) em MPa, ao índice de durabilidade dos cortantes (CLI – *Cutter Life Index*) que é por exemplo 4 para quartzito e 90 para calcário (Johannessen, 1994), a percentagem de quartzo existente na rocha (q) e a tensão biaxial induzida na face de escavação (σ_{Θ}). É importante referir, que a determinação de $SIGMA$ deve ser feita tendo em conta que esta deverá ser calculada com a Equação 5 (dependente do valor Q , da massa volúmica γ e da resistência à compressão uniaxial σ_c) e com a Equação 6 (dependente do valor Q , da massa volúmica γ e da resistência à carga pontual I_{50}), devendo ser assumido o menor destes valores (Barton et al, 2003).

$$SIGMA_{cm} = 5 \gamma Q_c^{1/3} \quad \text{com} \quad (Q_c = Q_0 \frac{\sigma_c}{100}) \quad (5)$$

$$SIGMA_{tm} = 5 \gamma Q_t^{1/3} \quad \text{com} \quad (Q_t = Q_0 \frac{I_{50}}{4}) \quad (6)$$

Da análise dos 145 casos mencionados, que perfazem mais de 1000 km de túneis escavados, foi possível também determinar um parâmetro importante, parâmetro este, que pretende quantificar o declínio que existe no rácio de avanço. Este parâmetro denomina-se de desaceleração (m_1) e pode tomar 5 valores distintos: entre -0,13 e -0,17 para excelentes performances, -0,17 para boas, -0,19 para razoáveis, -0,21 para fracas e -0,25 para muito fracas. Sendo que diversos factores podem influenciar este parâmetro, este foi corrigido por forma a ter em conta variáveis como o diâmetro do túnel (D), o índice de durabilidade dos cortantes (CLI), a percentagem de quartzo existente na rocha (q) e a porosidade da rocha

também em percentagem (n). O parâmetro final denomina-se também de desaceleração (m) e determina-se de acordo com a Equação 7.

$$m \approx m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0,20} \times \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0,15} \times \left(\frac{q}{20}\right)^{0,10} \times \left(\frac{n}{2}\right)^{0,20} \quad (7)$$

Desta feita, conhecendo o parâmetro “ Q_{TBM} ” e o parâmetro “m” torna-se possível estimar o valor da velocidade de avanço (AR – *Advance Rate*) em metros por hora (m/hr) para um determinado tempo (T) em horas (hr) com recurso à Equação 8.

$$AR \approx 5(Q_{TBM})^{-0,2} \cdot T^m \quad (8)$$

Também a velocidade de penetração (PR –

$$AP \approx 5(Q_{TBM})^{-0,2} \quad (8)$$

Conhecendo todos estes parâmetros e relações, apresenta-se na Figura 5.3 o resumo destas relações em que no eixo vertical esquerdo está representada a velocidade de penetração, no eixo vertical direito a velocidade de avanço, no eixo horizontal o valor de Q_{TBM} em escala logarítmica e no topo da figura alguns adjectivos que de acordo com o valor de Q_{TBM} indicam a dificuldade relativa de uma tuneladora escavar o maciço em estudo.



Figura 5.3 – Aplicação do Q_{TBM} (adaptado de Barton, 2003).

Finalmente, torna-se possível estimar também, o tempo de penetração (T) para um determinado comprimento de um túnel (L). Para uma velocidade de avanço média (AR) tem-se obviamente L/AR . Este valor pode ser calculado também a partir da Equação 9, que relaciona a velocidade de penetração (PR) com o gradiente de desaceleração (m).

$$T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (9)$$

6 ESTUDO DE CASO – A TUNELADORA DO METRO DO PORTO

Atendendo ao tamanho do país e à sua conjuntura económica, pode-se dizer que a utilização de tunneladoras na construção de túneis em Portugal, principalmente na construção de túneis metropolitanos (Lisboa e Porto) mas também com pontuais utilizações na construção de túneis hidráulicos (Odelouca – Funcho e Sabuga – Meimosa), é razoável.

A construção de Metro de Lisboa teve início em 1955, tendo sido utilizada a primeira tunneladora apenas em 1992 para a construção de 803 metros do túnel “Cais do Sodré/Baixa Chiado”. As tunneladoras utilizadas foram do tipo EPB, tendo estas sido adaptadas por forma a serem utilizadas na construção de parte de outros túneis deste metropolitano, consoante as características dos maciços a atravessar. Estas foram utilizadas na construção de, 1100 metros do túnel “Baixa/Rossio”, em 1994, 561 metros do túnel “Restauradores/Baixa”, em 1995, 3352 metros do túnel “Alameda/Oriente”, em 1994, 3182 metros do túnel “Campo Grande/Odivelas”, em 1999, 1943 m do túnel “Baixa/Sta Apolónia e 1620 metros do túnel “Alameda/S. Sebastião” (CPT, 2014). Assim aproximadamente 12,5 km dos 43,2 km do Metro de Lisboa (metrolisboa@, 2014), cerca de 29%, foram construídos com recurso a tunneladoras.

No Metro do Porto, com cerca de 67 km de rede, apenas 7,7 km são túneis, tendo sido 6,5 km destes túneis, cerca de 84%, construídos com recurso a duas tunneladoras do tipo EPB, denominadas de Micas 1 e Micas 2. A parte subterrânea da rede metropolitana da cidade do Porto resume-se a dois túneis, um com 2300 metros entre Campanhã e Trindade e outro com 4200 metros desde o Pólo Universitário à Ponte D. Luiz I (Figura 6.1). Estes túneis, com diâmetro interno de 7,8 m, acomodam cada um deles, duas linhas que funcionam em sentidos opostos. A construção destes túneis teve início a 14 de Junho de 2000 e término em Novembro de 2003 (CPT, 2014). Sendo esta uma obra urbana numa cidade bastante antiga, como é a cidade do Porto, houve bastantes questões problemáticas a ter em conta neste tipo de obra como, a existência de minas, em tempo usadas para exploração de água ou fazendo parte do sistema de esgotos, edifícios de alvenaria bastante antigos e poços. Estas questões, aliadas à proximidade da superfície deste tipo de estruturas, tornam a construção de túneis em meio urbano bastante mais complicadas, essencialmente a níveis de segurança, que por sua vez, poderão afectar em larga escala o empreendimento em termos económicos.

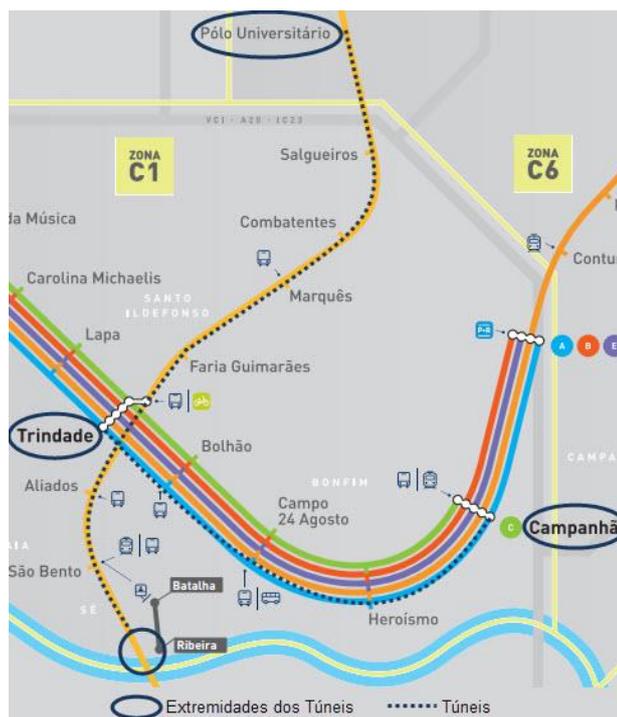


Figura 6.1 – Rede de túneis do Metro do Porto (adaptado de metroporto@, 2014).

Os perfis geológicos atravessados por estes túneis, foram aqui também, elementos que levantaram grandes dificuldades na construção destes. A profundidade a que os túneis foram escavados varia entre os 3 e os 30 metros, sempre abaixo do nível freático e atravessando na sua totalidade um maciço granítico de grande heterogeneidade no que toca ao seu grau de alteração, denominado de “Granitos do Porto” (CPT, 2014). Este maciço é de difícil escavabilidade, devido a frequentes mudanças bruscas entre zonas quase sãs e zonas muito alteradas. Este maciço, localizado na zona de falha regional Porto-Tomar, apresenta zonas de granito são (W1) até solo residual (W6) de acordo com a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas. Uma outra característica peculiar deste maciço é, encontrarem-se zonas mais alteradas sob zonas mais competentes. Na Figura 6.2 apresenta-se a recuperação de uma prospecção onde é possível identificar exactamente o referido, sendo que na caixa da esquerda se encontra o testemunho recolhido a maior profundidade, cerca de 24 m, e na caixa da direita o testemunho retirado sobre este.

De maneira a ultrapassar as problemáticas mencionadas, foi escolhido como método de escavação destes túneis, tuneladoras do tipo EPB já apresentadas no capítulo 4 desta dissertação. Inicialmente apenas era para ser utilizada uma EPBM, mas com devido a problemas com o início da obra, uma segunda máquina foi encomendada por forma a assim terminar a construção dos túneis dentro do tempo previsto. Utilizando este tipo de tuneladoras tornou possível construir estes túneis minimizando ao máximo qualquer interferência com a superfície. Ambas as tuneladoras, construídas pela empresa Herrenknecht AG, possuíam uma cabeça de corte com 8,7 metros de diâmetro e um escudo de 8,5 metros de comprimentos. As

tuneladoras tinham um peso aproximado de 670 toneladas incluindo todo o equipamento de operação e apoio que as compunham.



Figura 6.2 – Testemunhos obtidos de uma prospeção nos Granitos do Porto (Matos, 2006).

Na pressurização da frente, além do material escavado que é aí mantido juntamente com a água proveniente do maciço, foram adicionadas espumas e polímeros, para os efeitos referidos no capítulo 4, mas também bentonite por forma a colmatar o défice de finos existente no maciço, tornando assim a mistura num material homogéneo, denso, trabalhável e impermeável. Isto permitiu também contornar a permeabilidade do maciço, que devido à sua grande alteração em algumas zonas tornava-se uma questão preocupante no que toca pressurização da frente de escavação.

A remoção de escombros do plenum é, neste tipo de máquinas, efectuada por um “sem-fim”, que tem também como função ajudar a controlar a pressão nesta câmara. Os escombros são seguidamente transferidos para transportadores de correia incorporados na tuneladora e novamente transferidos, no caso em questão, para outros transportadores de correia que foram instaladas na retaguarda da máquina ao longo do túnel já construído. À saída do túnel eram transferidos para camiões que encaminhavam este material para escombrelas.

A propulsão da tuneladora foi executada com o auxílio de 19 pares de macacos de propulsão, instalados no escudo da mesma exercendo uma pressão de até 72000 toneladas no suporte final instalado também pela tuneladora, como é característico desta técnica. No caso do túnel entre a Trindade e Campanhã foram instalados cerca de 1640 anéis, constituídos por 6 aduelas mais a aduela de fecho (CPT, 2014). Estas aduelas foram pré-fabricadas com 30 cm de espessura. Foram efectuadas também injeções de calda por forma a preencher o volume vazio entre o extradorso do anel e o maciço, limitando assim a ocorrência de assentamentos à superfície.

Podendo este tipo de tuneladora funcionar sem fornecer suporte imediato na frente, tal foi utilizado nesta obra, mas devido à heterogeneidade do maciço que originou sobreescavações consideráveis e à conseqüente ocorrência de um acidente mortal, a partir desse momento toda a escavação se procedeu com pressurização da frente. A pressão era controlada no plenum com recurso a células de pressão aí instaladas e a cerca de 1,5 m da face de escavação (Matos, 2006). Desta forma conseguiram-se limitar assentamentos excessivos, com o valor máximo menor que 10 mm, e uma velocidade de avanço entre 7 e 10 m/dia (Almeida e Sousa, 2004).

O Granito do Porto é extremamente abrasivo, tanto em estado são, como em estado mais alterado. Até mesmo depois de escavado no plenum, devido aos seus minerais (maioritariamente quartzo), a mistura resultante é de extrema abrasividade. Esta questão tornou-se um grande problema nesta obra provocando a necessidade de alterar os cortantes frequentemente, sendo em média, cada cortante, substituído após cada metro de túnel escavado. Uma outra questão deveras preocupante foi o desgaste provocado na cabeça de corte, que sem dúvida foi algo a ter em atenção (Matos, 2006).



Figura 6.3 – Testemunhos obtidos de uma prospeccão nos Granitos do Porto (Matos, 2006).

O elevado grau de intemperismo e a alterabilidade repentina das características do Granito do Porto, tornaram esta obra relativamente arriscada para a utilização de uma EPBM. A impossibilidade de prever com alguma certeza e manter uma pressurização da frente

adequada, como já referido, trouxe alguns dissabores. Contudo, tal foi solucionado utilizando a técnica *Active Support System* (baseia-se na adição de bentonite à mistura no plenum por forma a colmatar “deficiências” na pressurização da frente), o que permitiu a partir desse momento concluir a escavação dos túneis sem problemas de maior.

Estas tuneladoras foram operadas por equipas de 15 trabalhadores que trabalharam por turnos, 24 horas por dia, 6 dias por semana ao longo de mais de três anos. Na Figura 6.3 apresenta-se a saída de uma das EPBMs junto à estação de São Bento na cidade do Porto.

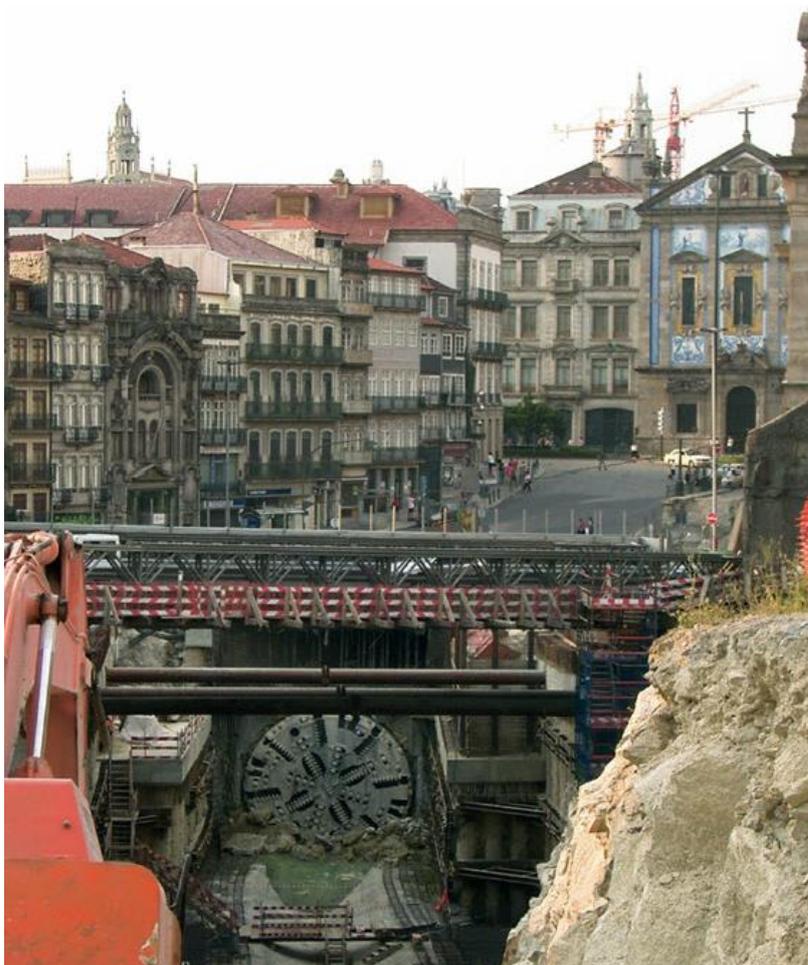


Figura 6.4 – Saída da “Micas” na estação de São Bento, Porto (Guglielmenti, 2007).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temática da construção de túneis com tuneladoras é deveras ampla, complexa e multidisciplinar, encontrando-se sempre em constante evolução como foi aqui demonstrado. Este desenvolvimento pretende trazer um equilíbrio entre as questões económicas, ambientais, de segurança e de executabilidade, inerentes a um empreendimento deste género.

Ao longo deste documento, tornou-se evidente a importância deste tipo de construção mecanizada de túneis, que em túneis de comprimento considerável, se torna uma opção economicamente viável, com elevadas condições de segurança, tanto no interior do túnel como à superfície, possibilitando assim executar obras que outrora se achavam inexecutáveis. A utilização destes equipamentos, vem assim de certa forma, substituir as técnicas ditas convencionais, eliminando em grande número as limitações destas.

Também estas máquinas possuem limitações, o que se depreende logo devido à existência de diferentes tipos de máquinas para diferentes tipos de maciços. A diferença que mais sobressai entre elas, é mesmo o tipo de suporte imediato fornecido ao maciço ou até mesmo a não existência deste. Também aqui, as empresas construtoras de tuneladoras têm trabalhado por forma a uma mesma máquina poder fornecer diferentes tipos de suporte imediato ao maciço como é o caso mais recente da *Multi-mode* TBM, desenvolvida recentemente pela Herrenknecht AG.

Dentro da bibliografia existente, nomeadamente em língua portuguesa, também muito há a fazer nesta área. Documentos em que se faça a caracterização pormenorizada de cada uma das técnicas, incluindo não só questões no âmbito da geotécnica mas também da mecânica inerente aos equipamentos e questões de análise económica da aplicação destas técnicas na construção de túneis, seriam de extrema importância e com elevado contributo para o conhecimento e divulgação do tema em Portugal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFTES@ (2013). <http://www.aftes.asso.fr/>. Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, Paris, França.
- Aker Wirth GmbH@ (2014). <http://www.akersolutions.com/>. Noruega.
- Almeida e Sousa, J. (2005). "Projecto de Túneis". Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Amberg Engineering (2003). "Coming up Uetliberg Motorway Tunnel" ITA 2003 Presentation, Amesterdão, Holanda.
- AMCOL@ (2014). <http://www.amcol.com/>. Illinois, EUA.
- Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES), (2000). "New Recommendations on Choosing Mechanized Tunnelling Techniques". Paris, França.
- Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES), (2000). "Slurry for Use in Slurry Shield TBM". Paris, França.
- Babendererde, S. e Babendererde, T. (2007). "TBM Full Face Driving", Babendererde Engineers, Alemanha.
- Babendererde, S., Hoek, E., Marinos, P. e Cardoso, S. (2004). "Geological Risk in the Use of TBMs in Heterogeneous Rock Masses – The Case of Metro do Porto and the Measures Adopted", (2004). Course in Geotechnical Risk in Rock Tunnels, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Bakker, K. e Blom, C. (2009). "Ultimate Limit State Design for Linings of Bored Tunnels", Delf University of Technology, Delf, Holanda.
- Barton, N., Lien, R. e Lunde, J. (1974). "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", Rock Mechanics 6, pp. 189 – 236 (1974), Springer-Verlag.
- Barton, N. et al (1999). "TBM Performance Estimation in Rock using Q_{TBM} ". Tunnels and Tunnelling International, Setembro de 1999.
- Barton, N. (2000). "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock" 1º Ed. Oslo, Noruega.
- Barton, N. (2000). "Rock Mass Classification for Choosing Between TBM and Drill-and-Blast or a Hybrid Solution", Tunneling Journal.
- Barton, N. e Abrahão R. (2003). "Employing the Q_{TBM} Prognosis Model", Tunnels and Tunnelling International, Dezembro de 2003.
- Barton, N. (2004). "Fault Zones and TBM", Course on Geotechnical Risk in Tunnels, Aveiro, Portugal.

- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. e Tumac, D. (2008). “The Selection of a TBM Using Full Scale Laboratory Tests and Comparison of Measured and Predicted Performance Values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnels”, World Tunnel Congress, India.
- Büchi, E. (1984). “Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine”, Berna, Suíça.
- Chapman, D., Metje, N. e Stark, A. (2010). “Introduction to Tunnel Construction”, Applied Geotechnics Volume 3, Spon Press. Londres, Reino Unido.
- Cigla, M., Yagiz, S., and Ozdemir, L. (2001). “Application of tunnel boring machines in underground mine development”. 17th International Mining Congress and Exhibition, Ancara, Turquia, pp. 155 – 164.
- Comissão Portuguesa de Túneis (CPT) (2014), “Túneis em Portugal”. Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), Lisboa, Portugal.
- Crandell, A. (1985). “Introducción a la historia del arte: La Edad Media”. Barcelona, Espanha. Editorial Gustavo Gil.
- Colorado School of Mines (2014). <https://www.mines.edu/>. Colorado, EUA.
- Crossrail Ltd@ (2013). <http://www.crossrail.co.uk/>. Londres, Reino Unido.
- Dinis da Gama, C. (2013), “Apontamentos do Curso de Explosivos para Responsáveis Técnicos de Pedreiras e Obras de Escavação”. Ordem do Engenheiros, Coimbra, Portugal.
- Dowden, P. e Cass, D. (1991). “Shielded TBM’s – Matching the Machine to the Job”, Washington, EUA.
- Edalat, K., Vahdatirad, M. Ghodrat, H. Firousian, S. e Barari, A. (2010) “ Chosing TBM for Tabriz Subway Using Multi Criteria Method”, Journal Of Civil Engineering and Managment 16, pp. 531 – 539.
- European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFERNAC), (2005). “Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock”, Reino Unido.
- evergreenline@ (2014). <http://www.vancitybuzz.com/2014/03/photos-skytrain-evergreen-lines-massive-tunnel-boring-machine/>. “Skytrain Evergreen Line’s Massive Tunnel Boring Machine”, 2014.
- facesupport@ (2012). <http://www.facesupport.org/>. Babendererde Engineers, Alemanha.
- Farrokh, E., Rostami, J. e Laughton, C. (2011). “Analysis of Unit Supporting Time and Support Installation Time for Open TBMs”, Rock Mechanics and Rock Engineering 44, pp. 431 – 445.
- FHWA – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (2009). “Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements”. Publication No. FHWA-NHI-10-034, Dezembro 2009.

- FHWA@ (2014). <http://www.fhwa.dot.gov/>. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC, EUA.
- Front-Capó, J., Vásques-Suñé, E., Carrera, J., Martí D., Carbonell R. e Pérez-Estaun A. (2011). “Groundwater Inflow Prediction in Urban Tunneling with a Tunnel Boring Machine”, *Engineering Geology* 121, pp. 43, 54.
- Geotechnical Risk in Rock Tunnels – Campos e Matos, Ribeiro e Sousa, Kleberger & Lopes Pinto (editores) © 2006 Taylor & Francis Group, London.
- Golestanifar, M., Goshtasbi, K., Jafarin, M. e Adnani, S. (2011). “A Multi-dimensional Approach to the Assessment of Tunnel Excavation Methods”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48, pp. 1077 – 1085.
- Gong, Q., Zhao, J. e Jiang, Y. (2006). “In Situ TBM Penetration Test and Rock Mass Boreability in Hard Rock Tunnels, *Tunneling and Underground Space Technology* 22, pp. 303 – 316.
- Grimstad, E., Barton, N. (2002). “Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (2002) pp. 185 – 216.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. e Xu, S. (2007). “Mechanized Tunnelling in Urban Areas”, Taylor & Francis.
- Hapgood, F. (2004). “The History of the Tunnel Boring Machine”. Fall 2004 Issue of *American Heritage of Invention and Technology*, Brighton, Boston, MA, EUA.
- Hemphill, G. (2013). “Practical Tunnel Construction”, John Willey & Sons, Inc, Canadá.
- Herrenknecht AG@ (2013). <https://www.herrenknecht.com/>. Schwanau, Alemanha.
- infraestruturaurbana@ (2013). <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/>. Brasil.
- Hoek, E. (2006). “Practical Rock Engineering”,
- Hoek, E. (2001). “Rock Mass Properties for Underground Mines”, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), Colorado, EUA.
- Hoek, E., Marinos P. e Cardoso A. (2004). “Geological Risk in the use of TBMs in Heterogeneous Rock Masses - The Case of “Metro do Porto” and the Measures Adopted”, Aveiro, Portugal.
- INSUPPA@ (2013). <http://www.insuppa.com/>. Reino Unido.
- International Tunneling Association (ITA), (1998). “Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines”, Lausanne, Suíça.
- ITA@ (2013). <http://www.ita-aites.org/>. International Tunneling Association, Lausanne, Suíça.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (1996). “Japanese Standard for Shield Tunneling”, 3º Ed, Japão.

- Kim, S. e Tonon, F. (2010). “Face Stability and Required Support Pressure for TBM Driven Tunnels with Ideal Face Membrane – Drained Case”, *Tunneling and Underground Space Technology* 25, pp. 526 – 542.
- Lislerud, A. (1997). “Principles of Mechanical Excavation”, Tamrock Corp., Helsínquia, Finlândia.
- Lovat, R. (2006). “TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines”, LOVAT Inc. Toronto, Canadá.
- Mahdevari, S. Torabi, S. e Monjezi, M. (2012). “Application of Artificial Intelligence Algorithms in Predicting Tunnel Convergence to Avoid TBM Jamming Phenomenon”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 55, pp. 33 – 44.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. e Herrenknecht, M. (2008). “Hard Rock Tunnel Boring Machines”. Ernst & Sohn, Berlim, Alemanha.
- Matos Fernandes, M (2006). “Mecânica dos Solos”, Vol. I e Vol. II. FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Metrostav a.s.@ (2014). <http://www.metrostav.cz/>. República Checa.
- Pinto, P.L. (2012). “Apontamentos de Mecânica das Rochas”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- MS SA@ (2014). <http://www.m-s.fr/>. França.
- Pelizza, S. (2011). “Overview on Tunnel Boring Machines”, Politecnico di Torino, Turim, Itália.
- Robbins Co@ (2014). <http://www.therobbinscompany.com/>. Solon, Ohio, EUA.
- Rodrigues, R., e Lombardía, C. (2010). “Analysis of Methane Emissions in a Tunnel Excavated Through Carboniferous Strata Based on Underground Coal Mining Experience”, *Tunneling and Underground Space Technology* 25, pp. 456 – 468.
- Rocha, M. (2013). “Estruturas Subterrâneas”, LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- SME, (1992). “Mining Engineering Handbook”, 2nd Edition, Volume 1, Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), Colorado, EUA.
- Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), (2014). <http://www.smenet.org/>. Colorado, EUA.
- Tamrock (1999). “Excavation Engineering Handbook”, Sandvick Tamrock Corp., Suécia.
- thelaunchbox@ (2012). <http://thelaunchbox.blogspot.pt/2012/03/contract-one-nearly-done.html>. “Contract One - Nearly Done”, 2012.
- Transcity@ (2014). <http://transcityjv.com.au/>. Legacy way, Australian Government.
- trenchlessonline@ (2014). <http://trenchlessonline.com/index/webapp-stories-action/id.2800/title.hybrid-tbm-australian-decline-tunnel>. “Hybrid TBM takes on Australian Decline Tunnel”, 2014.

- tunnelonline@ (2014). <http://www.tunnelonline.info/features/powering-up-at-linthal-limmern/image/powering-up-at-linthal-limmern-7.html>. “Powering up at Linthal-Limmern”, 2014.
- Tunnel Association of Canada (TAC), (2014). <http://www.tunnelcanada.ca/>. Canadá.
- TunnelTalk@ (2006). <http://www.tunneltalk.com/Seymour-Capilano-Dec06-Facing-challenges-on-Seymour-Capilano.php>. “Facing the challenges of Seymour-Capilano”, TunnelTalk, 2006.
- TunnelTalk@ (2007). <http://www.tunneltalk.com/Arrowhead-Success-from-the-extreme.php>. “Clawing success from the extreme at Arrowhead”, TunnelTalk, 2007.
- TunnelTalk@ (2009). <http://www.tunneltalk.com/TBM-Recorder-Nov09-SELI-breakthrough-in-Ethiopia.php>. “Success after mammoth struggles in Ethiopia”, TunnelTalk, 2009.
- TunnelTalk@ (2009). <http://www.tunneltalk.com/New-Products-Sep12-New-EPBM-polymer-free-foaming-agent.php>. “EPBM new CONDAT foaming agent”, TunnelTalk, 2009.
- TunnelTalk@ (2009). <http://tunneltalk.com/Brightwater-Mar09-Brightwater-sinkhole.php>. “Sinkhole bothers Brightwater”, TunnelTalk, 2009.
- TunnelTalk@ (2012). <http://www.tunneltalk.com/TBM-Recorder-Nov12-Seli-EPBM-ready-for-Copenhagen-Cityringen.php>. “First of four Seli EPBMs ready for Copenhagen”, TunnelTalk, 2012.
- TunnelTalk@ (2013). <http://www.tunneltalk.com/Niagara-28Mar13-Triumph-as-Niagara-Tunnel-opens-in-Canada.php>. “Niagara water tunnel open’s at last”, TunnelTalk, 2013.
- TunnelTalk@ (2013). <http://www.tunneltalk.com/Crossrail-Feb13-Final-station-contract-award-as-two-more-Herrenknecht-TBMs-complete-factory-testing-in-Germany.php>. “Double boost for Crossrail”, TunnelTalk, 2013.
- TunnelTalk@ (2014). <http://www.tunneltalk.com/New-Products-18Feb2014-Hydrowork-CAIS-system-to-improve-safety-for-hyperbaric-interventions.php>. “Improving safety for hyperbaric interventions”, TunnelTalk, 2014.
- Unibetão S.A.@ (2013). <http://www.unibetao.pt/>. Lisboa, Portugal.
- Vallejo, L. (2002). “Ingeniería Geológica”, Pearson, Madrid, Espanha.
- Wirth Group (2003). “Reaming Tunnel Boring Machine – Undercutting Technique”
- WSDOT@ (2014). <http://www.wsdot.wa.gov/>. Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, EUA.
- Yarali, O. e Soyer, E. (2013). “Assessment of Relationships Between Drilling Rate Index and Mechanical Properties of Rocks”, Tunneling and Underground Space Technology 33, pp. 46 – 53.
- Zhang, K., Yu, H. Liu, Z. e Lai, X. (2010). Dynamic Characteristic Analysis of TBM Tunneling in Mixed-face Conditions”, Simulation Modelling Practice Theory 18, pp. 1019 – 1031.