

## 2

### Antecedentes históricos e aspectos gerais da escavação mecanizada

“A história da construção do túnel sob o Tamisa, o primeiro túnel escavado debaixo de um corpo de água, é uma das épicas da história da engenharia”.

Steven Brindle (Brunel, The man who built the world, 2005)

Pode-se considerar que o primeiro equipamento mecanizado ou *shield* como é chamado em inglês, foi desenvolvido em 1825 em Londres, pelo engenheiro Sir Marc Isambard Brunel para a construção do primeiro túnel sob o Rio Tamisa. Brunel já tinha desenvolvido o conceito do *shield* desde 1806 (Fig. 2-1), quando o apresentou como uma forma de realizar uma conexão de tráfego seguro para o inverno, através de Neva em St. Petersburg. Porém, no final foi utilizada uma ponte suspensa (Maidl *et al.*, 1996).

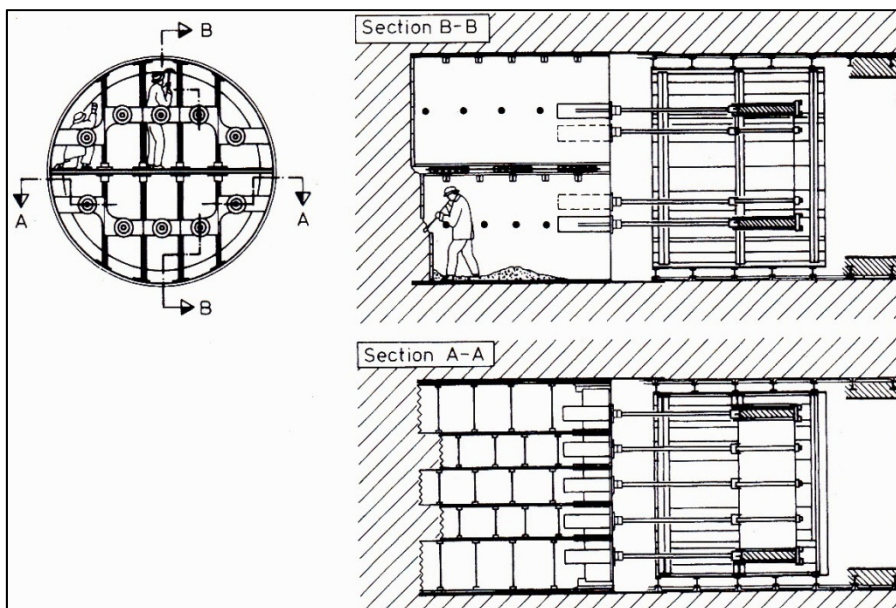


Figura 2-1. *Shield* por M. I. Brunel, 1806 (Maidl *et al.*, 1996).

Depois de duas tentativas sem sucesso entre 1799 e 1809, e de que muitos acreditarem ser impossível fazer um túnel que atravessasse os solos moles sob este rio, Brunel assumiu em 1823 o desafio, e, graças á sua invenção, o túnel foi executado, demorando 16 anos para sua finalização devido a vários problemas que se apresentaram durante a construção.

Brunel desenvolveu o conceito do *shield*, sem ser realmente a construção de uma TBM, pois a escavação era feita com os métodos convencionais da época, e o *shield* funcionava simplesmente como uma proteção para os trabalhadores durante o processo de escavação conforme se mostra na Figura 2-2 e na Figura 2-3 (Da Cruz, 2006 e <http://portal.tpu.ru>). O *shield* era composto de diferentes células, e em cada uma delas trabalhava um operário de forma independente e segura.

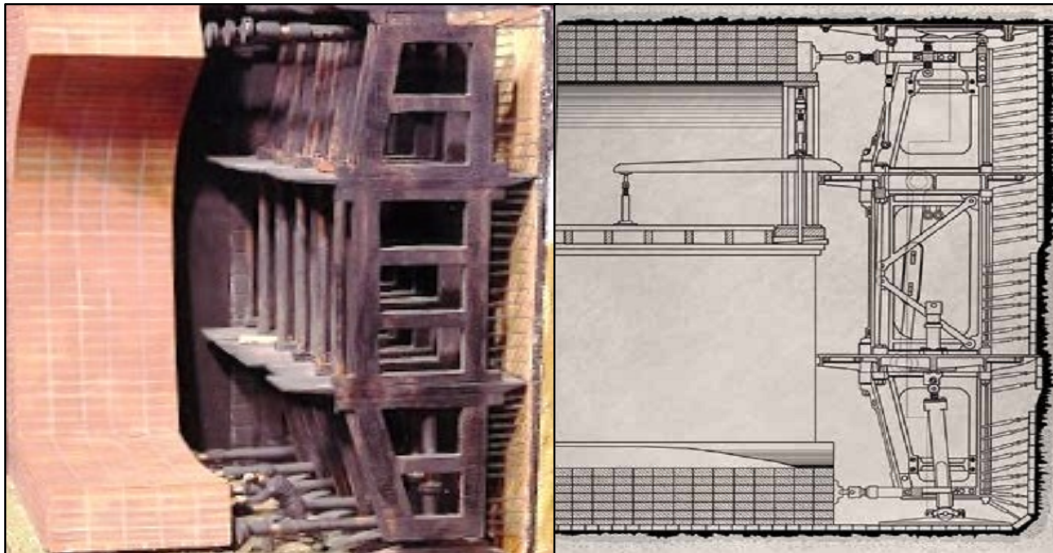


Figura 2-2. Maquete e vista lateral do *shield* de Brunel (Sánchez, 2013 e Santoyo, 2013).

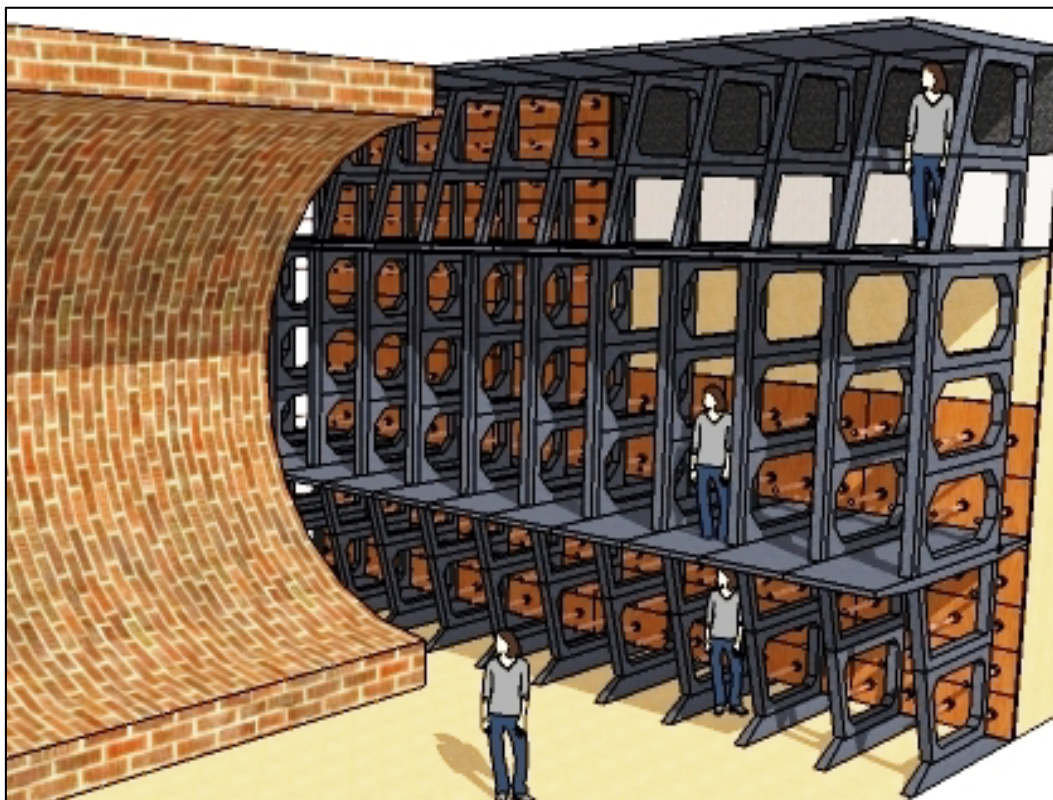


Figura 2-3. Perspectiva do *Shield* desenhado por Brunel (baseado em Sánchez, 2013).

Na Figura 2-4 se mostra um sistema totalmente diferente de *shield* de escavação na totalidade da seção, completamente fechado e tipo parafuso, no qual a colocação do *lining* era imediata, sendo considerado como o precursor do *shield* de balanço de empuxos de terra ou EPB, *Earth Pressure Balance* (Maidl *et al.*, 1996). A Figura 2-5 ilustra o túnel de Brunel construído sob o Rio Tamisa mais de 150 anos depois de ter sido construído.

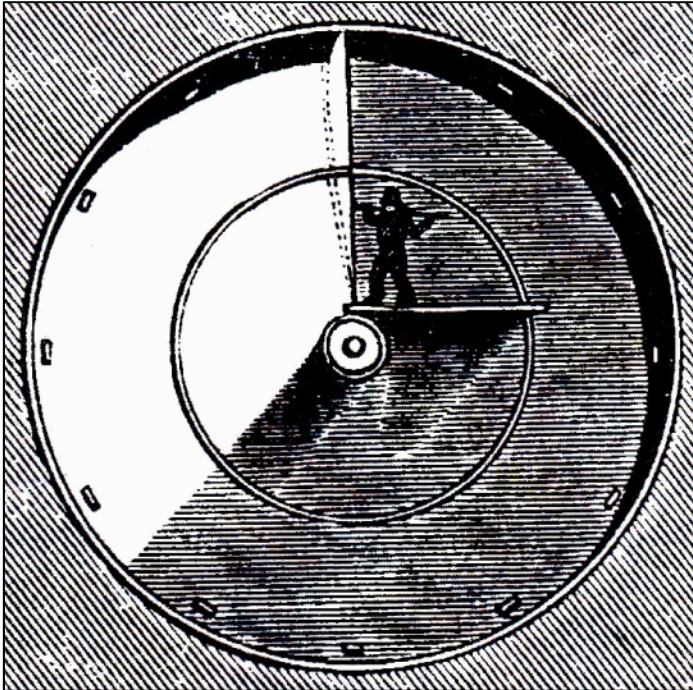


Figura 2-4. *Screw Shield* (tipo parafuso) por M. I. Brunel, 1806 (Maidl *et al.*, 1996).



Figura 2-5. Túnel de Brunel construído sob o Rio Tamisa na década de 1830-Londres, UK: a) 1995 e b) 1997-Túnel após reabilitação com revestimento interno em concreto moldado (Sauer e Mergelsberg, 2004).

“A utilização de um *shield* perfurador como suporte da parede do túnel e muitas vezes também da frente constituiu um avanço tecnológico importantíssimo no horizonte da construção de túneis... Aproveitando a idéia de Brunel, têm vindo a serem desenvolvidas e aperfeiçoadas grandes máquinas escavadoras de túneis, que em muito têm contribuído tanto para a otimização dos procedimentos característicos da construção, como para garantir a segurança dos operários e a estabilidade da cavidade.”

(Cruz, 2006, p.97).

Assim a primeira máquina tuneladora foi desenhada e construída pelo engenheiro belga Henri-Joseph Maus, denominada “*Maus`s Mountain Slicer*”, para a execução do túnel ferroviário *Fréjus* no Monte Cenis, entre a França e a Itália (Fig. 2-6).

Esta máquina trabalhava com martelos à percussão, realizando sulcos anulares profundos na rocha, dividindo a face em quatro blocos de 2,0m x 0,5m (Maidl *et al.*, 2008 e Greice, 2015).

Maus construiu esta máquina em 1846 numa fábrica de armas nas redondezas de Turim. Ela consistia basicamente em mais de 100 martelos de percussão acoplados na frente de uma máquina locomotiva.

Mesmo esta máquina tendo demonstrado sua capacidade durante dois anos em um túnel de teste, ela não foi utilizada para a construção do túnel do Monte Cenis, devido às dúvidas no equipamento de condução.

O ar comprimido para dar força nas brocas era obtido por compressores de água no portal de entrada que chegava à máquina por tubulações. Considerando 12,290m de extensão do túnel, Maus estimou que somente um 30% dos 75 kW gerados chegariam até o equipamento.

Também identificou que o material utilizado e disponível não conseguiria resistir ao desgaste durante a operação, incrementando o uso dos *bits* de corte. Mesmo com todos estes problemas, Maus assumiu uma taxa média de avanço de 7 m/dia, e, considerando o tempo inativo para a troca dos cortadores, uma taxa de 5 m/dia (Maidl *et al.*, 2008).

Desafortunadamente, as revoluções de 1848 afetaram irremediavelmente os fundos para o projeto, que somente foi completado 10 anos depois com o uso de métodos inovadores, porém mais baratos, como por exemplo, os perfuradores pneumáticos (Sauer e Mergelsberg, 2004).

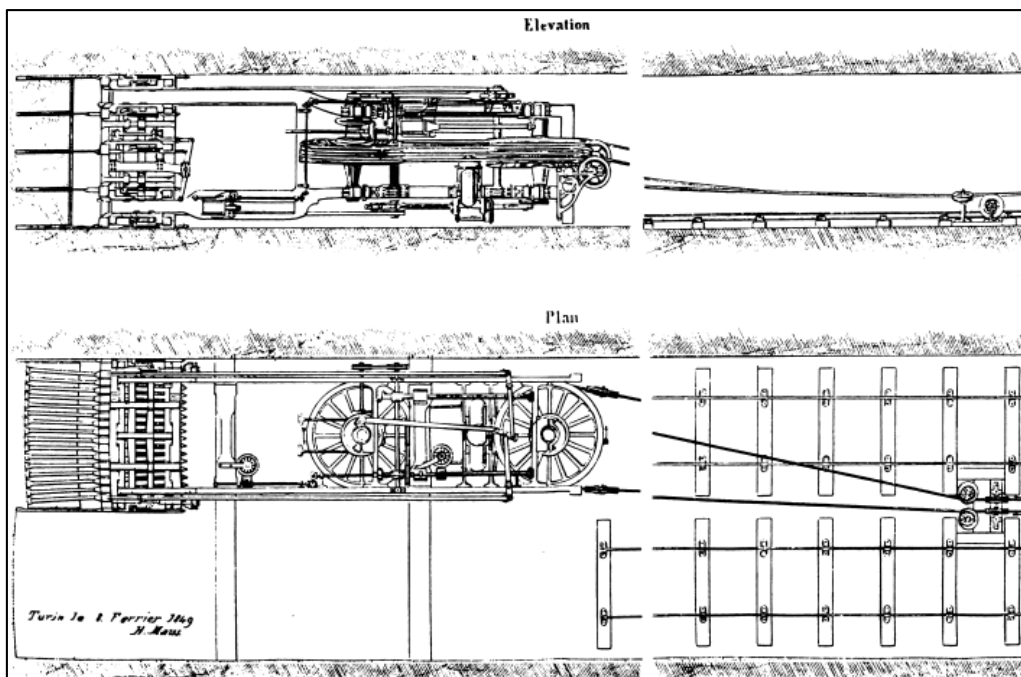


Figura 2-6. Máquina tuneladora “Mountain Slicer” de H.-J. Maus, Túnel Monte Cenis, 1846 (Maidl *et al.*, 2008).

Nos Estados Unidos, a primeira TBM foi construída e usada em 1853 durante a construção do túnel Hoosac (Boston). Fabricada em ferro fundido, foi chamada de *Wilson’s Patented Stone-Cutting Machine* (Fig. 2-7). Seu inventor Charles Wilson a desenvolveu no começo de 1851, e a patenteou em 1856.

Esta máquina possuía todas as características de uma TBM moderna, e por isso é possível considerá-la como a primeira. A face era escavada por discos de corte que Wilson já tinha desenvolvido em 1847.

As ferramentas de corte eram acopladas a uma cabeça rotativa de corte e o impulso (*thrust*) requerido para a operação de corte era resistido por apoios laterais que pressionavam contra a rocha. Em comparação com as TBMs modernas, destaca-se a integração de uma montagem rotacional para os discos de corte. A placa de montagem era colocada com seu eixo rotacional perpendicular à linha de centro do túnel, no suporte da cabeça de corte, gerando assim uma face hemisférica em combinação com a rotação da cabeça de corte externa (Fig. 2-7).

Depois de passar por vários testes em 1853 e perfurar 3 metros (10 ft.) no túnel Hoosac, a máquina mostrou-se incapaz de competir com o método de *Drill & Blast*, devido aos problemas com os discos de corte. Finalmente o túnel foi completado mais de 20 anos depois, e da mesma forma que no túnel ferroviário de *Fréjus*, usando um método menos ambicioso (Maidl *et al.*, 2008).

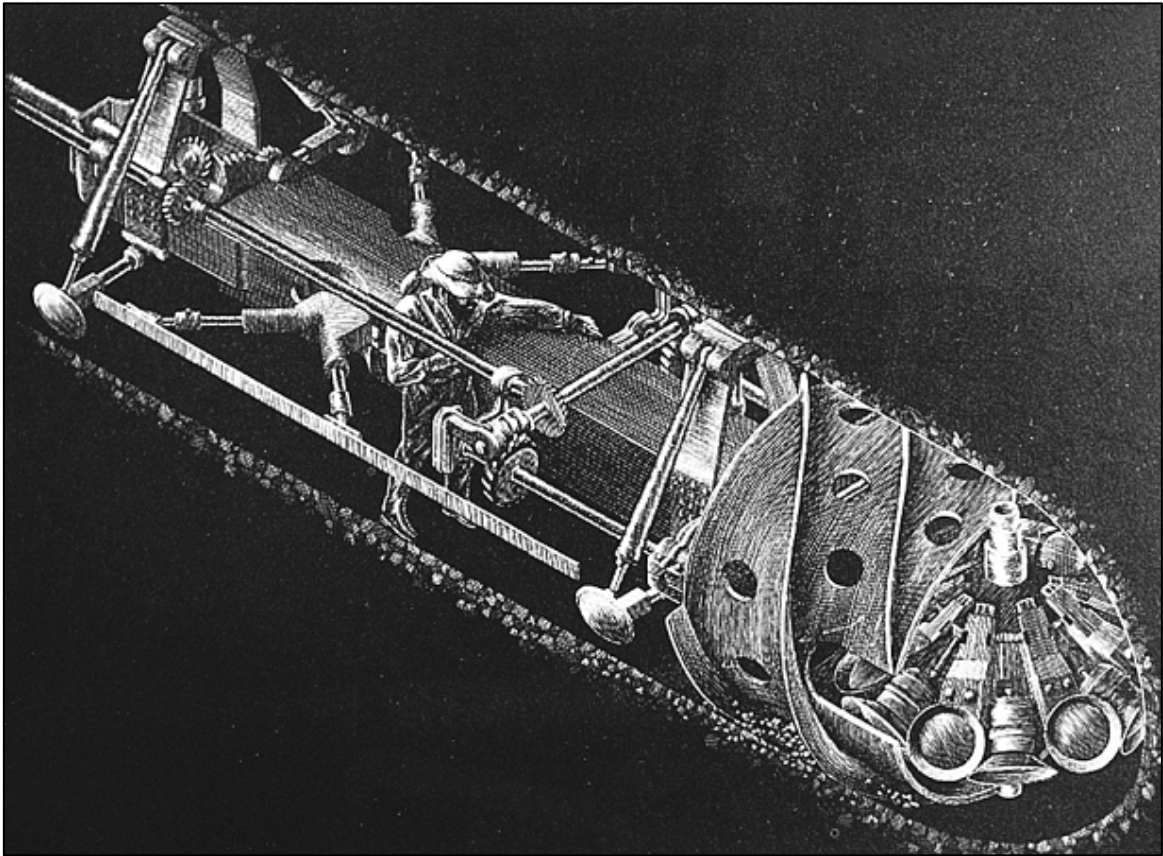


Figura 2-7. Primeira TBM de Wilson, Túnel Hoosac, 1853 (Maidl *et al.*, 2008).

Depois da experiência com a TBM no túnel Hoosac, Wilson aplicou uma patente em 1875 para uma versão melhorada da máquina (Fig. 2-8). Com um desenho da cabeça de corte totalmente novo, a face não era totalmente escavada, e sim um anel externo e um furo central. Isto era conseguido colocando discos de corte no aro externo e com o eixo rotacional da cabeça de corte.

Depois de ter atingido a profundidade máxima de corte, a máquina tinha que ser retirada para permitir a remoção do núcleo restante usando explosivos. A vantagem desta máquina era o perfil preciso de corte.

Também em 1853, no mesmo ano que Wilson testava sua primeira TBM, o americano Ebenezer Talbot desenvolveu uma máquina de túneis, que trabalhava usando discos de corte e uma roda de corte rotativa. No entanto, esta máquina possuía os discos de corte em pares, colocados em braços oscilantes na roda de corte (Fig. 2-9). A combinação da rotação da cabeça de corte e o movimento dos braços de corte permitiu a escavação de toda a superfície. No primeiro teste em uma seção de 5,18 m a máquina falhou.

Cooke e Hunter propuseram um sistema totalmente diferente que patentearam em 1866 (Fig. 2-10). No lugar de uma roda de corte com eixo na

linha central do túnel, havia três tambores que giravam num eixo axial transversal ao túnel.

O tambor central era o maior e se movia na frente dos outros dois, os quais se encarregavam de alargar a seção de escavação. Esta máquina nunca foi construída. No entanto, o conceito de um tambor de extração do material escavado, utilizado nesta máquina, pode ser encontrado cinquenta anos depois nas máquinas tuneladoras como a “Eiserner Bergmann” (*Iron Miner*) (Fig. 2-13).

Depois de Frederick E. B. Beaumont ter feito uma patente em 1863 para uma máquina equipada com formões, a qual usou de forma insatisfatória na construção de um túnel hidráulico, ele patenteou em 1875, outra máquina tuneladora com uma roda de corte com um fuste horizontal equipado de braços radiais de corte com brocas de aço, de forma que a ponta da broca de perfuração formava um grande cinzel cônico (Fig. 2-11).

A força nesta máquina era gerada por uma bomba hidráulica movida com ar comprimido. Esta patente foi assumida pelo Colonel T. English para melhorar a sua própria máquina, a qual ele patenteou em 1880. Esta tinha furos cilíndricos nos braços de corte onde eram parafusadas as ferramentas de perfuração. A novidade no desenho era a possibilidade de trocar as ferramentas de corte sem precisar acessar a máquina pela frente.

O arranjo das brocas nos dois braços de corte foi desenhado para cortar anéis concêntricos. De forma que a rocha remanescente entre as ranhuras rompesse durante o corte. Beaumont construiu duas máquinas para a patente do Colonel T. English em 1881 e usou-as para construir o Túnel Channel (Fig. 2-12).

O equipamento trabalhou com sucesso desde 1882 até 1883, quando o projeto parou por motivos políticos. Foram perfurados 1.840 m do lado francês e 1.850 do lado inglês. O avanço diário máximo atingido foi de 25 m, um logro considerável na época.

Não existem mais aplicações de máquinas tuneladoras nas décadas seguintes, sendo que varias foram usadas com sucesso em mineração para cortar rochas relativamente suaves. Na primeira metade do século XX, as TBMs eram usadas para executar galerias em minas de potassa.

A primeira versão de TBM dos anos 1916/1917, chamada de “Eiserner Bergmann” possuía um tambor equipado com cortadores de aço que funcionava como cabeça de corte e produzia seções retangulares com relação a sua dimensão (Fig. 2-13) (Maidl *et al.*, 2008).

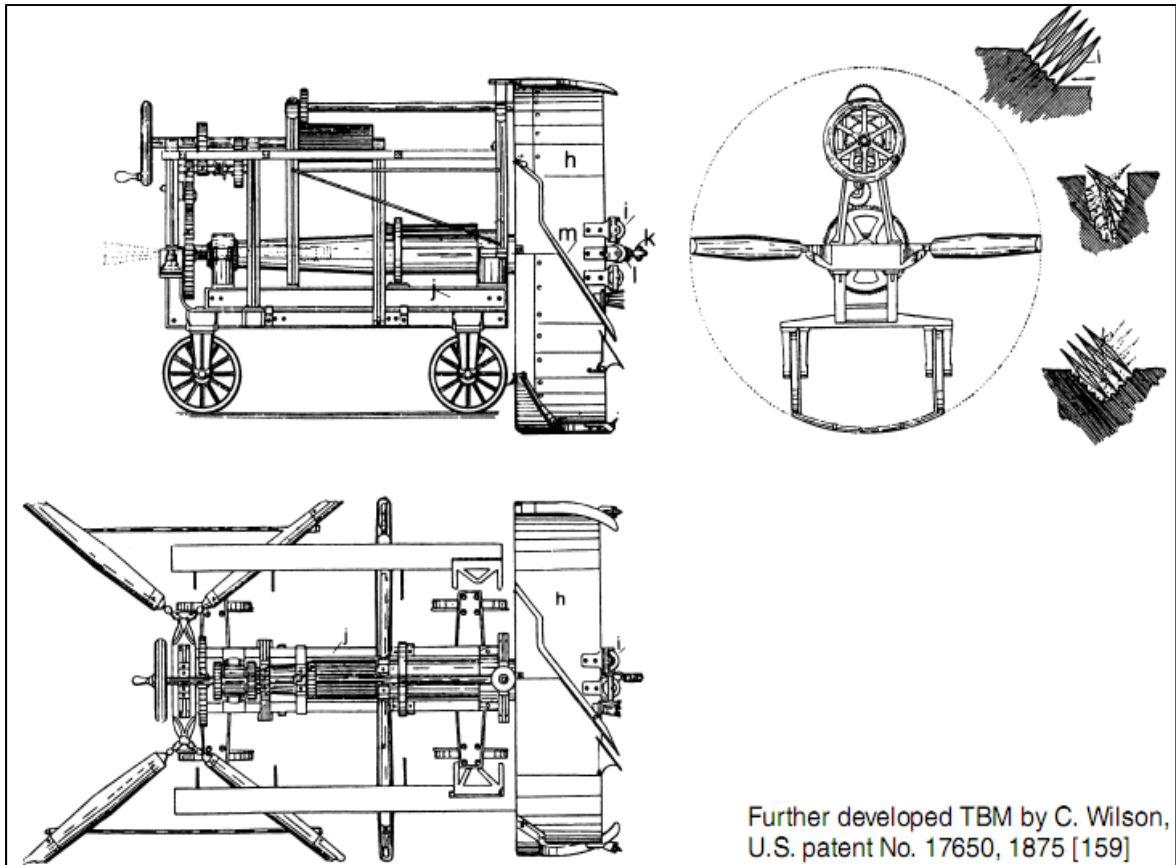


Figura 2-8. Desenvolvimentos adicionais para TBM por Wilson, U.S. patente No. 17650, 1875 (Maidl *et al.*, 2008).

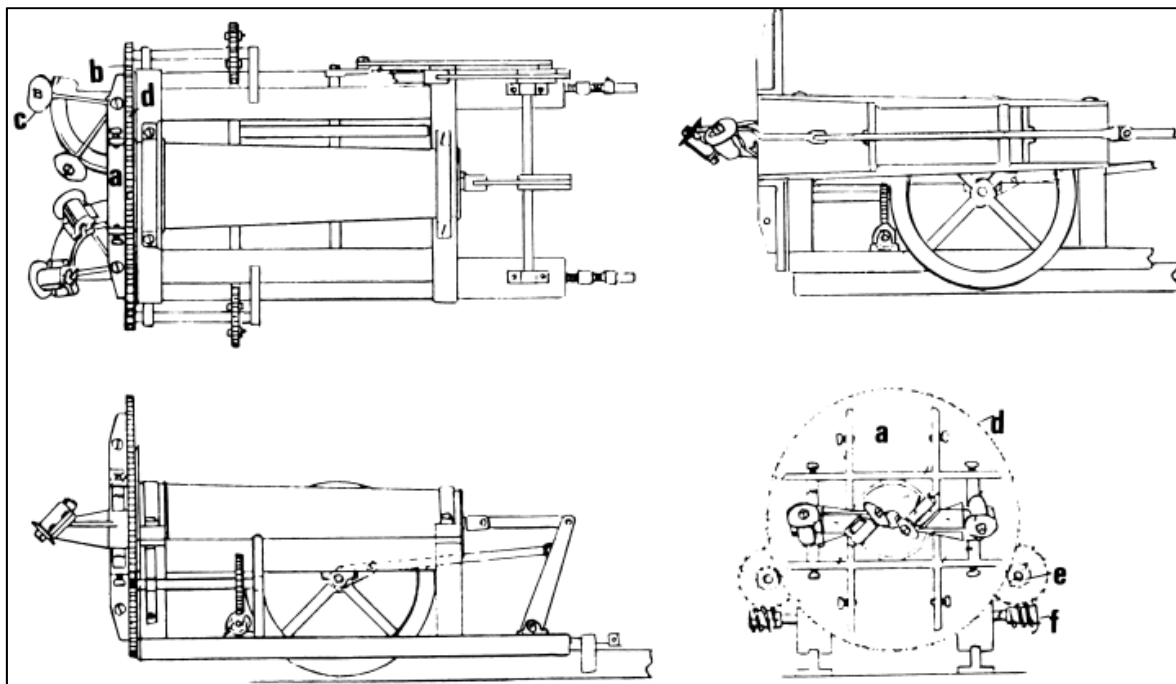


Figura 2-9. Máquina de túneis com cabeça de perfuração e braços oscilantes de corte por E. Talbot, U.S. patente No. 9774, 1853 (Maidl *et al.*, 2008).

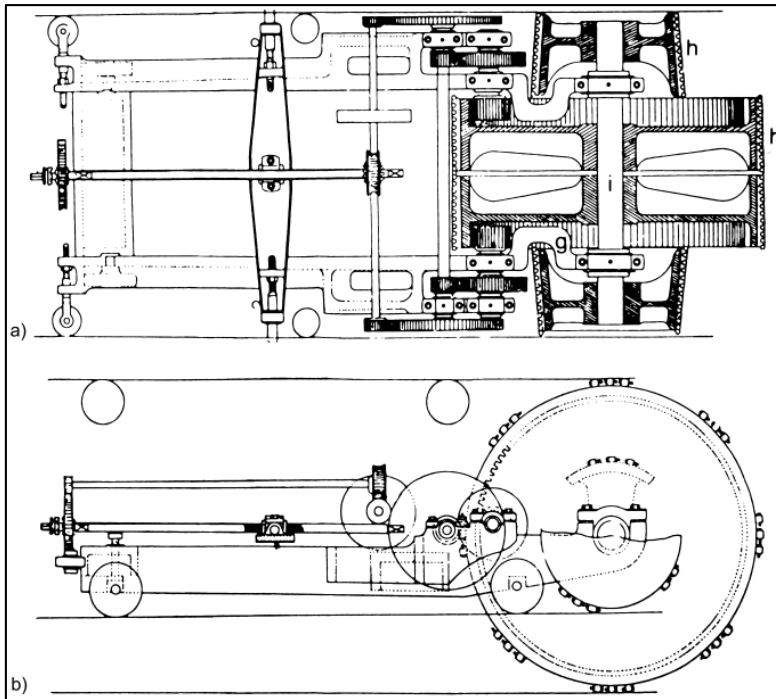


Figura 2-10. Máquina tuneladora por Cooke e Hunter U.K. patent No. 433, 1866 (Maidl *et al.*, 2008).

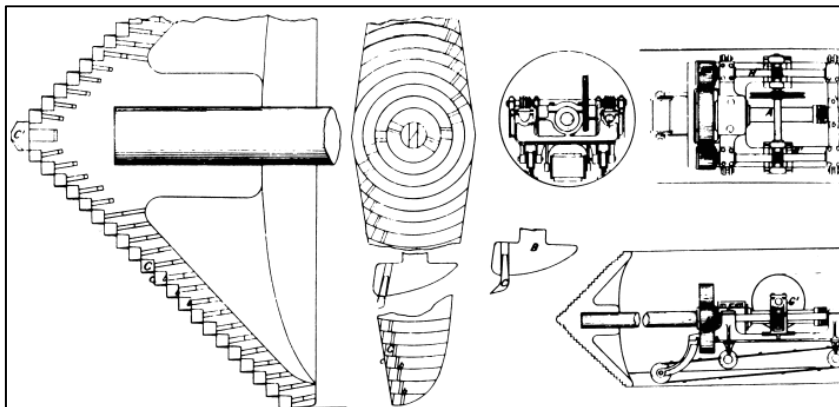


Figura 2-11. TBM por Beaumont U.K. patent No. 4166, 1863 (Maidl *et al.*, 2008).

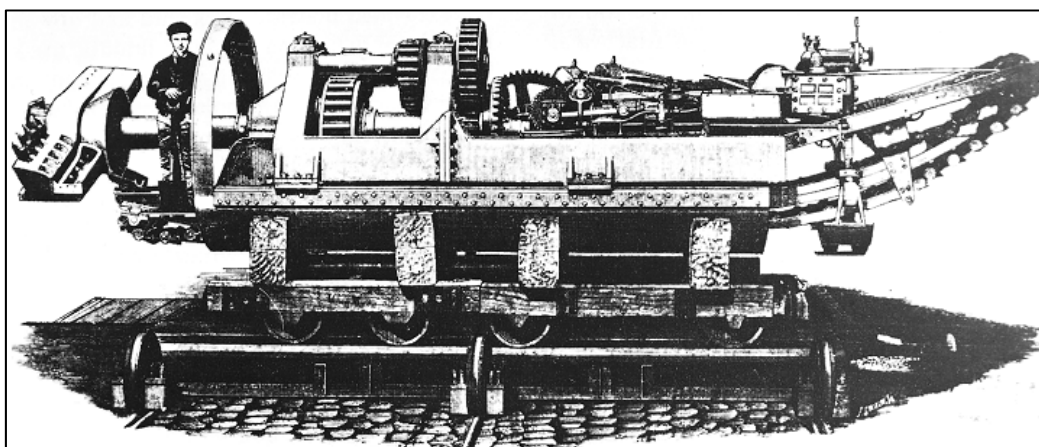


Figura 2-12. TBM por Beaumont/English,  $\phi$  2.13m, túnel Channel, 1882 (Maidl *et al.*, 2008).

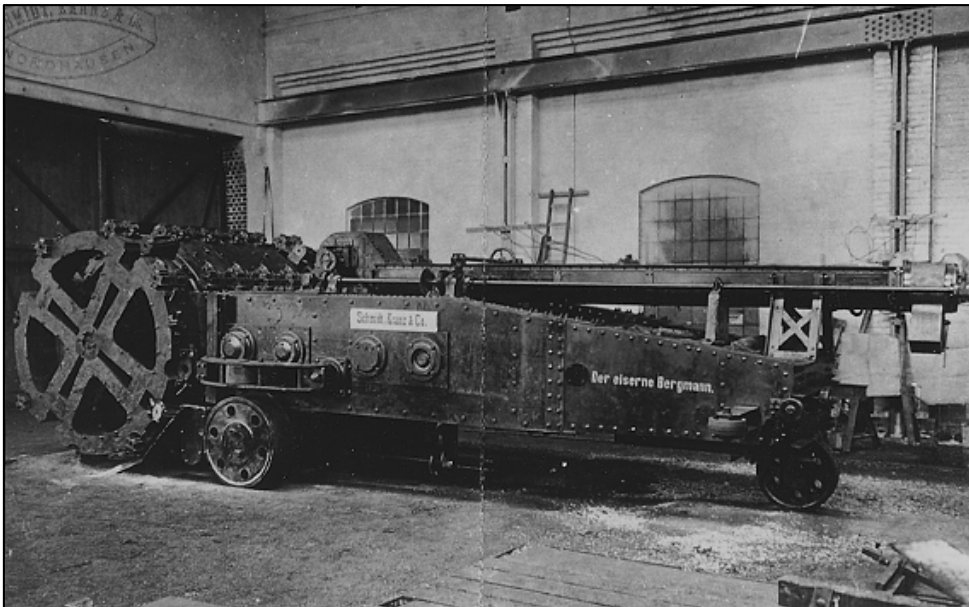


Figura 2-13. Máquina de corte de galeria “Eiserner Bergmann” 1916/17 de Schmidt, Kranz *et al.* (Maidl *et al.*, 2008).

Na Figura 2-14 se ilustra o *shield* perfurador usado na construção do túnel do Rio St. Clair, entre os Estados Unidos da América e o Canadá, no fim do século XIX (Da Cruz, 2006).

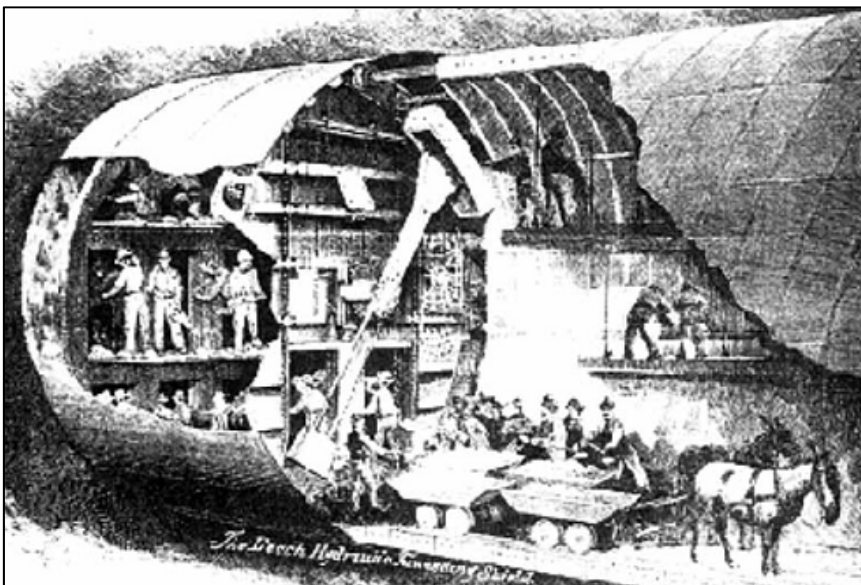


Figura 2-14. Construção do túnel do Rio St. Clair, fim do século XIX (Da Cruz, 2006).

As seguintes máquinas escavadoras de galerias produzidas por Schmidt, Kranz & Co. em 1931 foram mais bem sucedidas (Fig. 2-15). A roda de corte era equipada de agulhas e atingia uma taxa média de 5 m por deslocamento. Cinco pessoas eram necessárias para operar a máquina. As desvantagens desta máquina, que foi usada em uma mina húngara de carvão, eram: o tamanho, o peso, a pouca mobilidade e o tempo gasto para fazer a máquina retroceder.

Na prática, esta máquina era usada para perfurações rápidas de investigação e galerias de ventilação. A similitude com a TBM construída por Whittaker para o Túnel Chanel nos anos 1920 é evidente (Fig. 2-16). Esta atingiu uma velocidade de avanço de 2,7 m/h num teste em *chalk*, perto de Folkestone (Maidl *et al.*, 2008).

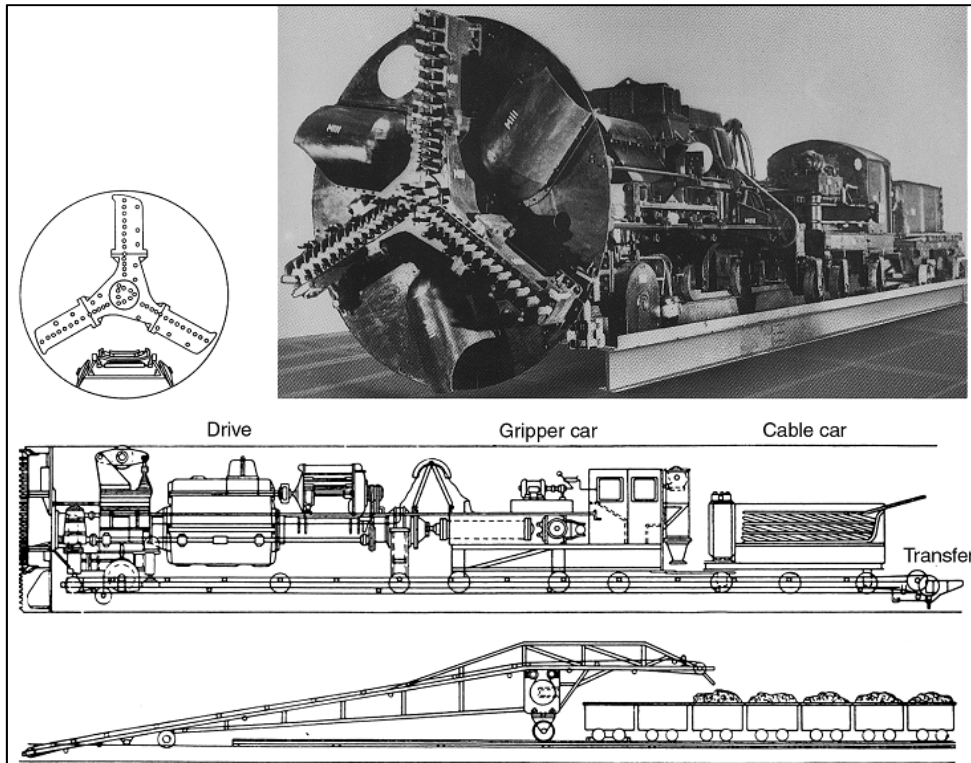


Figura 2-15. Máquina de corte de galeria de Schmidt, Kranz *et al.*,  $\phi$  3 m, 1931 (Maidl *et al.*, 2008).

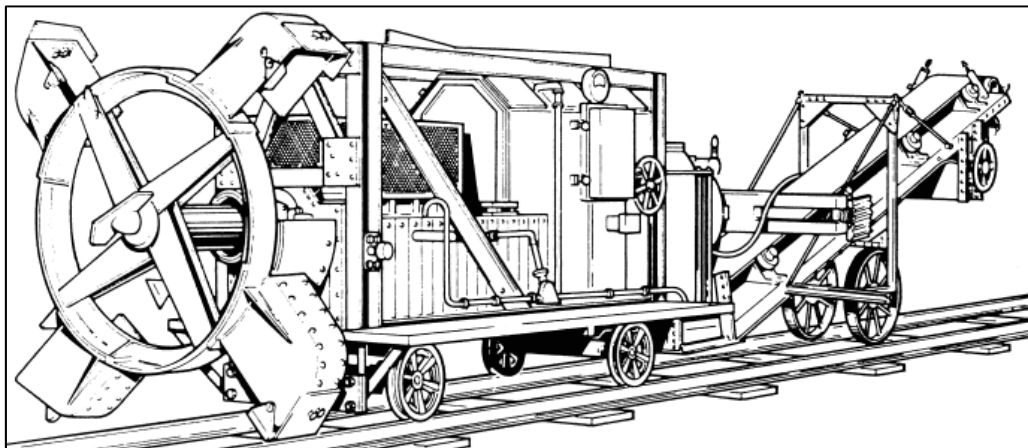


Figura 2-16. TBM por Whitaker,  $\phi$  3,6 m, 1922 (Maidl *et al.*, 2008).

No entanto, foi na década de 1950 que se deu o avanço que levou até às atuais TBMs, quando a primeira TBM aberta *Gripper* (*Open Gripper*) foi desenvolvida pelo engenheiro de minas James S. Robbins.

“Estas toupeiras gigantes, também conhecidas por tuneladoras, foram utilizadas pela primeira vez em 1957 em Toronto, no Canadá, para abertura de um túnel de esgoto em formações de xisto e calcário”.

(Moreira, 2012, p.97).

No começo de 1950, F. K. Mitry ganhou um contrato para a construção do desvio da Barragem Oahe em Pierre, Dakota do Sul. Mitry consultou a James S. Robbins sobre a escavação do difícil xisto de Pierre. Assim, Robbins construiu uma máquina que finalmente foi capaz de cortar 160 pés (48,8m) em 24 horas (aproximadamente 2m/hora) no xisto de Pierre, obtendo uma velocidade de avanço dez vezes mais rápida que qualquer outra forma de escavação disponível naquele tempo (ver Fig. 2-17 a).

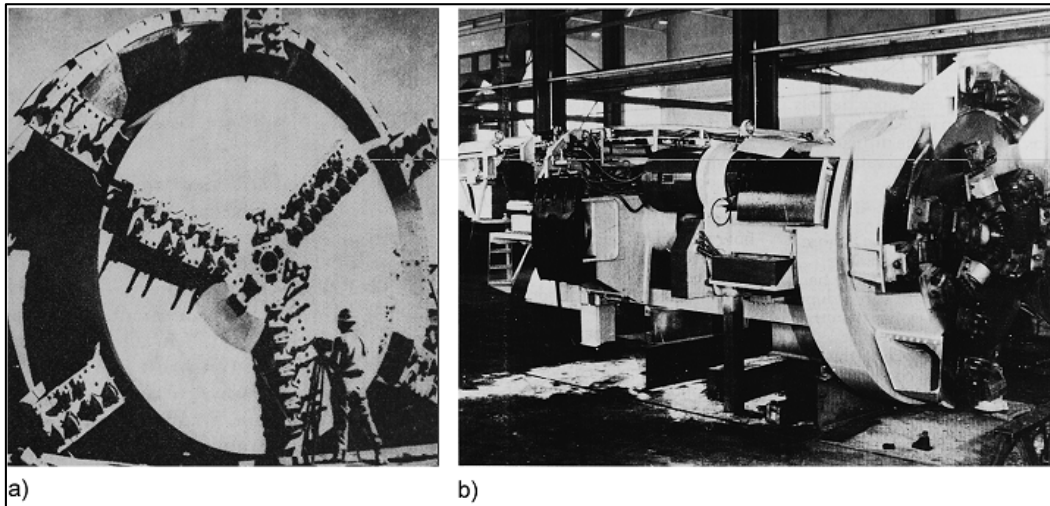


Figura 2-17. TBMs de Robbins: a) Primeira TBM Robbins, modelo 910-101, Barragem Oahe,  $\phi$  8 m, 1953 e b) Primeira TBM *Gripper* moderna von J.S. Robbins, modelo 910-101131-106, túnel de esgoto no Rio Humber (Toronto, Canada),  $\phi$  3,27 m, 1957 (Maidl et al., 2008).

A principal descoberta que levou ao sucesso desta máquina foi a invenção da cabeça de corte, conceptualmente baseada no mesmo princípio que a cabeça de brocas à percussão da *Mountain Slicer* de Henri-Joseph Maus. No entanto, com aprimoramento na eficiência, e, uma redução na quantidade de elementos de corte, os quais giravam como um todo contra o material a ser escavado.

Inicialmente a TBM de Robbins usou espigões fortes girando num movimento circular para atacar a frente de escavação. Mas rapidamente ele descobriu que estes espigões, independente de quão fortes fossem, tinham que ser trocados com muita frequência, pois quebravam ou soltavam. Substituindo estes espigões de corte por rodas de corte (discos) mais duradouras, este problema foi significativamente reduzido. Desde então todas as TBMs modernas

possuem cabeças de corte rotacionais equipadas com discos de corte para escavar materiais competentes como a rocha.

Usando esta TBM no túnel de esgoto no Rio Humber no Canada, foram atingidos avanços de 30 m/dia em arenito, folhelho e argila (Fig. 2-17 b). A escavação mecanizada nessa época era principalmente concentrada em rochas estáveis e relativamente brandas. Com o sucesso crescente de Robbins, outros fabricantes americanos como Hughes, Alkirk-Lawerence, Jarva e Williams começaram a construir TBMs. Máquinas atuais como a TBM de viga principal e a TBM *Kelly* tiveram seus origens nesse período.

Depois de um tempo o desenvolvimento de máquinas tuneladoras na Europa começou seguindo diferentes linhas de desenvolvimento. Baseado na experiência obtida em uma mina de carvão com a máquina Czech Bata, o engenheiro austríaco Wohlmeyer desenvolveu a tecnologia de *undercutting* com rodas giratórias de trituração (*rotating milling wheels*) (Fig. 2-18 a). Essa tecnologia não foi bem compreendida, e também não foi compreendida a utilizada pela companhia Bade com uma cabeça de corte dividida em três anéis contra-rotativos acoplados com brocas de rolos dentados, que já eram desatualizadas no tempo em que foi realizado o teste (Fig. 2-18 b). Os dois tipos de máquina não foram bem sucedidos na rocha dura de Ruhr, porém outras máquinas de Wohlmeyer foram aplicadas com êxito no túnel Seikan.

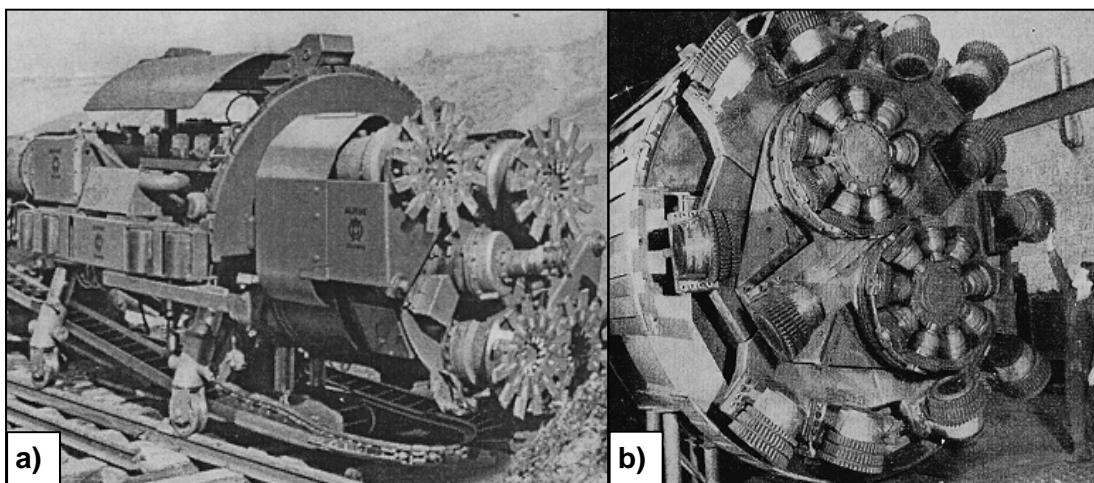


Figura 2-18. Primeiros desenvolvimentos de TBMs na Europa: a) máquina de corte SBM 720 da galeria Wohlmeyer (Österreichisch Alpine Montan-Gesellschaft),  $\phi$  3 m, 1958 e b) TBM SVM 40 (*Bade*) operada na indústria de mineração de carvão,  $\phi$  4 m, 1961 (Maidl *et al.*, 2008).

A tecnologia de corte *undercutting* tem sido usada e desenvolvida ao longo de várias décadas por vários fabricantes como: Habegger, AtlasCopco, Krupp,

IHI e Wirth, devido às vantagens que oferece como menor força normal requerida e a habilidade de trabalhar em seções não circulares.

A separação da TBM Bade em uma secção frontal com a cabeça de corte e uma secção traseira, que era apoiada hidráulicamente por quatro grandes placas de pressão contra os lados do túnel para proporcionar reação para o portador de cabeça de escavação, a qual é retirada após o curso completo de avanço do cilindro, estas são características também visíveis nas máquinas modernas de *shield* duplo (*Double Shield TBMs*) (Maidl *et al.*, 2008).

Nos anos 60, fabricantes alemães como Demag e Wirth começaram a construir máquinas do tipo norte-americano. Estas máquinas foram destinadas principalmente para escavar rocha dura. Ferramentas de perfuração de tecnologia para escavação profunda, como TCI ou *bits* dentados eram montadas nas cabeças de perfuração. O desenvolvimento da tecnologia de endurecimento dos discos de corte também permitiu aplicá-los em rocha dura. No final dos anos 60, galerias inclinadas e túneis de grandes seções foram feitos pela primeira vez usando o método de alargamento, o desenvolvimento do alargador de escavação está associado com a companhia Murer (ver Fig. 2-19).

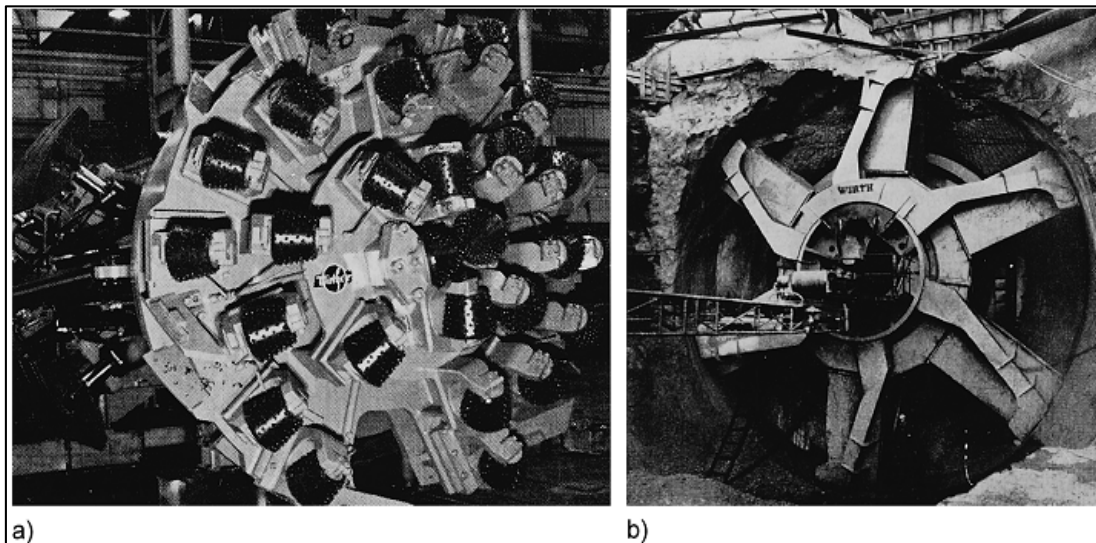


Figura 2-19. Tipos especiais de TBM Wirth: a) TBM para galeria inclinada TB II-300 E, túnel de pressão Emosson,  $\phi$  3 m, 1968 e b) TBM de alargamento TBE 770/1046 H, túnel Sonnenberg,  $\phi$  7.70 m/10.46 m, 1969 (Maidl *et al.*, 2008).

O desenvolvimento durante as décadas de 1970 e de 1980 foi direcionado para a escavação em rocha frágil e a escavação de seções maiores, levando em consideração o tempo de suporte do solo/rocha. Motivados pelo sucesso de uma TBM *Gripper* de 11,17 metros de diâmetro na represa Mangla em 1963, outra

TBM *Gripper* de 10,65 metros também foi utilizada na construção do túnel Heitersberg na Suíça em 1971.

O trabalho necessário para segurar a rocha com a instalação de malha de aço, ancoras e concreto projetado fez que o avanço previsto fosse impossível de atingir. A adaptação requerida para uma seção transversal grande foi atingido em 1980 por uma modificação na máquina TBM *Gripper* da Robbins do túnel Heitersberg pela companhia Locher und Prader, transformando-a em uma TBM de *shield*, com um segmento de revestimento para o avanço no túnel Gubrist ( $\phi$  11,50m) (Fig. 2-20 a). Tanto o fabricante Herrenknecht como Robbins, tem fabricado máquinas TBM com *shield* em diâmetros entre 11 e 12,5 metros. Ao mesmo tempo, Carlo Grandori desenvolveu o conceito da TBM de *shield* duplo e com a colaboração de Robbins colocou-o em prática na construção do túnel de pressão Sila na Itália, com um diâmetro de 4,32m (Fig. 2-20 b).

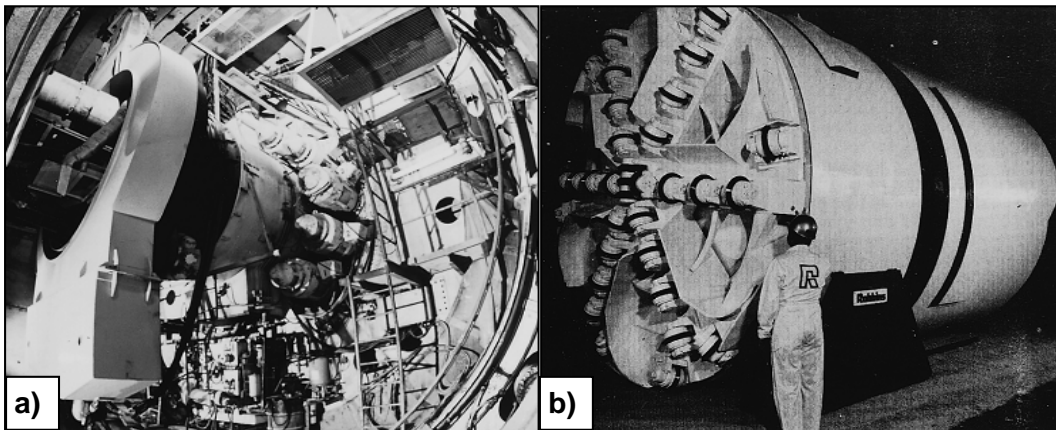


Figura 2-20. TBM com *shield*: a) TBM de *shield* simples, túnel Gubrist,  $\phi$  11,50 m, 1980 e b) TBM de *shield* duplo, túnel de pressão Sila,  $\phi$  4,32 m, 1972 (Maidl *et al.*, 2008).

A motivação principal do desenvolvimento desta máquina era fazer com que a TBM *Gripper*, que já tinha provado ser eficiente em condições geológicas apropriadas, fosse mais flexível para uso em condições de heterogeneidade.

Desde seu primeiro uso em 1972 e com o sucesso da modificação realizada, as TBMs de *shield* duplo somado ao desenho de revestimentos customizados, têm atingido elevadas taxas de avanço em condições desfavoráveis e foram fabricadas por todos os fabricantes reconhecidos, especialmente na faixa de diâmetros intermediários. A capacidade deste tipo de TBM foi demonstrada de forma contundente no final dos anos 80 no *chalk* do Túnel Channel (Maidl *et al.*, 2008).

Por outro lado os fabricantes de TBM abertas *Gripper* (*open Gripper TBMs*) começaram a investigar possibilidades de melhorias para suas máquinas, de forma a permitir a instalação do revestimento caso fosse necessário. Foi testado

concreto projetado ao redor da máquina. O estado de desenvolvimento das TBM de grande diâmetro atuais está na instalação dos elementos do revestimento imediatamente atrás do *shield* escavador ou em áreas parciais do *shield* e na instalação sistemática de ancoras.

Com máquinas TBM menores, o corpo da máquina dificulta a instalação do revestimento ao redor com equipamento mecânico, considerando que o revestimento deve ser colocado de forma rápida, ele tem que ser realizado manualmente, o que gera uma redução na taxa de avanço.

Atualmente o desenvolvimento das TBMs *Gripper* está focado em permitir a instalação do revestimento por meios mecânicos tão rápido quanto possível, melhorando o desempenho ao reduzir o tempo necessário para a instalação. Outras reduções do tempo de escavação só levariam a um aumento marginal das taxas de avanço, pois hoje as TBMs já têm taxas de disponibilidade ou uso de 80 a 90 por cento.

No futuro será necessário adaptar o desenho do revestimento projetado para túneis convencionais aos requerimentos da escavação com TBMs *Gripper* como se destaca na Figura 2-21. O risco de uma TBM de *shield* entalar rapidamente é um fato que tem sido amplamente reportado, junto ao problema de um revestimento rígido, isto também demandara inovações, embora nenhum caso relevante tenha sido dado a conhecer para TBMs de *shield* simples.

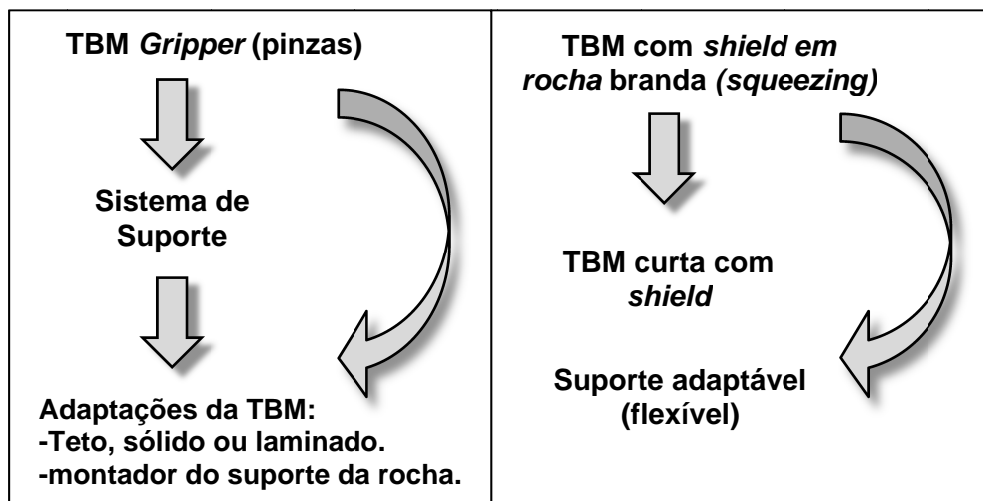


Figura 2-21. Inovações futuras (Maidl *et al.*, 2008).

Como bem expõem Maidl *et al.* (2008), a evolução das máquinas para escavar túneis tem sido longa, árdua e eventualmente perigosa, desde as primeiras idéias e protótipos até as atuais TBM, equipadas com tecnologia de ponta e que oferecem um espaço de trabalho seguro.

Pôde-se observar ao longo deste percurso histórico que, a cada erro ou dificuldade, surgiu uma oportunidade de melhorar. O ciclo de aprendizagem é contínuo e existe uma constante reinvenção com base na experiência adquirida, na engenhosidade e na adaptação as imprevisibilidades dos projetos subterrâneos em meios geológicos diversos.

## 2.1.

### Projetos de túneis escavados com TBM no mundo

Como mencionado anteriormente, a primeira TBM considerada “moderna” foi desenvolvida pelo fabricante Robbins e utilizada na América do Norte em 1953. Posteriormente outros fabricantes da América, Europa e Ásia começaram a desenvolver suas próprias máquinas tuneladoras.

Segundo Herrenknecht e Böppler (2008), as inovações tecnológicas incentivaram a realização de projetos com escavação mecanizada. Vinte anos atrás, a maioria dos projetos era feito com métodos convencionais. Uma das principais causas do crescimento no mercado de construção de túneis é a expansão do transporte e meios de infraestrutura em cidades e regiões com um rápido crescimento econômico. Assim projetos com este tipo de máquina se tornaram mais comuns em grande parte do mundo.

Na Europa um dos projetos mais emblemáticos é o Túnel Gotthard, que atravessa os Alpes suíços, ligando a Suíça à França. Com 90 km de comprimento este túnel é o mais longo do mundo. Os trabalhos começaram em 2003 com quatro TBM *Gripper* Herrenknecht, que depois aumentaram a seis. Em 2011 foi finalizada a escavação do túnel com muito sucesso e se estima que o projeto esteja em operação em 2017 (Herrenknecht, 2014). Este é um exemplo dos muitos outros projetos na Europa

Na Ásia, especificamente em países como Coreia e Japão, as TBMs têm sido utilizadas de forma extensiva em muitos projetos. Lee *et al.* (2011) relatam que desde a introdução pela primeira vez na Coreia em 1985, realizaram-se 78 projetos com TBM, somando mais de 247 quilômetros no total.

No caso da América existem muitos exemplos de projetos executados ou que estão sendo executados utilizando TBMs. Por exemplo, na cidade de Seattle nos Estados Unidos esta sendo usada a maior TBM do mundo, chamada de “*Big Bertha*” e com 17,5 metros de diâmetro. No México também existem vários projetos, por exemplo, um túnel de 6,8km para águas residuais executado na

Cidade do México DF, e, que foi escavado utilizando uma TBM EPB de 6,3m de diâmetro.

Na América do Sul, por exemplo, existe um elevado número de projetos de infraestrutura orientados a modernizar sistemas de Metrô, de transporte e melhorar sistemas de fornecimento de água, saneamento e energia, em especial nas grandes cidades. (Herrenknecht e Böppler, 2008).

Em 1996 a primeira máquina TBM do fabricante Herrenknecht foi entregue na América do Sul. No total eram duas máquinas EPB com diâmetro de 4,35m, que escavaram 15,3 km de túneis em Buenos Aires, na Argentina, no túnel Saavedra-Moron. Os comprimentos dos túneis foram de 3,56 km, 4,2km, 3,7km e 3,8km, com uma cobertura ao redor de 35 metros. A geologia variou entre areia, argila e siltes duros preadensados com nódulos de calcário e pressões de água no terreno de até 250 kPa (2,5 bars). O solo foi tratado usando *foam* ou bentonita. Ambas as máquinas estavam equipadas com sistemas de injeção integrados capazes de permitir ao operador da máquina escolher entre o *foam*, a bentonita ou uma mistura dos dois agentes.

Depois da escavação dos dois primeiros trechos, as duas cabeças de corte foram adaptadas para as condições do terreno que não foram previstas, de modo que foi aumentada a abertura para entrada de material na frente para que se obtivesse um melhor fluxo do material perfurado até o parafuso de coleta de material. O revestimento do túnel consistiu em anéis de 30 cm de espessura e 1,2m de comprimento, com cinco aduelas ou segmentos e uma chave com juntas longitudinais somente. Foram registradas taxas de avanço de até 42 m por dia e de 198m por semana (Herrenknecht e Böppler, 2008).

Em Caracas, capital da Venezuela o sistema de metrô foi modernizado. As primeiras tuneladoras EPB da Herrenknecht chegaram em 2001 para realizar dois túneis que seriam parte da nova Linha 4. A extensão combinada dos túneis é de 7.716m e a escavação foi terminada em abril de 2005. As condições geológicas na cidade de Caracas se tornaram imprevisíveis, com pedregulhos e blocos de rocha de até um metro de diâmetro no solo mole. Além das áreas de construções antigas o túnel foi executado muito perto das fundações de alguns dos prédios mais altos da cidade.

No total 10 tuneladoras EPB do fabricante Herrenknecht foram solicitadas para a execução de 59 km de túneis nas novas linhas do metrô de Caracas, das quais oito são do tipo conversível EPB/ *Hard Rock* TBM. No modo EPB aberto ou fechado o material é extraído pela banda transportadora ou parafuso de Arquimedes, respectivamente. Em zonas de rocha dura, as máquinas operam

como uma máquina para rocha, com uma banda transportadora que leva o material para fora da zona de escavação.

Para operar nas zonas de frente de escavação mista, com areias, argila e rocha, a cabeça de corte foi desenhada com *bits* de arraste para solo mole e anéis duplos ou simples de discos de corte, colocados paralelos à cabeça de corte, os quais podiam girar bidireccionalmente.

Com o objetivo de monitorar e prever as condições das peças de corte e dos *buckets* (baldes), especialmente aqueles localizados na área exterior de carga da cabeça de corte, 2 *buckets* e dois *bits* de arraste foram equipados com um sistema eletrônico de detecção. Este sistema gera dados *online* das peças de corte selecionadas, e permite assim para o operador da TBM prever condições do uso para as ferramentas. Com este sistema eletrônico de medição de desgaste ou uso das ferramentas de corte, os trabalhos de manutenção podem ser planejados e a vida de serviço das ferramentas podem ser otimizadas.

Em São Paulo uma EPB *Shield* de 9,46m de diâmetro escavou 6,4 km de túnel da Linha 4 do metrô. Esta linha liga o metrô com a rede de trens suburbanos, integrando assim todo o sistema ferroviário com a rede de ônibus intermunicipais. A geologia ao longo do traçado consistia de solos terciários, silte, areia, além de gnaiss. O túnel foi revestido com anéis de concreto pré-fabricados, com um diâmetro interno de 8,43m, cada anel de 1,5m de comprimento e composto de sete aduelas e uma chave (Fig. 2-22) (Herrenknecht e Böppler, 2008).

Na América Central em 2011, especificamente no Panamá, começaram os trabalhos da Linha 1 do metrô, neste projeto estão sendo utilizadas duas TBMs de 9,73 metros de diâmetro, com um comprimento de 90 metros e pesando 1400 toneladas cada uma. O custo deste projeto é estimado em torno de \$ 1.800 milhões e, desta forma, o Panamá se torna o nono país a ter uma linha de metrô na América Latina. Nesta mesma região do continente, na Costa Rica em 2011 uma TBM EPB de 7,8 metros de diâmetro começou seus trabalhos num projeto de geração hidroelétrica na província de Cartago com um custo estimado de 45 milhões de euros (Diário Extra, 2013).

Assim é possível observar que na América vários países já utilizaram este tipo de equipamento, tais como: Estados Unidos, México, Panamá, Costa Rica, Brasil, Peru, Chile, Venezuela, Colômbia, Equador e Argentina.

Na Tabela 2-1 se apresentam alguns dos projetos mais relevantes realizados na Cordilheira dos Andes sul-americana (Palma *et al.*, 2014).

Tabela 2-1. Túneis terminados e em execução na Cordilheira dos Andes sul americana (Palma *et al.*, 2014).

Projeto	Localização	Ano	Extensão (km)	Diâmetro (m)
Yacambu Quibor	Venezuela	1975-2008	24,0	4,5
Carhuaquero	Peru	1990-1992	6,5	3,8
Rosales	Colombia	1991-1992	9,1	3,5
Río Blanco	Chile	1992-1993	11,0	4,6
Pappallacta	Ecuador	1988-1990	6,2	3,2
Misicuni	Bolívia	1998-2003	19,5	3,5
Chimay	Peru	1998-1999	4,0	5,7
Manubi	Ecuador	2000-2002	11,4	4,0
Yucan	Peru	2000-2005	6,7	4,1
San Francisco	Ecuador	2006-2007	9,7	7,1
Trasvase Olmos	Peru	2008-NA	9,7	7,1
Los Bronces	Chile	2009-NA	8,0	4,5
CH Chacayes (T. Desvío Cipreses)	Chile	2010-finalizado	2,5	5,0

## 2.2.

### Obras subterrâneas no Brasil e as máquinas TBM

A indústria tuneleira no Brasil começou a desenvolver-se na segunda metade do século XIX, mesmo antes do uso da dinamite para a escavação de túneis em rocha. Os primeiros túneis ferroviários no Brasil foram abertos por volta de 1860, sendo o trabalho mais importante, a longa serie de 15 túneis conhecidos como seção 2 da Estrada de Ferro Dom Pedro II, no Japeri-Barra de Pirai, Linha da serra do Mar no estado do Rio de Janeiro. Este projeto totalizou 5220 metros. O túnel mais destacado foi o Túnel Grande com 2238 metros de comprimento. Segundo Silva Telles (2006) citado por Rocha (2012), a obra começou em 1858 e foi concluída em junho de 1864, sendo inaugurada em dezembro de 1865. Estes túneis foram escavados com ponteiro, marreta e pólvora negra, pois ainda não existiam as perfuratrizes mecânicas nem a dinamite.

Nos seguintes anos vários túneis foram construídos no Brasil, no entanto os túneis considerados modernos começaram somente a partir de 1950 e 1970. Todos os tipos de métodos construtivos foram utilizados neste período, o novo método Austríaco de escavação de túneis ou NATM, valas a céu aberto (*Cut&cover*) e TBMs (*Tunnel Boring Machines*). A Linha 1 do Metrô de São Paulo foi parcialmente escavada com uma TBM de face aberta, considerado o primeiro

Shield de grande diâmetro utilizado no Brasil e chamado de TBM *Shield Blade* (Fig. 2-22 a) (Rocha, 2012).

Em 2011 foi utilizada uma TBM EPB de 9,46 metros de diâmetro para a escavação de túneis de via dupla na Linha 4 do metrô de São Paulo em solos brandos (argila, areia e siltes), sendo esta muito mais avançada que a utilizada na década de setenta e escavando 6,5 km sem acidentes ou incidentes (Fig. 2-22 c e Fig.2-23).

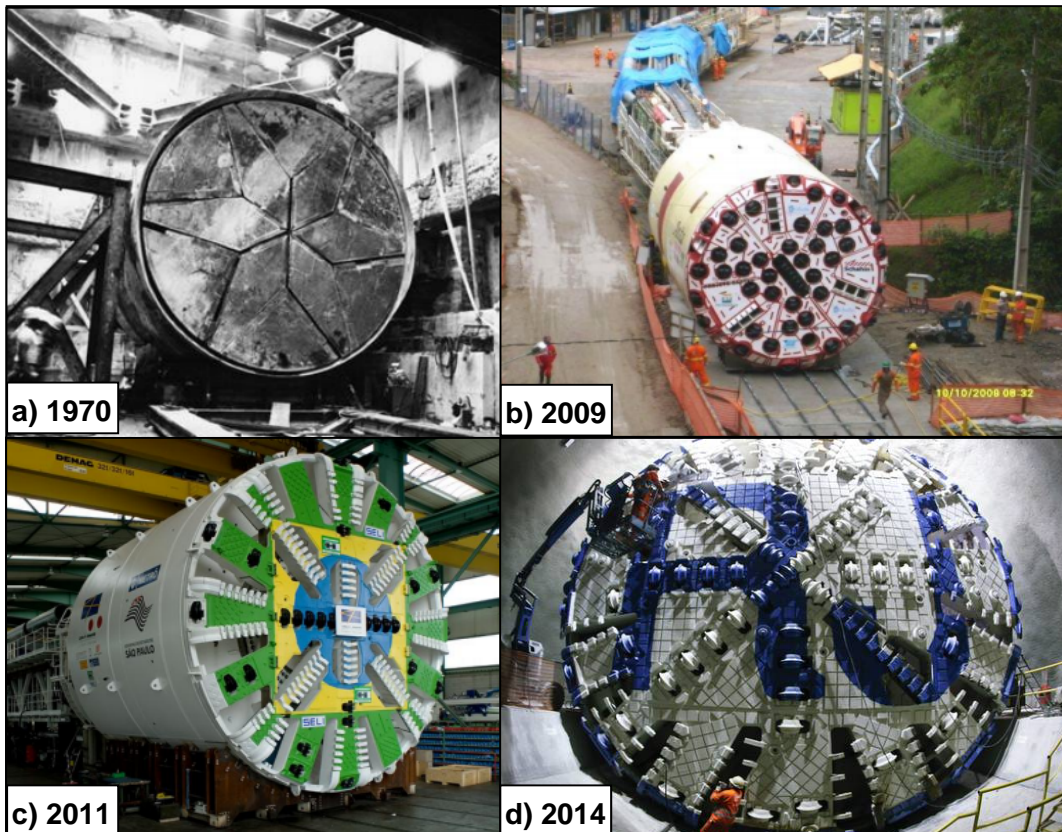


Figura 2-22. Evolução das máquinas TBM utilizadas no Brasil (Rocha, 2012).



Figura 2-23. Revestimento de aduelas de concreto pré-moldadas. Túnel do metrô Linha 4 amarela, São Paulo (Palma *et al.*, 2014).

No entanto a primeira TBM para rocha foi utilizada em 2009, uma TBM de *shield* duplo (*Double Shield*) para rocha dura, chamada de Anita (Fig.2-22 b e Fig.2-24), com 130 m de comprimento dos quais 30 m correspondem ao *shield* e 100 m ao *backup*.

Esta máquina foi utilizada para a escavação do Túnel Gastau de 5,2 km, onde 300 m utilizaram o NATM e 4900 m foram escavados com TBM através de granito, gnaisse, migmatito e diques de diabásio. Cerca de 90% do túnel apresentou classificação do maciço rochoso tipo I e II segundo o sistema de Bieniawski, além de coberturas de até 540 metros e confinamento de até 1300  $\text{tf/m}^2$  ( $k_0$  entre 1,5 e 3). A rocha granítica intacta apresentou uma resistência a compressão simples (UCS) entre 86 MPa e 143 MPa e um índice de abrasividade Cerchar (CAI) entre 3,9 e 5,8 (Kochen, 2013). Este projeto permitiu à Petrobras transportar gás natural do nível do mar até o Vale do Paraíba a 700 m de altitude sem causar um impacto ambiental significativo (ELSNER, 2009).



Figura 2-24. TBM Anita, primeira TBM de *shield* duplo para rocha utilizada no Brasil (Rocha, 2012).

Outro projeto importante é o metrô do Rio de Janeiro. Desde a década de 1990, a Linha 1 foi sucessivamente estendida para o sul através de Copacabana e Ipanema até chegar na Estação General Osório. Novos estudos mostraram a importância de interligar a Barra da Tijuca a Ipanema, conduzindo à alteração do alinhamento original da Linha 1. Muitos dos importantes projetos de desenvolvimento imobiliário tiveram lugar na Barra da Tijuca nos últimos anos. Avenidas altamente congestionadas são atualmente as únicas ligações possíveis

para o centro da cidade e o percurso pode levar duas horas, ou mais, para percorrer os 28 quilômetros de extensão. O novo traçado da Linha 4 vai desde a Estação General Osório, em Ipanema até a Estação Jardim Oceânico, na Barra da Tijuca. Esta linha será totalmente subterrânea e terá 14 km de comprimento e seis novas estações.

Atualmente este projeto está em construção. O trajeto de 4,6 km, que liga Ipanema à Gávea está sendo escavado com uma TBM EPB de face mista de 11,46 metros de diâmetro, cerca de 120 metros de comprimento e 2700 toneladas. Esta TBM é a maior máquina deste tipo já utilizada na América Latina (Fig. 2-22 d). Esta TBM terá que escavar tanto em solo (areia) como em rocha. Estima-se a conclusão do projeto para o segundo semestre de 2015.

Atualmente existem outros projetos sendo planejados ou em fase de execução com este tipo de equipamento. Por exemplo, a Linha 3 - Leste do Metrô de Fortaleza, em fase de projeto básico, que vai ligar o centro da cidade com a parte sudeste da cidade. A estação terminal será localizada ao lado do Campus da Universidade de Fortaleza.

Os túneis de via serão escavados com 4 TBMs EPB de face mista (*mixed face*) de 6,9 m de diâmetro (Fig. 2-25), adquiridas da fabricante norte americana Robbins. Todas as 12 estações serão construídas com vala a céu aberto. Um aspecto importante é a necessidade de pressurização da TBM, para minimizar os impactos em superfície devido às camadas de areia grossa que ocorrem na região. Espera-se que este ano iniciem as operações de escavação.



Figura 2-25. TBM Robbins para Linha 3 leste do metrô de Fortaleza, Ceará (Palma *et al.*, 2014).

Além destes exemplos existem outros projetos como o Túnel Urbano Roberto Marinho em São Paulo e o sistema ferroviário de alta velocidade (TAV) que está sendo planejado para operar na região mais populosa e economicamente ativa do Brasil. O TAV será executado entre Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro, também ligando os aeroportos de Viracopos, Guarulhos e Galeão às suas áreas metropolitanas. O sistema será projetado para operar a uma velocidade máxima de 350 km/h.

A distância total estimada entre Campinas e Rio de Janeiro é de 511 km, sendo a distância entre São Paulo e Rio de Janeiro de aproximadamente 412 km. O traçado proposto pela ANTT terá 90,9 km de túneis, 46,6 km dos quais serão localizadas em áreas urbanas e 44,3 nas áreas rurais.

Nas áreas rurais, os mais longos túneis serão localizados na Serra das Araras, uma escarpa com cerca de 500 m de diferença de altitude. O custo total de construção estimado pela ANTT para os túneis, na fase de estudos de viabilidade, é de U\$ 6,3 bilhões dólares. Para pontes e viadutos a estimativa atinge U\$ 4,2 bilhões. A estimativa total para as obras civis é de U\$ 14,5 bilhões. Esses custos serão reavaliados quando um projeto de engenharia preliminar se tornar disponível. O processo de licitação para a concessão está em andamento (Rocha, 2012).

Das informações apresentadas é visível como o mercado de túneis no Brasil apresenta uma clara taxa de aumento na demanda. Há uma crescente necessidade por infraestrutura urbana. Desta forma as TBMs poderão se tornar cada vez mais presentes em projetos de infraestrutura principalmente em zonas altamente povoadas onde outros métodos não são tão convenientes.

### **2.3.**

#### **Escavação mecanizada com TBM vs. métodos convencionais**

A escolha entre estes métodos continua sendo um tema aberto à discussão. Nos últimos 30 anos estes métodos têm competido entre si e, da mesma forma, melhoraram com os avanços técnicos (Nord, 2006). A decisão de qual método adotar depende de muitos fatores que devem ser claramente estabelecidos e avaliados antes de tomar alguma decisão.

Na construção de túneis um dos aspectos mais influentes nas decisões é o custo, ao final o objetivo de um comprador (cliente) é adquirir o produto ao menor custo possível. No entanto, o difícil no caso de um túnel, é estimar com

precisão o “custo”, isto porque existem várias condições que o influenciam, sendo difícil ou caro defini-las antes de tomar uma decisão.

Cada um destes métodos oferece suas próprias vantagens e desvantagens, e depende de cada caso específico a idoneidade de um método ou outro. Por exemplo, o método de D&B (*Drill and Blast*) oferece mais flexibilidade e facilidade para lidar com condições não previstas, assim a variação na taxa de avanço em condições favoráveis e não favoráveis é menor neste método do que com uma TBM, desta forma é visível como o desempenho da TBM depende significativamente da previsão precisa das condições do túnel.

Além disto, em geral o método de D&B utiliza equipamentos que se adaptam ao tamanho do túnel, permitindo o trabalho de forma simultânea. Assim o efeito do incremento no tamanho do túnel é marginal. Ao contrário, no caso da escavação com TBMs o incremento no tamanho do túnel influencia o desempenho, pois a velocidade de rotação da cabeça de corte depende do raio do túnel e da capacidade dos rolamentos dos cortadores. Desta forma existe um limite prático para a velocidade máxima de giro da TBM, de forma que entre maior a seção do túnel menor as RPM da TBM e conseqüentemente, menor será o avanço.

Uma vantagem da escavação mecanizada é que perturba menos o maciço rochoso, reduzindo-se a necessidade de suporte e os problemas de instabilidade, contrário ao método tradicional onde os explosivos geram uma zona perturbada ao redor do perímetro da seção. Desta forma ao não usar explosivos, a escavação mecanizada oferece um ambiente de trabalho mais seguro. Em condições de áreas urbanas densamente povoadas a escavação com TBM torna-se muito atrativa, pois reduz o impacto na vida cotidiana da cidade, de forma que seu percurso se torna quase imperceptível, além de permitir trabalhar até 24 horas por dia.

Em condições apropriadas tem-se verificado que o avanço diário de uma TBM pode estar entre 11 e 50 metros por dia ou até mais, o que comparado ao avanço médio de 5 metros por dia do método tradicional resulta em uma ampla diferença e vantagem a favor da escavação mecanizada com TBM. Outra vantagem da escavação com TBM é o fato de se obter uma sobre escavação menor. Outra característica da escavação com TBM é que esta apresenta tempo não produtivo destinado a outras atividades como: a troca de peças de corte, manutenção, reparos no caso de que falhas aconteçam, e imprevistos. Em geral tem-se observado que o tempo efetivo de uso da TBM pode oscilar entre 60% e 20%. No caso do método de D&B esta porcentagem atinge até 90%.

Na Tabela 2-2 se resume algumas das vantagens da escavação com TBM quando comparada com o método de D&B.

Tabela 2-2. Vantagens da escavação com TBM (Tarkoy, 1995).

Aspecto	D&B	TBM
<b>Estabilidade</b>		Solução mecânica para estabilização temporária da frente de escavação e ao redor da área de trabalho
<b>Forma</b>	Qualquer forma é possível, no entanto a sobre escavação é inevitável	Naturalmente estavel, ideal para transição de maciços, túneis pilotos, túneis sem revestimento para condução de água, as características superiores de fluxo pode eliminar o requerimento de revestimento
<b>Sobre escavação</b>	variável	Perto de eliminá-la totalmente
<b>Suporte do túnel</b>	variável	Pode ser reduzido até 90%
<b>Operação</b>	Muito cíclico, perigoso e um ambiente de trabalho não muito confortável	Contínua (não cíclica), operação repetitiva, ambiente de trabalho mais seguro e confortável
<b>Detonação</b>	Aumenta o requerimento de suporte, aumenta o fluxo de água, aumenta a sobreescavação	
<b>Sobreescavação</b>	Custosa, além de ser preenchida com concreto	Eliminada
<b>Suporte</b>		Soluções mecânicas disponíveis para estabilização e suporte temporário da frente de escavação, ao redor da área de trabalho e permanentemente atrás da operação de escavação
<b>Equipe</b>	Todas as especialidades e habilidades são requeridas	Consistente, repetitiva, menos especializada, permite treino fácil das operações (o trabalho é asinado a tarefas limitadas que são repetitivas, se tornam rotina, e que podem gerar competição entre os trabalhadores)
<b>Estruturas de acesso</b>	Poços ( <i>Shafts</i> ) e galerias de acesso são necesarios para abrir várias frentes de trabalho	Pode eliminar todas as estruturas de acesso temporais, particularmente se o projeto é bem estabelecido

Existem variados exemplos de casos práticos onde diversos métodos tiveram sucesso ou fracassaram, devido às condições do local e a sua previsão precisa. Por exemplo, em condições de falhas no maciço que não foram previstas tem-se observado TBMs que atascaram durante vários meses, sendo preciso um trabalho árduo para liberá-las. Em casos extremos chegaram a deixar de lado a escavação mecanizada e continuaram utilizando os métodos convencionais (Barla e Pelizza, 2000).

Referente aos custos é importante ressaltar que as TBMs são máquinas caras, sendo necessária uma inversão inicial elevada, além de ser requerida mais infraestrutura no local. Desta forma, a factibilidade econômica depende muito das condições do projeto. Tem-se observado de forma empírica que existe uma relação entre a viabilidade econômica e a extensão do túnel, de forma que ao aumentar o comprimento a escavação mecanizada torna-se mais atrativa (Nord, 2006). As Figuras 2-26 e 2-27 ilustram este tipo de relação.

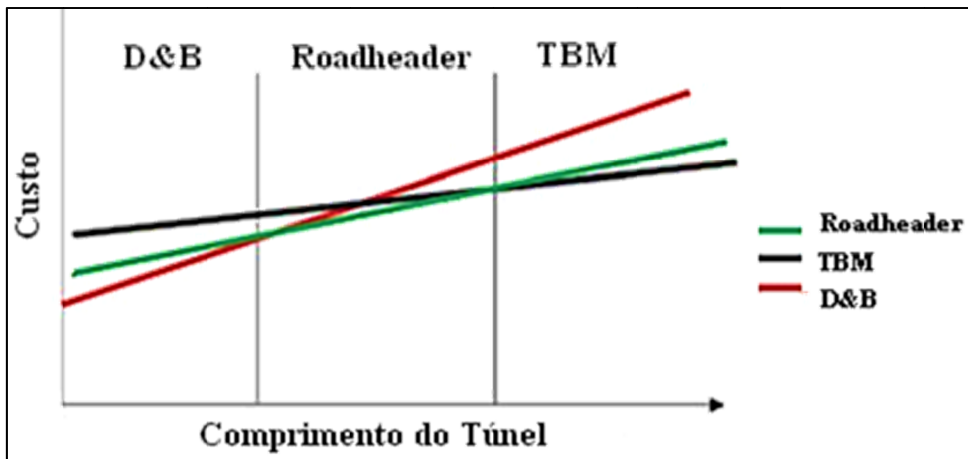


Figura 2-26. Relação entre o custo total dos diferentes métodos de escavação e a extensão do túnel (Palma *et al.*, 2014).

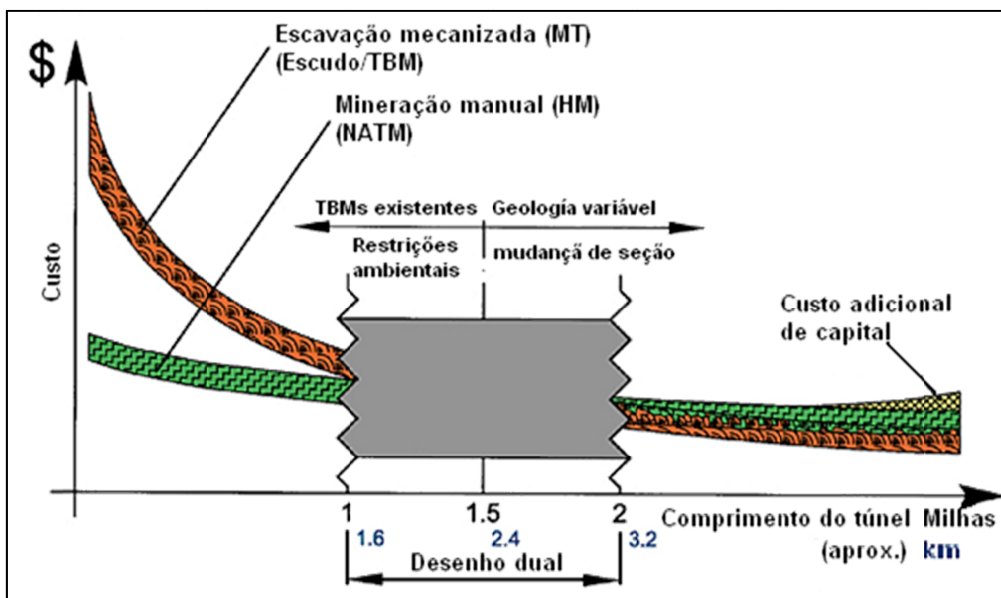


Figura 2-27. Relação entre o custo unitário e a extensão do túnel para escavação mecanizada e o método tradicional (modificado de Sauer e Mergelsberg, 2004).

Segundo Nord (2006) um indicador simples para determinar quando a solução com TBM pode ser viável se apresenta na eq. (2-1).

$$\frac{L_{T\underline{u}nel}[m]}{D_{T\underline{u}nel}[m] \times UCS[Pa]^{1/3}} > 1,5 \quad (2-1)$$

Onde:

$L_{T\underline{u}nel}$  = comprimento do túnel;

$D_{T\underline{u}nel}$  = diâmetro do túnel;

UCS = resistência a compressão simples.

Quanto maior o valor deste indicador, maior a certeza de que o uso da TBM deve ser levado em conta entre as opções disponíveis. Na Figura 2-28 se destaca uma observação obtida de muitos casos, a partir do sistema Q de Barton, indicando que no caso da TBM existe uma variação maior na taxa de avanço do que no método de D&B, de forma que a escavação mecanizada com TBM se torna mais competitiva para valores de Q entre 0,1 e 10, qualidade do maciço rochoso entre muito pobre, pobre e regular (Nord, 2006).

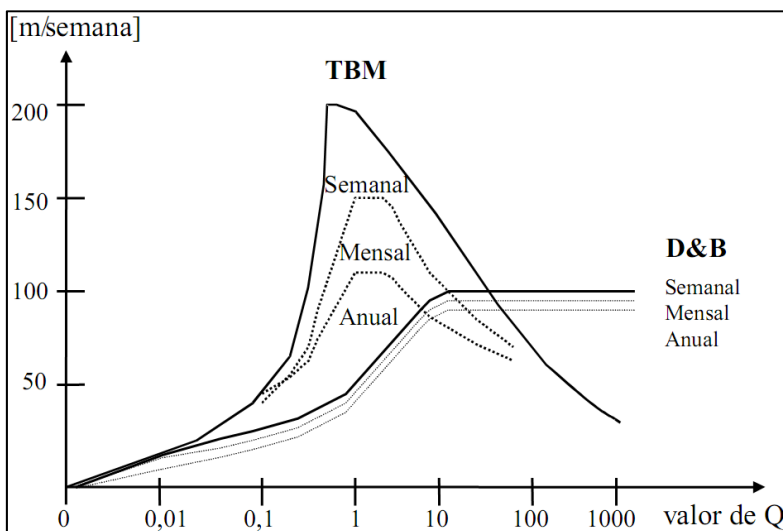


Figura 2-28. Comparação hipotética segundo Barton do método D&B vs. escavação com TBM (Nord, 2006).

Cada projeto é único, sendo impossível e errôneo generalizar supondo um dos métodos como o melhor, pois isto depende das condições específicas de cada caso, devendo ser avaliadas para cada situação em particular.

No universo das TBMs existem vários conceitos para projetá-las, de forma que cada TBM é desenvolvida para as condições específicas do meio geológico de um projeto. Assim, o sucesso depende da escolha certa do tipo de TBM e da caracterização correta das condições e materiais que serão encontrados em campo, pois para condições não previstas é bem provável que a TBM apresente problemas e um baixo desempenho, sendo necessários ajustes significativos.