

túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro

carlos manuel da cruz moreira

professor coordenador
instituto superior de engenharia de coimbra

e-mail: cmoreira@isec.pt

RESUMO

Começa-se neste artigo por traçar uma breve sinopse histórica da arte de escavação de túneis, muito em particular dos superficiais. É quase como um aprazível rememorar do engenho e arte que nos precederam. Depois, sustentados numa revisão sumária da bibliografia da especialidade, são esboçados uns quantos apontamentos sobre a evolução da construção dos ditos túneis. Pode mesmo acontecer que, ao contemplar o caminho até agora percorrido, se possa perscrutar um pouco mais para além do horizonte daquele que por agora está sendo desbravado. De seguida, quase a talhe de retrato, passam-se em revista algumas das obras neste domínio mais emblemáticas. Não se tem aqui a presunção de esgotar semelhante desiderato. Os processos construtivos mais comuns neste tipo de obras são então enunciados. E, por fim, depois de se delinear o ponto da situação actual, tenta-se perspectivar o futuro desenvolvimento dos túneis superficiais.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis superficiais, história, processos construtivos, perspectivas futuras.

ABSTRACT

This paper begins with a brief historical synopsis of the art of the excavation of tunnels, particularly of the shallow ones. It's almost like a remembrance of the skill and the art that preceded us. Then, supported on a short bibliographical revision, some notes are outlined about the evolution of those tunnels. It may even happen that looking at the path we went through so far, we can see a little beyond the horizon of what is now being done. Afterwards, almost as pictures, some of the most emblematic works of this domain are reviewed. This presentation is not intended to be exhaustive. The most common constructive processes of this kind of structures are described. And, finally, after summarizing the present situation, we try to put the future development of the shallow tunnels in perspective.

KEYWORDS: Shallow tunnels, history, building procedures, future perspectives.

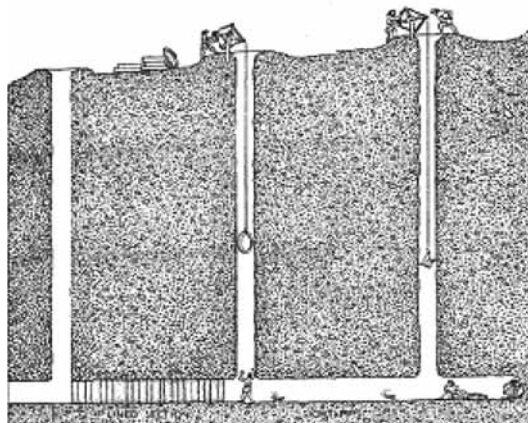
1. Sucesso histórico da abertura de túneis

Aceita-se hoje, de forma pacífica, que os vestígios das experiências geotécnicas provêm desde os confins da Pré-História. Os paleontólogos reconhecem, sem margem para dúvidas, que o *Homo Faber* detinha já conhecimentos acerca da dureza das diferentes rochas e sabia em que planos de fraqueza as deveria atacar para conseguir os utensílios de que necessitava. Não será pois difícil conjecturar, que uma boa parte dos primitivos instrumentos, que trespassaram incólumes os tempos desde então, pudessem servir para escavar o solo ou talvez mesmo quebrar ou esmagar rochas macias. Assim, teria o Homem inventado por um lado as primeiras ferramentas a partir do solo e, por outro, descoberto as primeiras técnicas de o escavar. Indícios de que já nesse tempo havia a percepção, ou talvez só a intuição, da estabilidade das cavidades subterrâneas a longo prazo, existem por exemplo nas cavernas francesas de *Font de Gaume* e *Lascaux*, ou na caverna chinesa de *Zhoukoudian*, habitada pelo *Homem de Pequim*, supõe-se por mais de 200 mil anos.

Motivações religiosas começaram por estar associadas às primeiras construções de terra, datadas do Neolítico ou possivelmente do Paleolítico Superior. Com o decorrer do tempo, elas foram-se gradualmente adaptando a outros propósitos mais utilitários, como por exemplo a exploração de minério ou a agricultura, esta tanto em termos de irrigação como de drenagem. No entanto, elas continuaram, em boa parte dos casos, a ser edificadas em louvor de um deus, persistindo assim em manter um significado religioso. Sem grande esforço de sistematização, podem-se portanto identificar sucessivas eras, desde as tumbas, passando pela mineração, até aos canais.

Os Persas exploraram as nascentes de água encontradas nas escombrelas existentes no sopé de uma cadeia montanhosa, escavando túneis com uma inclinação muito suave, designados *qanats* e representados na Figura 1. Manter a frescura da água e reduzir as perdas por evaporação eram os seus principais objectivos. São conhecidas referências aos *qanats* feitas por *Adaluirari* que datam já do século IX AC.

FIGURA 1. QANATS, SISTEMA DE IRRIGAÇÃO INVENTADO NA PÉRSIA NO PRIMEIRO MILÉNIO AC (WATERHISTORY.ORG)

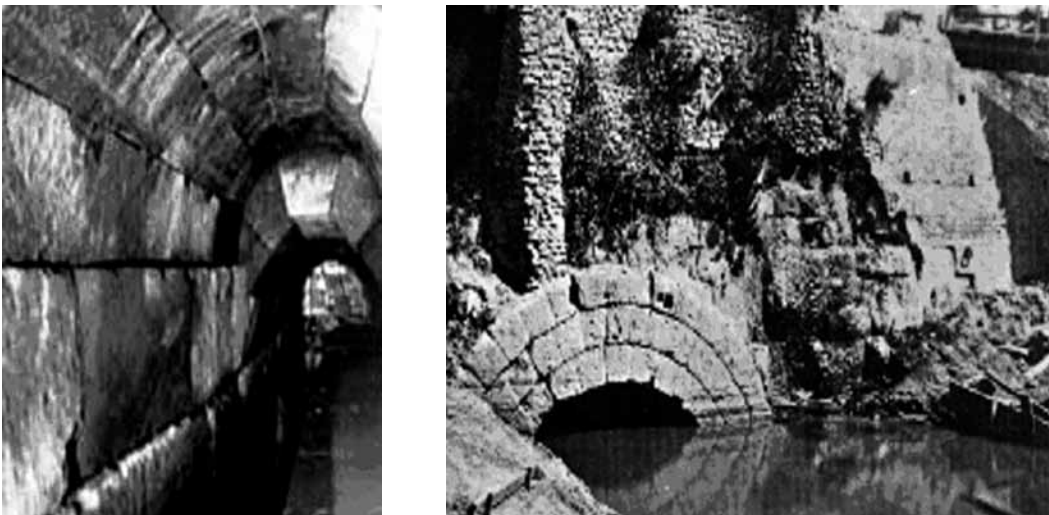


Também o engenho dos Gregos na construção de túneis está ilustrado em excelentes narrativas que nos foram legadas por *Herodoto*. Claro exemplo disso é o sistema de abastecimento de água à cidade de Samos, construído no século VI AC, que compreendia um túnel com cerca de 1000m de comprimento e que *Herodoto* descreve em pormenor. Conta-nos também como *Tales* de Mileto, de quem era grande admirador, construiu em 558 AC um túnel para desviar as águas do rio *Halys* afim de permitir a passagem do exército de *Croesus*.

Outra arte neste tipo de obras que também se encontra excelentemente documentada, mesmo em termos arqueológicos, é a dos Romanos. A *Cloaca Massima*, um monumental esgoto urbano da Roma Antiga, ilustrado na Figura 2 e construído por *Tarquinius Superbus*, é provavelmente o mais famoso túnel deste período. As suas dimensões eram de tal modo extraordinárias para a época (algumas secções chegam a apresentar aproximadamente 3,2m de largura por 4,2m de altura), que chegou mesmo a haver alguns rumores, aliás com certa jocosidade, dando conta que o imperador Augusto se teria passeado de barco por este tão grandioso esgoto.

Os vestígios que até nós chegaram atestam que os Romanos construíram a mais vasta rede de túneis da Antiguidade. É fácil verificar que a circulação de veículos e barcos não era o objectivo principal destes túneis, mas antes o transporte de água. E não se tratava apenas do abastecimento de água às cidades, mas também, já nessa época, da remoção dos efluentes para o seu exterior.

FIGURA 2. ASPECTO DO INTERIOR E DA BOCA DE SAÍDA DA CLOACA MASSIMA EM ROMA (www.romaspqr.it)



O grande estímulo na construção de túneis nos tempos mais recentes, ao invés da Antiguidade, ficou a dever-se sobretudo à proliferação de canais de navegação e presenciou-se em grande parte no século XVII, especialmente em França e no Reino Unido. Um segundo impulso bastante importante, aconteceu já no decorrer do século XIX e foi, desta vez, devido ao enorme desenvolvimento que os caminhos-de-ferro registaram, tanto na Europa como nos países da América do Norte.

Esta mudança verificada nos desígnios perseguidos pela construção dos túneis, implicou obviamente alterações na filosofia professada. Nesta altura, passou a ser a segurança, de parceria com os aspectos técnicos e económicos, a decretar os maiores desafios da engenharia de túneis. Assim, neste período, a instalação de suportes e os métodos de escavação, foram os alvos privilegiados dos rápidos desenvolvimentos verificados na construção de túneis.

Ultimamente, uma ideia mais moderna e actual tem instigado de forma assaz crescente a procura pelas estruturas subterrâneas em geral. A melhoria das condições de vida das populações e a minimização dos impactos ambientais, são dois factores que hoje em dia orientam a concepção de infra-estruturas subterrâneas, podendo-se mesmo dizer que se está actualmente lidando com a *Era Ambiental* dos túneis e que a doutrina principal é a da optimização dos procedimentos.

2. Evolução da construção

A escavação de túneis, nos primórdios da civilização e antes do advento dos explosivos e das máquinas escavadoras, era desenvolvida por operários que esculpam os maciços utilizando basicamente ferramentas manuais.

Sabe-se que há já mais de quatro milénios que existiam em Portugal, França e Bélgica, túneis para extracção de ouro, cobre e sal das montanhas, escavados através de ferramentas artesanais. Também já outrora, nos tempos que decorreram desde o Império Romano até à Idade Medieval, alguns exércitos atacavam furtivamente castelos inimigos através de túneis escavados usando utensílios manuais. Tal como nos dá conta *Pollionis Vitruvius*, na narração que faz do cerco de Marselha no *Caput XXII*, do *Liber X* da sua notável obra *De Architecture*, esses túneis eram muitas das vezes perfurados por baixo dos fossos defensivos das fortificações e tanto podiam visar somente a sua tomada de assalto, como ser também destinados a provocar o seu desmoronamento. Tais túneis eram em geral suportados por troncos de madeira, aos quais era depois ateadado fogo, nos casos em que se pretendia provocar a sua destruição.

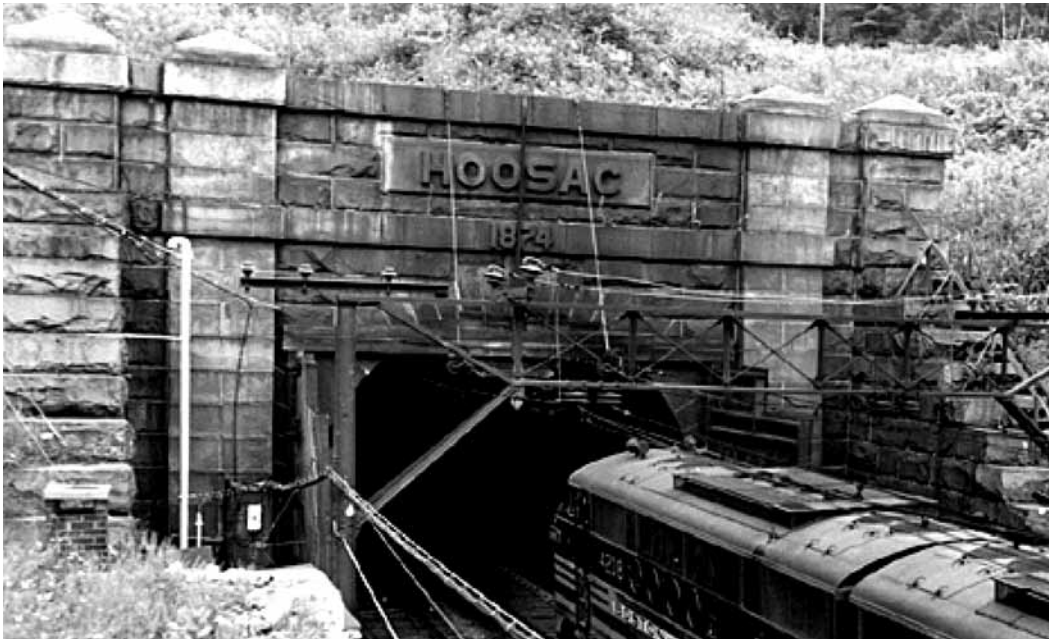
Uma outra técnica ancestral utilizada na execução de túneis, consistia em provocar variações repentinas de temperatura nas rochas, induzindo-as a quebrarem-se em pedaços. Provocava-se o aquecimento das paredes do túnel através de fogo e depois o seu arrefecimento brusco por meio de água. As primeiras notícias da utilização deste *modus operandi* datam de 2000 A.C. e referem-se aos processos de mineração de cobre e ouro desenvolvidos pelos egípcios.

A técnica de aquecimento por fogo foi também usada pelos Romanos para construir um dos mais antigos e enormes esgotos de Roma, a já referida *Cloaca Massima*.

Com a invenção dos explosivos, a escavação de túneis experimentou um significativo incremento, pois a sua execução passou a processar-se a uma velocidade nunca antes imaginável. Em 1679, utilizou-se pela primeira vez a pólvora na cons-

trução de um túnel com 157m de extensão, localizado no sul de França e incluído na ligação do Mediterrâneo ao oceano Atlântico conhecida como *Canal du Midi*. Em 1867, durante a construção do túnel de *Hoosac* no estado americano do *Massachusetts* (Figura 3), verificou-se a primeira escavação subterrânea através de nitroglicerina, precisamente no mesmo ano em que *Alfred Nobel* descobriu outro explosivo muito mais seguro, a dinamite.

FIGURA 3. TÚNEL DE HOOSAC, PORTAL OESTE EM AGOSTO DE 1946 (www.intact.com)

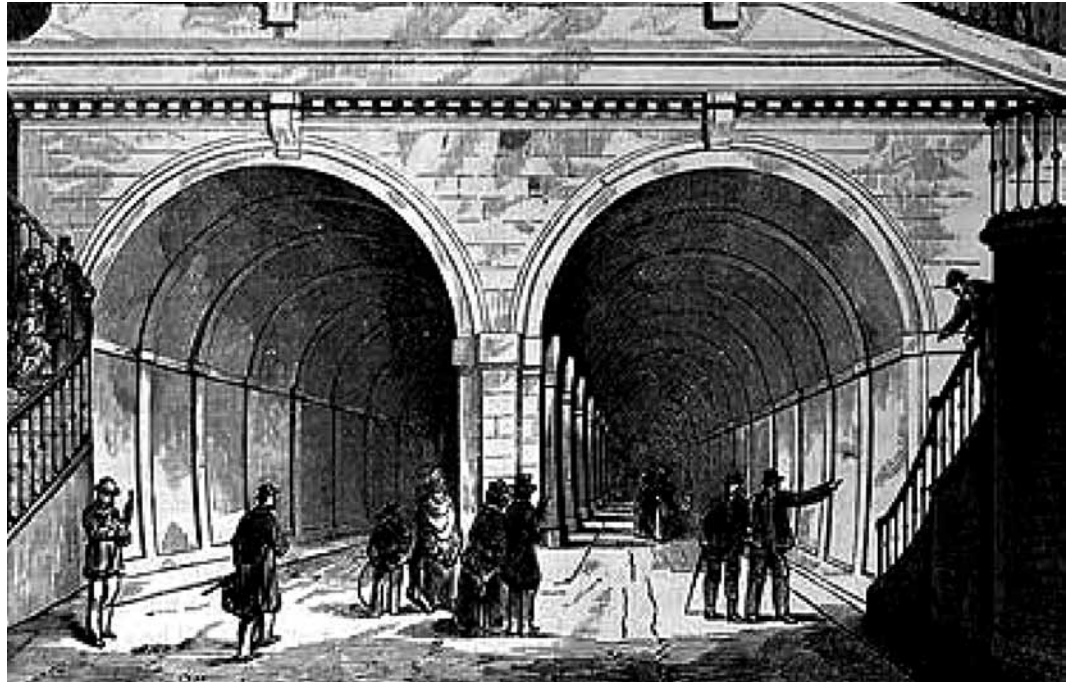


Também foi no túnel de *Hoosac* que se deu uma das primeiras utilizações de perfuração por meio de ar comprimido, decorria o ano de 1866. Uma outra ocorreu na Europa, no túnel do monte *Cenis*, entre França e Itália, onde, mercê de inovações feitas por *Germain Sommeiller*, foi realizada perfuração com recurso a ar comprimido. A utilização deste equipamento veio revolucionar a escavação dos túneis, na justa medida em que não só melhorou substancialmente as condições de trabalho e segurança dos operários no interior da obra, como também se mostrou cerca de três vezes mais eficiente que o recurso a explosivos. Para além disso, o ar que deste modo era introduzido na frente do túnel, trouxe benefícios importantes ao nível da ventilação e arejamento do local.

Os túneis superficiais, geralmente utilizados em metropolitanos ou em sistemas de adução de água ou evacuação de esgotos, passaram a ter que se desenvolver muitas das vezes em solos brandos e a sua escavação necessita por isso do recurso a uma estrutura de suporte na frente do túnel, designada escudo, e destinada a impedir o seu colapso.

O primeiro escudo perfurador foi concebido por um engenheiro chamado *Marc Brunel* e foi usado pela primeira vez em meados do século XIX, na cidade de Londres, durante a construção do primeiro túnel sub fluvial sob o Tamisa, ilustrado na Figura 4.

FIGURA 4. TÚNEL SOB O TAMISA CONSTRUÍDO POR MARC BRUNEL EM 1843 (www.pbs.org)

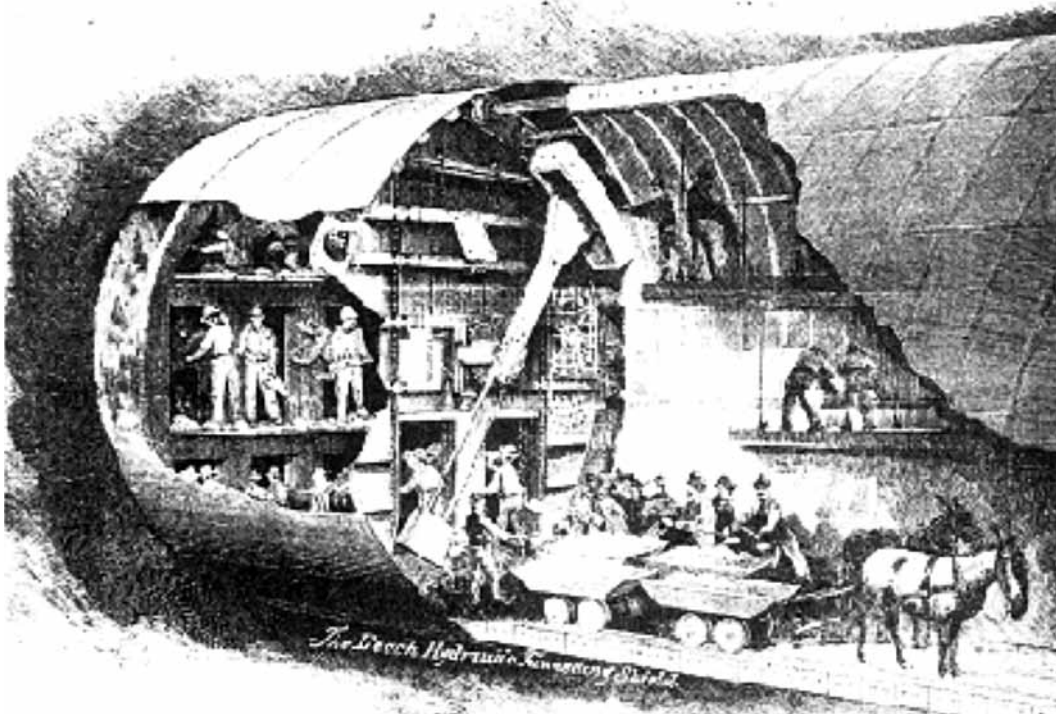


Conta-se que *Brunel* estava na prisão, cumprindo pena por insatisfação de dívidas, quando lhe veio a inspiração para o escudo perfurador. Ele observou um estranho verme furando a madeira, utilizando a armadura que lhe guarnecia a cabeça como escudo. À medida que avançava para o interior da madeira, a criatura segregava uma substância que constituía um suporte rígido atrás de si. *Brunel*, aproveitando tal descoberta, usou uma estrutura metálica gigantesca para manter as paredes de um túnel, enquanto os pedreiros construía o seu interior com alvenaria de tijolo.

A utilização de um escudo perfurador como suporte da parede do túnel e muitas vezes também da frente, constituiu um avanço tecnológico importantíssimo no horizonte da construção de túneis. A gravura ilustrada na Figura 5 apresenta o escudo perfurador usado na construção do túnel do rio *St. Clair*, entre os Estados Unidos da América e o Canadá, nos finais do século XIX.

Aproveitando a ideia de *Brunel*, têm vindo a ser desenvolvidas e aperfeiçoadas grandes máquinas escavadoras de túneis, que em muito têm contribuído tanto para a optimização dos procedimentos característicos da construção, como para garantir a segurança dos operários e a estabilidade da cavidade. 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 através de formações de xisto e calcário.

FIGURA 5. ESCUDO USADO NA CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DO RIO ST CLAIR (M. ROCHA, 1976)



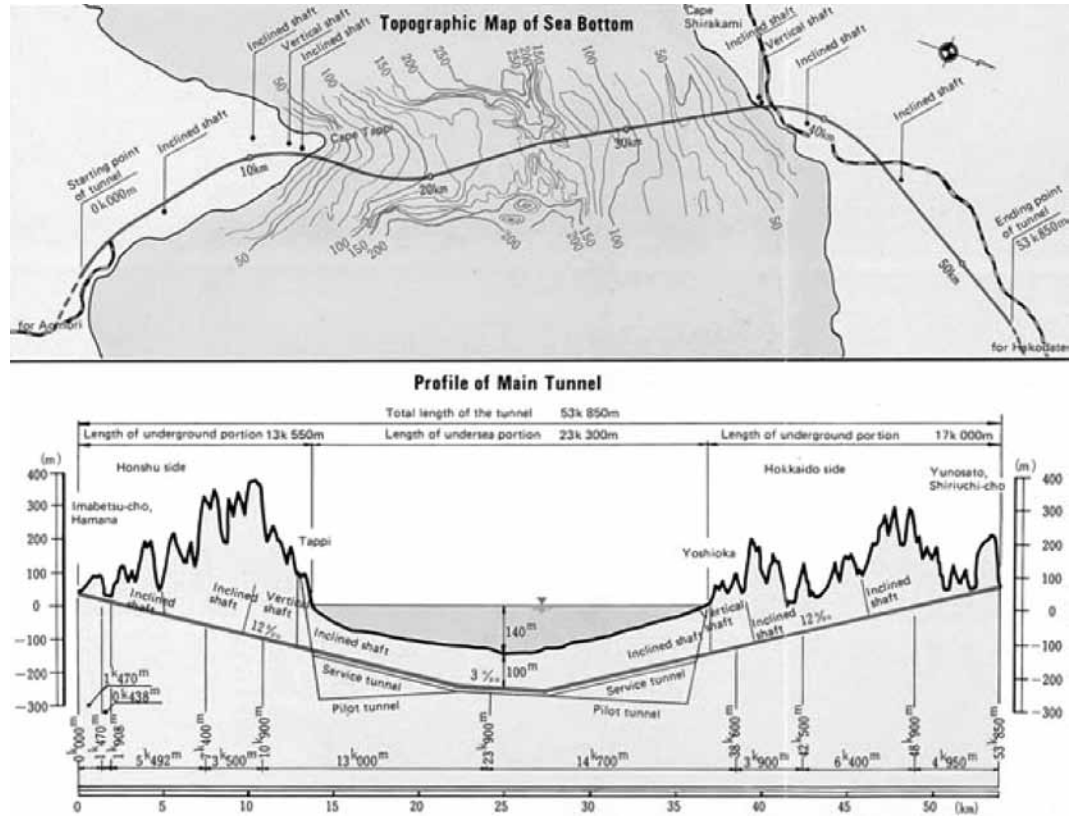
Outro aspecto em que se avançou bastante está relacionado com a construção de túneis em ambiente subaquático, a qual é particularmente melindrosa, uma vez que tem que ser evitada a infiltração da água durante o processo de escavação do túnel. Nas primeiras obras do género foram usadas câmaras pressurizadas para impedir a inundação da obra. Actualmente,   possível pr -fabricar troços de túnel, os quais são depois postos a flutuar e afundados no local onde serão ligados aos restantes troços já colocados.

3. Alguns arquétipos notáveis

Além dos túneis mencionados, não se pode deixar de fazer uma referência, embora simbólica, a alguns outros, que pela importância que tiveram na época da sua constru o ou simplesmente pela sua grandiosidade, constituem hoje verdadeiros marcos na história da constru o de túneis.

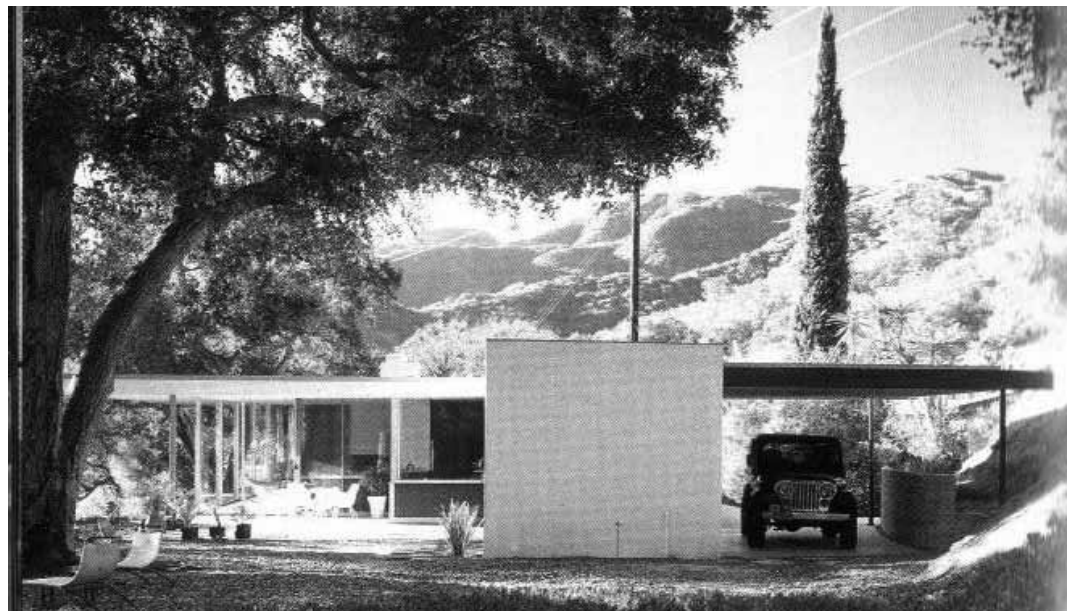
Um desses é o túnel de *Seikan* no Japão, representado na Figura 6. Em 1954, um tufão afundou cinco *ferry boats* no Estreito de *Tsugaru* e matou 1430 pessoas. Em resposta a esta calamidade, o governo Japonês procurou um meio mais seguro para atravessar tão perigoso estreito. Sob tão imprevisíveis condi oes climáticas, os engenheiros acharam que a constru o de uma ponte seria muito arriscada. Um túnel parecia pois ser a soluço perfeita. Dez anos mais tarde, começaram as obras daquela que viria a ser a mais longa e difícil escava o subaquática jamais tentada até então. Apesar do seu limitado uso, o túnel de *Seikan*, com quase 54 quil metros de extensão, continua a ser um dos maiores feitos da engenharia do século XX.

FIGURA 6. PROJECTO DO TÚNEL DE SEIKAN NO JAPÃO (www.ijinet.or.jp)



Já em 1802, *Albert Mathieu-Favier*, um perito em minas francês, havia sugerido a construção de um túnel sob o canal entre a França e a Inglaterra, numa época em que nem sequer tinham ainda sido inventadas as ferrovias. Construir tal túnel foi o sonho acalentado por muitos engenheiros durante quase dois séculos. A Figura 7 documenta uma dessas tentativas.

FIGURA 7. ESQUEMA PROPOSTO POR W. TOLLIDAY PARA O TÚNEL SOB O CANAL DA MANCHA EM 1875 (www.pro.gov.uk)



Em 1875 foi formada uma companhia francesa para financiar o túnel e em 1879 foi aberta uma galeria de acesso do lado francês. Em 1881, formou-se outra companhia em Inglaterra para o mesmo efeito e também foi escavada uma galeria desse lado.

Em Outubro de 1972, os governos inglês e francês e as respectivas companhias ferroviárias, assinaram um acordo formal para a construção do túnel de acordo com uma série de etapas. Porém, só em 1986 é que a concessão viria a ser entregue ao consórcio *Eurotunnel* e o tratado completo para a construção viria a ser assinado entre os dois países.

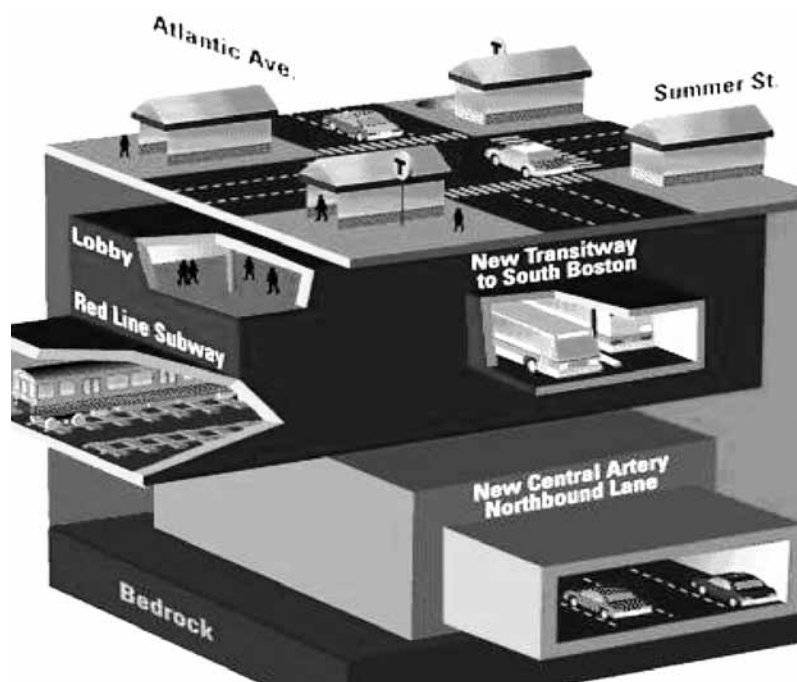
Foi então quando a França e a Inglaterra finalmente decidiram ligar os seus dois países por meio de um túnel com 50 quilómetros de comprimento sob o Canal da Mancha, que os engenheiros enfrentaram um enorme desafio. Não teriam apenas que construir um dos mais compridos túneis do mundo e com a maior extensão subaquática, como também teriam que convencer o público de que os passageiros podiam fazer a travessia em segurança num túnel desse tamanho. Nessa época, os incêndios em túneis eram frequentes, como por exemplo no túnel de *Holland* em Nova Iorque nos Estados Unidos da América. A solução do problema foi encontrada projectando uma via de fuga para situações de emergência.

O *Channel Tunnel*, também chamado *Chunnel*, consiste pois em três túneis. Os dois principais servem para o tráfego ferroviário, enquanto o terceiro, um túnel mais pequeno entre os dois anteriores, visa, como se disse, estabelecer uma escapatória para eventuais emergências. Existem além disso inúmeras passagens que permitem mudanças entre as vias.

Demorou três anos para que as máquinas escavadoras de túneis, partindo de ambos os países e escavando através do terreno, se encontrassem num local algumas dezenas de metros abaixo da superfície do canal, para abrir uma passagem que permite actualmente realizar a viagem entre os dois extremos em cerca de 20 minutos apenas. O túnel foi formalmente aberto em Maio de 1994. Esta obra, não só pelo impacto mediático que originou, mas também por todas as condições que rodearam o seu nascimento, constitui uma das mais carismáticas realizações, que importa sempre lembrar na história da construção dos túneis.

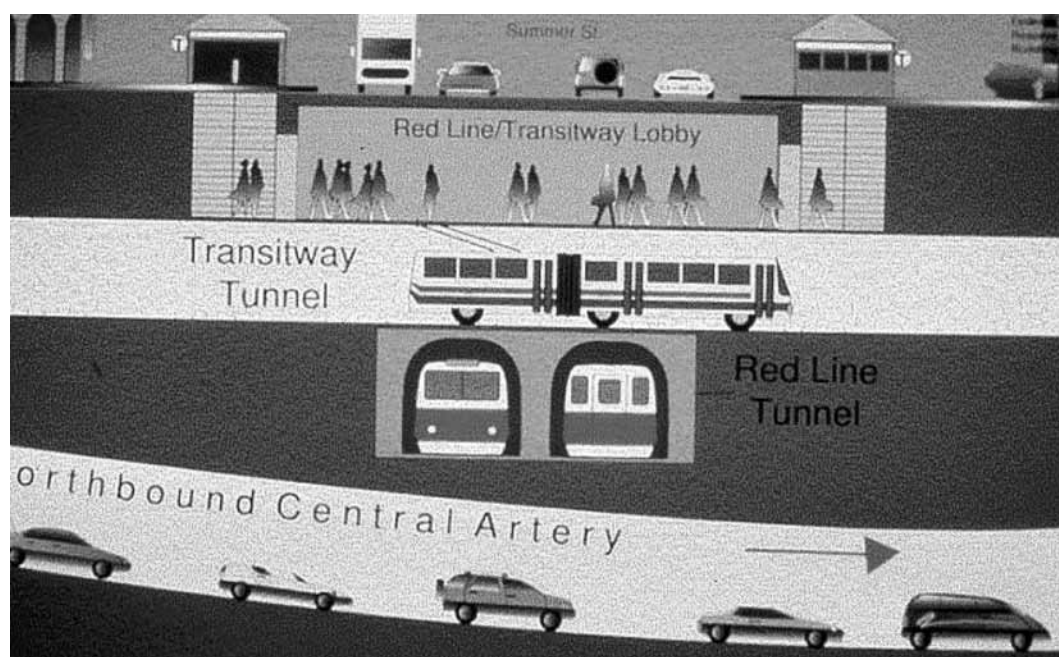
Finalmente, por todo o gigantismo que aos mais variados níveis rodeia o projecto da Artéria Central de *Boston*, não se pode prosseguir sem pelo menos uma singela referência a esta obra. Para muita gente, este túnel representa o “projecto viário mais complexo e com maior repto tecnológico da história da América”. Ter-se-ão construído ou alterado perto de 260 quilómetros de vias, mais de metade subterrâneas, formando um corredor de acesso à cidade. Em meados de 2005, quando a obra estiver pronta, terão sido escavados cerca de 13 milhões de metros cúbicos de solos, sob uma importante auto-estrada e várias dúzias de arranha-céus de vidro e aço da muito azafamada zona financeira da cidade de Boston (Figuras 8 e 9). Não será pois nada descabido o epíteto de *bigdig* que muitos lhe atribuem.

FIGURA 8. PERSPECTIVA DOS TÚNEIS SOB A ARTÉRIA CENTRAL DE BOSTON, BIGDIG (www.bigdig.com)



Como se a escavação do túnel sob a cidade não fosse só por si tarefa já assaz difícil, tinha ainda *Boston* que estar fundada sobre aterros constituídos por solos soltos e encharcados. Este aspecto obrigou a recorrer a injeções de caldas de cimento e resinas e ao congelamento dos solos, para que estes pudessem ser escavados sem que se verificasse o seu colapso. Após a construção de tão arrojado projecto, as vias demolidas à superfície irão mostrar a revitalização e requalificação do centro da cidade, facto que é paradigmático do pensamento dominante nos dias de hoje.

FIGURA 9. ESQUEMA DO PERFIL DO PROJECTO DA ARTÉRIA CENTRAL DE BOSTON, BIGDIG (www.bigdig.com)



4. Processos construtivos de túneis superficiais

4.1. Generalidades

Hoje em dia, à semelhança do que acontece com outros tipos de estruturas, também a escolha do traçado e dos locais de implantação dos túneis, depende em muito maior escala da satisfação das necessidades funcionais das populações, do que propriamente das características intrínsecas dos materiais e das zonas envolvidas. Quer isto dizer que, condições geológico-geotécnicas adversas, geometrias arrojadas tanto em comprimento como em secção transversal, frágeis espessuras de recobrimento, territórios urbanos densamente ocupados ou com estruturas bastante sensíveis à superfície, entre tantas outras quaisquer circunstâncias, não são passíveis de constituir só por si um impedimento à abertura de um túnel.

Associado a esta cada vez mais ilimitada variedade de ambientes permissíveis para a abertura dos túneis, está o grande desenvolvimento registado ao nível dos equipamentos específicos da construção e, claro está por acréscimo, o recurso a processos construtivos com capacidades mecânicas e tecnológicas de intensidade crescente. Os procedimentos mais mecanizados conduzem geralmente a níveis de produtividade maiores e provocam conseqüentemente um abaixamento nos custos de operação. Além disso, proporcionam também quase sempre maiores níveis de segurança na construção dos túneis.

No caso particular dos túneis superficiais, uma vez que a sua execução se processa em regra sobre maciços de terra ou de rochas pouco resistentes, não são os processos de escavação ou de desmonte que representam a actividade mais sensível e aquela que exige maior atenção. Porém, a conseqüente produção da cavidade subterrânea originada pela escavação, pode, neste tipo de materiais, conduzir a problemas muito complexos. Em geral, os mais delicados são aqueles que decorrem de instabilidades que despontam no período em que a cavidade é mantida sem suporte. Por isso, a definição do espaço de tempo limite em que se torna imperativa a instalação do suporte, para que não haja risco de colapso da estrutura, constitui uma das preocupações a acautelar, em simultâneo com a escolha mais adequada do tipo de suporte e dos meios necessários para a sua colocação e, obviamente, com a fixação das suas dimensões.

Os vários processos construtivos actualmente disponíveis para utilização na construção de túneis, em particular para maciços terrosos, podem pois ser apreciados em função da maneira como em cada um deles se preconiza a instalação do suporte. A primeira grande distinção que se pode fazer consiste em separar aqueles em que a escavação é seguida pela colocação do suporte, após um determinado intervalo de tempo e aqueles outros em que a escavação é realizada por meio de escudos, que garantem desde logo o suporte do maciço escavado, ou ainda uma terceira via, esta mais recentemente desenvolvida, que consiste em efectuar a escavação somente depois de executado um pré-suporte primário ou até mesmo o próprio suporte final.

A selecção do método mais apropriado a cada caso concreto passa pelo julgamento ponderado dos muitos condicionalismos que intervêm no processo. Em primeiro lugar devem ser analisadas as características geológicas e geotécnicas das

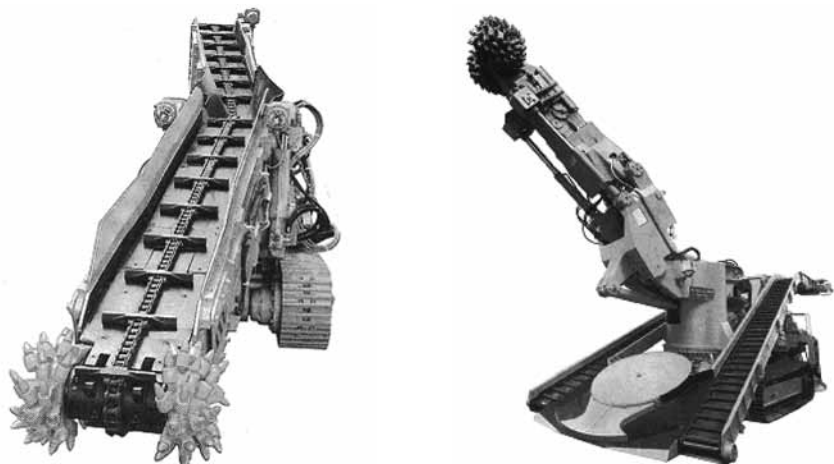
formações que vão ser afectadas pelo túnel. O tipo de solos, a heterogeneidade, a compacidade e a permeabilidade que as caracterizam, contam-se entre os principais parâmetros a considerar. Depois, terá naturalmente que se ter em conta a forma e dimensões da secção do túnel, o seu desenvolvimento, a espessura do recobrimento. Enfim, todos os factores geométricos que definem o sistema. Em particular, a forma da secção transversal pode ser muito restritiva no tocante ao leque de processos disponíveis. Embora existam hoje máquinas de escavação em secção total com secções variadas, os melhores meios para se conseguir abrir secções de formas complexas, continuam a ser as técnicas de escavação por ataque pontual. A extensão total do túnel pode afectar especialmente o ritmo de progressão da escavação, na medida em que ela está dependente da capacidade de remoção dos escombros e de transporte dos materiais de construção. Porém, esta condição raramente é determinante na escolha do processo construtivo a adoptar.

Ademais dos factores enunciados, outros há que podem relevar de certa influência na escolha em apreciação. São exemplos o tipo de equipamento disponível, a experiência dos construtores ou a qualificação da mão-de-obra. No que respeita aos aspectos construtivos, sobressai a confrontação entre as técnicas de escavação sequencial e os processos de escavação de secções totais através de meios altamente mecanizados, usando os designados escudos ou tuneladoras (A. Assis, 2001).

4.2. Escavação com suporte retardado

Os processos construtivos que, face aos procedimentos preconizados para a construção dos túneis, se podem enquadrar na categoria geral de escavação com suporte retardado, consistem numa definição sequencial da progressão da construção, através do estabelecimento de várias etapas tanto para a escavação como para a colocação do suporte, verificando-se esta última a uma certa distância da frente da referida escavação, a qual pode, por exemplo, ser executada mediante o recurso a máquinas de ataque pontual como aquelas que se indicam na Figura 10.

FIGURA 10. EXEMPLOS DE MÁQUINAS DE ESCAVAÇÃO DE ATAQUE PONTUAL (ALVAREZ, 1988)



A maior parte dos métodos cujo modo de operação corresponde em traços genéricos ao atrás descrito, adopta a filosofia preconizada pelo Novo Método Austríaco de Construção de Túneis, ou *NATM* (*New Austrian Tunnelling Method*). O procedimento rege-se por vários princípios, de entre os quais se destacam dois. O primeiro consiste em assumir que a principal componente da estrutura de suporte de um túnel advém da competência resistente inerente ao próprio maciço. Deve-se portanto permitir a deformação do maciço após a escavação, a fim de se conseguir mobilizar a sua máxima resistência possível. Tal processo de maximização terá que passar pela conservação das características resistentes inicialmente exibidas pelo maciço envolvente. Para isso, é necessário executar a escavação de modo a incomodá-lo o mínimo possível. Deve-se ainda aplicar logo após a escavação da frente e tão cedo quanto possível, um suporte primário.

O suporte primário deve ser ligeiro e suficientemente flexível, de forma que, aproveitando o efeito de arco criado no maciço, possa ser rentabilizada a mobilização da sua resistência. O objectivo principal deste suporte inicial será garantir a estabilidade da abertura e a segurança das pessoas e bens abrangidos pelos trabalhos de escavação. O suporte definitivo só será construído depois de aberto o túnel. A missão essencial deste suporte final será garantir a operacionalidade da obra, assegurando a sua estabilidade ao longo do tempo, tendo em conta as probabilidades de ocorrência de qualquer modificação das condições prevaletentes no sistema maciço-suporte.

Evidentemente que um esquema construtivo organizado nos moldes da matriz indicada, terá que estar associado a um programa fiável de controlo permanente do comportamento tanto do maciço escavado, como da estrutura que o sustenta. Ora, é justamente neste conceito que assenta o segundo princípio: a necessidade de observação contínua da obra, através da instrumentação apropriada e da interpretação dos resultados conseguidos. O plano observacional deverá ser gizado de modo a permitir o cumprimento do pressuposto em que o método se apoia, isto é, o ajustamento em cada etapa da metodologia seguida na escavação, da velocidade da sua progressão, bem como da compleição do suporte e do instante correcto para a sua instalação.

Este método tem vindo a ser amplamente usado, tanto em solos como em rochas brandas, com bons resultados, sobretudo quando há escavações de cavidades com secções transversais de dimensões apreciáveis. É o que se verifica por exemplo em túneis de autoestradas, em que a existência de várias vias em cada sentido tem vindo a determinar grandes secções, à semelhança do que acontece também em estações de metropolitano, zonas de cruzamento de linhas e de manobras das máquinas, túneis de via dupla, etc. Nestes casos a construção com escudos, em que a escavação da secção da frente se processa de uma vez só, é muitas vezes impraticável, não só pelas dimensões da abertura, mas também pelas mudanças radicais na direcção longitudinal do eixo do túnel e pela existência de interligações, muitas vezes associadas à geometria das obras.

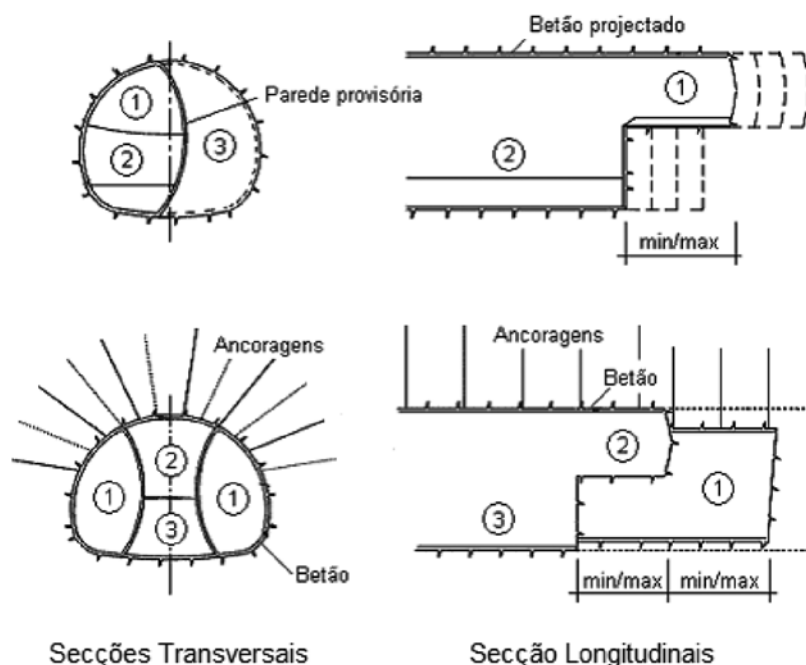
A escavação de secções através de soluções tipo *NATM*, é normalmente conseguida com técnicas de ataque pontual. Elas permitem o faseamento da escavação

paradigmático do procedimento e do qual advêm a grande flexibilidade do método e a sua ajustabilidade a uma enorme variedade de geometrias possíveis. Esta é a principal razão dos custos destas escavações serem inferiores aos correspondentes à utilização de escudos, com o benefício adicional de possibilitarem ainda a reutilização de uma boa parte do mesmo equipamento noutras obras de escavação.

O faseamento da escavação deve prever a sua execução sequencial, de modo a manter sempre sob controlo as deformações do maciço. A sequência pode definir-se tanto em termos da secção transversal, pela execução alternada de diferentes áreas, como do eixo do túnel, por escavação de pequenos trechos longitudinais. Uma vez que as deformações do maciço escavado, como aliás a própria estabilidade da escavação, dependem da dimensão da zona a escavar, da resistência e da deformabilidade do terreno e da eventual presença de água, estes são normalmente os principais condicionalismos a considerar na definição do número de fases e da sequência mais apropriada. Em geral, o número de fases aumenta directamente com o tamanho da secção e inversamente com a resistência do maciço. Porém, ele deve ser devidamente ponderado, pois sabe-se que uma excessiva divisão da secção transversal provoca maior lentidão na progressão da escavação e requer um maior atraso na colocação do suporte, aumentando além disso o número de juntas e as necessidades de suporte provisório. Por outro lado, a exagerada simplificação do processo pode conduzir a deformações incompatíveis com os níveis admissíveis para o maciço. Há então que procurar o conveniente equilíbrio entre os diferentes factores em concorrência.

A Figura 11 mostra dois exemplos de sequências de escavação definidas de acordo com o NATM. Como se pode verificar, estão organizadas segundo um certo número de diferentes fases e podem incluir a execução de paredes provisórias ou de ancoragens, entre outros elementos.

FIGURA 11. SEQUÊNCIAS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS ATRAVÉS DO NATM (MOREIRA, 2003)



O método de escavação com suporte retardado e os materiais em causa, tornam imprescindível a aplicação de um suporte primário logo após a escavação, que permita o avanço da construção, até que um suporte final possa ser fornecido. Também já se disse que tal suporte deverá ser razoavelmente flexível e rapidamente instalado, o mais junto da frente de escavação possível, de modo que seja evitável a deterioração das propriedades resistentes do maciço afectado.

O suporte primário pode ser realizado apenas por meio de betão projectado, ou, se as condições o justificarem, por exemplo se for necessário aumentar a rigidez estrutural, ou impedir a derrocada de blocos instáveis enquanto o betão não adquire resistência suficiente, pode ser complementado com perfis, redes ou malhas metálicas, pregagens ou outros elementos resistentes.

Quanto ao suporte final, emprega-se na maioria das situações betão moldado *in situ*. Muito recentemente tem também vindo a ser usada uma segunda aplicação de betão projectado para formar uma camada final de acabamento do túnel. Deve também ser executado um sistema de impermeabilização para garantir que não se verifiquem infiltrações de água. Tais infiltrações podem ter efeitos prejudiciais ao nível da utilização específica do túnel e da degradação do próprio suporte de betão, uma vez que podem potenciar ou acelerar reacções químicas adversas.

Tanto o suporte primário como o final são dimensionados para troços típicos do túnel, consoante as suas características geológico-geotécnicas e podem ser reforçados sempre que se observe um sustimento defeituoso do maciço. Devem no entanto evitar-se sempre que possível as mudanças bruscas das dimensões do suporte, pois elas originam concentrações de tensões, que têm reflexos negativos no betão projectado, a não ser que se trate de reforços de contingência, em situações que denotem perigosidade e por isso requeiram uma actuação urgente.

A máxima rentabilidade da escavação de um túnel, como se deixou transparecer daquilo que atrás se expressou, seria obtida se a abertura da secção se processasse toda de uma vez só, ou seja, se a escavação fosse em secção total. Contudo, para a maioria das situações envolvendo solos ou rochas brandas, isto não será viável, na medida em que se torna especialmente sensível acautelar a estabilidade da cavidade escavada. Mesmo quando a secção é fraccionada, existem situações, envolvendo sobretudo materiais com frágeis capacidades mecânicas, em que o controlo do processo de escavação seria deveras complexo. Assim, é usual em situações tão delicadas, proceder a uma prévia estabilização do maciço ou somente da zona da frente consoante as circunstâncias, antes de avançar com a escavação do túnel.

Quando a escavação se desenvolve na vizinhança de materiais que evidenciam grande debilidade das características resistentes, justifica-se quase sempre, não só em termos estritamente técnicos como também económicos, o recurso a técnicas de melhoramento do maciço. Das diversas possibilidades modernamente disponíveis para se atingir tal propósito, salientam-se algumas aplicações particulares, pela divulgação generalizada do seu uso, que são descritas a seguir.

Em primeiro lugar, referem-se as injecções de caldas de cimento a baixa pressão, que constituem um dos métodos de tratamento de areias ou de siltes pouco finos. A sua acção nas imediações da frente do maciço a tratar envolve dois aspec-

tos principais. Por um lado, produz uma melhoria nas características de resistência e de deformabilidade do material, com benefícios evidentes ao nível das deformações do maciço, por outro, reduz a permeabilidade do solo, conduzindo a um maior período de auto-sustentação e diminuindo as probabilidades de colapso.

Outra técnica para melhorar as características dos terrenos, cujo princípio é idêntico ao anterior e que é bastante vulgar nos túneis, é o chamado *jetgrouting*. Trata-se essencialmente de injeções controladas de caldas de cimento a alta pressão e velocidade. Estas injeções tornam o maciço mais resistente por reorganização da estrutura do solo e da sua mistura com as caldas e originam um material designado por solo-cimento. A aplicação do *jetgrouting* pode ser realizada tanto a partir do interior do túnel como da superfície e pode ser usada como expediente de tratamento global do maciço envolvente, ou com o intuito específico de estabilizar a frente da escavação.

As pregagens, constituem também um meio de estabilização da frente de escavação muito usado. Elas são em geral colocadas no maciço a partir do interior da escavação e são constituídas por tirantes de aço ou de fibra de vidro. As pregagens visam resistir às tracções desenvolvidas por efeito da escavação na vizinhança da cavidade, embora também possam desempenhar funções individualizadas, como o suporte de blocos em risco de colapso.

Um outro método que tem sido usado na construção de túneis para melhorar as características do solo e por vezes também como suporte prévio, consiste na realização das designadas enfilagens. A sua execução consiste na colocação de um elemento resistente, normalmente metálico, num furo quase horizontal realizado no contorno da abóbada do túnel, que depois será selado através da introdução de caldas de cimento ou de resinas. Em geral, executa-se um determinado número de furos de maneira a formar uma casca em redor da abóbada e os elementos metálicos são apoiados nas cambotas metálicas que constituem o suporte do túnel. Estas enfilagens podem ser designadas por *forepoling* ou por guardachuva, consoante o seu menor ou maior comprimento.

4.3. Escavação com suporte prévio

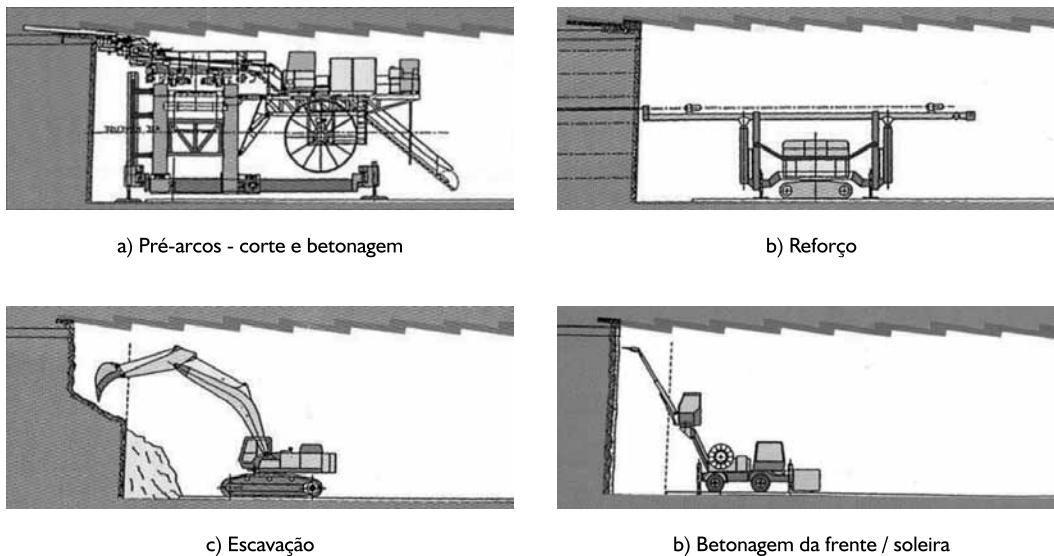
Os métodos sequenciais que foram atrás referidos podem muitas vezes ser precedidos pela instalação prévia de um sistema de suporte provisório ou até mesmo definitivo. Isto acontece sobretudo em maciços de baixa qualidade, de tal modo que se torna necessário executar a escavação sob a protecção de uma estrutura que sustenha o maciço.

A técnica de *jet-grouting*, usada para tratamento dos solos, pode permitir em si mesma a constituição de um pré-revestimento, uma vez que a abóbada contínua e homogénea de solo tratado, que se produz sobre a zona a escavar, pode funcionar como uma casca portante que possibilita a abertura do túnel em condições aceitáveis.

O suporte preliminar do maciço, para depois se poder executar a escavação em boas condições, também pode ser delineado através de um processo denominado pré-corte mecânico. Esta técnica consiste em efectuar mecanicamente um corte ligeiramente cónico na linha correspondente ao extradorso da escavação adiante da frente do túnel. A cavidade de reduzida espessura formada pelo corte, deve ser seguidamente obturada com betão projectado de elevada resistência e presa rápida, para formar uma carapaça contínua, que permita suportar o maciço durante a escavação.

A Figura 12 representa uma sequência típica da escavação de um túnel por aplicação desta metodologia. Ela baseia-se na técnica do pré-corte mecânico com suporte através de pré-arcos e na situação representada contempla quatro fases. A primeira é a execução de um arco em betão em todo o contorno da secção a escavar, excepto na soleira. O arco é construído por painéis materializados pelo corte do terreno por meio de uma serra, seguido de imediato pela projecção de betão para a cavidade aberta. A segunda fase é a execução de pregagens para reforço da frente, de modo a possibilitar o avanço para a fase seguinte da escavação. Noutra fase procede-se à projecção de betão na frente. Por fim, após a execução de alguns arcos, é efectuada a betonagem da soleira, de modo a dar maior capacidade resistente ao suporte provisório obtido.

FIGURA 12. SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA DE UM TÚNEL POR APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PRÉ-CORTE MECÂNICO (BEC FRÈRES SA.)



Recentemente, tem sido empregue outro método de pré-revestimento, semelhante ao do exemplo anterior, mas aplicado a uma escala maior. Aliás, este método tem sido usado em cavidades de grandes dimensões, com resultados bastante satisfatórios. Trata-se dos “arcos celulares”, que são essencialmente o suporte definitivo do túnel executado antes da sua escavação, realizado por execução de pequenas galerias, que vão sendo sucessivamente abertas e preenchidas com betão e que formam em redor do núcleo central uma estrutura de protecção. Esta constru-

ção, para além de permitir a escavação em segurança, ainda constitui ela própria o suporte final do túnel.

4.4. Escavação mecanizada por escudos

Uma razoável quantidade de túneis em meio urbano é hoje construída por intermédio de escudos. Os escudos são máquinas, geralmente metálicas, de secção idêntica àquela que vai ser escavada. Constituem em si mesmos suportes temporários dos túneis e permitem a execução das operações de escavação e instalação do suporte definitivo em boas condições de segurança. A abertura é efectuada de uma só vez, isto é, a escavação ocorre em secção total. O escudo desloca-se ao longo do túnel executando continuamente a sua construção. As máquinas, de grandes dimensões, tal como a da Figura 13, são conhecidas por tuneladoras ou TBMs (*Tunnel Boring Machines*).

FIGURA 13. TUNELADORA OU TBM (*TUNNEL BORING MACHINE*) (www.msdc.com)



Os escudos podem operar em conformidade com duas modalidades distintas, associadas à forma prática como a estabilidade da frente de escavação é controlada. Uma primeira, utilizada quando não há necessidade de suportar a frente por ser estável e a afluência de água não é significativa, caracteriza os designados escudos abertos (Figura 14). Em contraste, uma outra em que se recorre aos escudos ditos fechados, cegos ou confinados, (Figura 15) é usada para as situações de frente instável, que obrigam à introdução de pressões que a estabilizem, ou quando se verificam elevados fluxos hidráulicos. O necessário confinamento pode ser obtido por meios mecânicos, através de ar comprimido ou outros fluidos, ou ainda por contra-pressão de terras, dando cada um destes meios origem a outros tantos tipos de processos ou de tuneladoras.

FIGURA 14. CORTE LONGITUDINAL ESQUEMÁTICO DE UM ESCUDO ABERTO (www.nkt-torn.org)

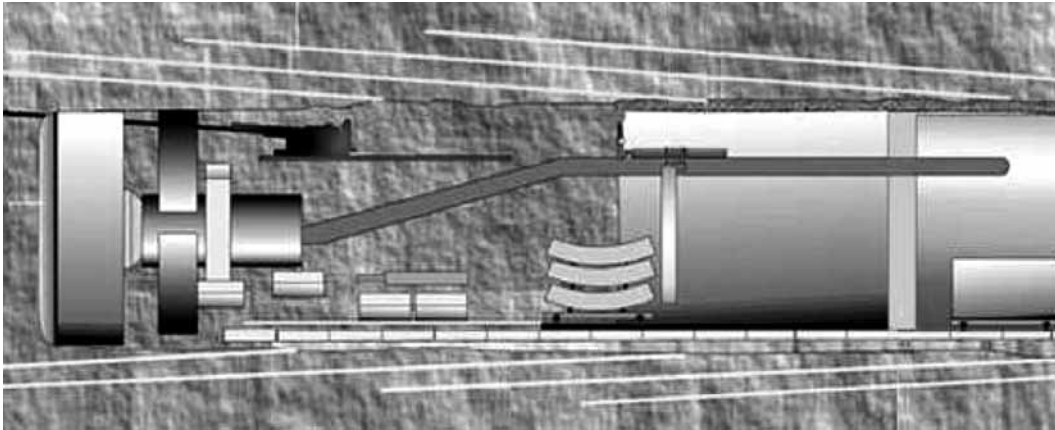
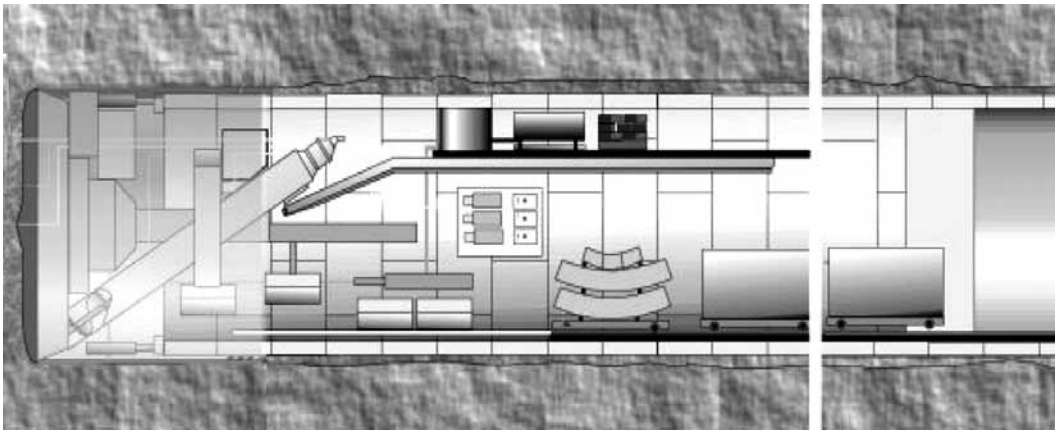


FIGURA 15. CORTE LONGITUDINAL ESQUEMÁTICO DE UM ESCUDO FECHADO (www.nkt-torn.org)



Os escudos abertos são formados basicamente por um tubo oco de grandes dimensões, em geral cilíndrico, que se faz penetrar no maciço. Utilizam-se em materiais que não se tornem instáveis a curto prazo e que não levantem problemas hidráulicos. A escavação processa-se recorrendo aos tradicionais sistemas de ataque pontual. É possível o uso destes escudos convencionais de frente aberta em simultâneo com a aplicação de ar comprimido, propiciando uma pressão estabilizadora na frente de escavação para compensar a pressão instabilizadora aí provocada pela água.

Em maciços de solos muito brandos, podem ser utilizados escudos tapados à frente por uma placa metálica contendo janelas que podem ser abertas para aceder ao maciço, permitindo a escavação do solo para a cavidade, donde é depois retirado. São os chamados escudos com confinamento mecânico. O seu emprego é contudo bastante limitado.

A estabilização da frente, como já se disse, pode ser conseguida através de líquidos, por exemplo lamas bentoníticas, introduzidos numa câmara frontal existente para tal efeito. Neste caso também é comum designar-se este tipo de máquinas por *slurry shields*. A utilização de bentoníticos, além de permitir a estabilização da frente, também proporciona um meio muito interessante de retirada dos materiais

escavados, através do estabelecimento de um circuito em que as lamas, depois de introduzidas na câmara e misturadas com o produto da escavação, são bombadas para o exterior, onde se procede à sua separação por meio de decantação, sendo de novo inseridas no sistema.

Outro meio de obter uma pressão sobre a frente da escavação, de modo a impedir o seu colapso, é através da mobilização de uma reacção provocada pelos impulsos gerados no próprio solo escavado. As tuneladoras que permitem este tipo de actuação encaixam-se no tipo de escudos com confinamento por contrapressão de terras, técnica que aparece muitas vezes denominada por *EPB* (*Earth Pressure Balance*). À semelhança do caso anterior, são máquinas que também executam a escavação em secção total, mas em que o confinamento é agora garantido pela colocação sob pressão, na câmara que existe logo atrás da cabeça de corte do escudo, do material resultante da escavação, e cujo controlo é efectuado a partir da abertura de uma válvula de evacuação e da velocidade de rotação de um dispositivo do tipo sem-fim, que promove a remoção do solo escavado do interior da câmara.

Os dois tipos de escudos com confinamento que têm vindo a revelar predominância nas obras realizadas com esta metodologia nos últimos tempos, são os *slurry shields* e as tuneladoras por contrapressão de terras, *EPB*. As diferenças mais significativas entre os dois procedimentos situam-se, como já foi descrito, ao nível do modo como a pressão é aplicada à frente, facto que pode ser determinante para definir a aplicabilidade de cada um deles para qualquer caso concreto. Assim, no caso das tuneladoras tipo *EPB*, como a face do túnel é pressionada mecanicamente pelo solo escavado e retrabalhado na câmara frontal, só se pode operar em termos de tensões totais, ou efectivas através do contacto partícula a partícula, não sendo possível o controlo da pressão intersticial no interior da câmara frontal. Ao invés, as máquinas do género *slurry shield*, permitem controlar a pressão total ou a pressão intersticial na câmara frontal, mas não a tensão efectiva. Estes escudos aplicam as tensões de forma hidráulica, através da lama bentonítica mantida sob pressão, a qual, penetrando uma determinada distância no solo da frente, irá criar uma membrana sobre a qual a pressão é mantida (Assis, 2001). Deste modo, enquanto que as máquinas tuneladoras com confinamento por contrapressão de terras permitem suportar e controlar a face escavada de um túnel em solo seco ou saturado mas sem água livre, os *slurry shields* podem operar de forma fiável em praticamente todos os tipos de solos, finos ou granulares, com ou sem água livre, uma vez que esta água pode ser efectivamente controlada através da pressão na membrana de lama bentonítica.

Os suportes aplicados nos túneis em que a escavação é feita com escudos, são invariavelmente iguais, verificando-se que as principais diferenças se apresentam mais ao nível da forma como são colocados em obra, do que em relação ao suporte em si. Este é quase sempre constituído por anéis fechados, em geral de betão armado, construídos com aduelas pré-fabricadas que se vão encaixando umas nas outras até se forrar todo o perímetro da secção do túnel.

Estes suportes são de carácter definitivo, pois o amparo provisório é neste caso fornecido pela própria máquina, e como tal devem ser dimensionados para as soli-

citações ocorrentes ao longo de toda a vida do túnel. Além disso, não devem ser esquecidos os esforços a que as aduelas vão ser sujeitas no decurso das manobras de transporte e colocação e ainda os que decorrem do apoio que elas terão que fornecer aos macacos hidráulicos utilizados para fazer avançar o escudo.

5. Estado actual e perspectiva futura dos desenvolvimentos tecnológicos

Como já se percebeu, por aquilo que vem sendo dito, o recurso ao chamado geoespaço tem, nos tempos recentes, aumentado vertiginosamente nas nossas cidades. O contínuo congestionamento das condições de vida acima do solo tem obrigado à realocação subterrânea de inúmeras funções específicas dos meios urbanos, como forma essencial de promover a sua imperiosa e urgente regeneração. É assim que, cada vez mais, as obras subterrâneas se confirmam entre as soluções mais interessantes para uma fracção substancial dos problemas das grandes metrópoles.

Tal como referido, os interesses actuais ao nível da ocupação e aproveitamento do subsolo, têm vindo a exigir a abertura de cavidades com dimensões cada vez maiores. Uma parte dos avanços tecnológicos verificados na construção de túneis tem visado esta apetência por secções mais amplas. Um dos principais problemas colocados neste âmbito, é o facto da obtenção de secções mais largas, para plataformas de estações ou vias de circulação, os meios disponíveis obrigarem a elevadas sobreescavações. É o que acontece para obter uma largura maior através de uma máquina circular. Em consequência, cria-se um aumento inútil na altura da cavidade.

Neste capítulo particular as principais novidades têm surgido no Japão, onde se tem verificado um significativo impulso no desenvolvimento de máquinas capazes de proceder a escavações de túneis com diversas secções transversais. São os casos por exemplo do *double-o-tube (DOT)* e do *multi-circular face (MF)*. Trata-se no primeiro caso de um escudo do tipo em que a estabilidade da frente é assegurada por contrapressão de terras e que permite a actuação de duas máquinas de corte circulares no plano da frente, e no segundo caso de um sistema formado por um escudo, que tanto pode funcionar por confinamento de um fluido ou por contrapressão de terras e susceptível de permitir a operação de várias cabeças de corte. Um outro exemplar de máquinas com tecnologias recentes, é uma tuneladora composta por um escudo principal contendo um escudo de menor diâmetro e que permite proceder a alargamentos da secção principal em certos troços, por exemplo para construir uma estação de metropolitano.

Os túneis realizados com escudos têm vindo a ser construídos com tamanhos cada vez maiores. Já se atingiram larguras da ordem dos 14 m, como no túnel rodoviário submerso da *Trans Tokyo Bay Highway*, no Japão, e no túnel sub fluvial do *Elbe Road Tube* em Hamburgo na Alemanha. Os escudos tenderão no futuro a procurar a mira dos 20 m de diâmetro, numa tentativa de igualar os túneis abertos

em meio urbano por meio de escavações do tipo NATM, tal como verificado no *Mt. Baker Ridge Tunnel* em Seattle e no *Ome Tunnel* em Tóquio (Hanamura, 2001: 1127-1137).

FIGURA 16. TBM USADA NA ESCAVAÇÃO DA ESTAÇÃO DE SHIROGANEDAI NO METRO DE TÓQUIO, (ASSIS, 2001)

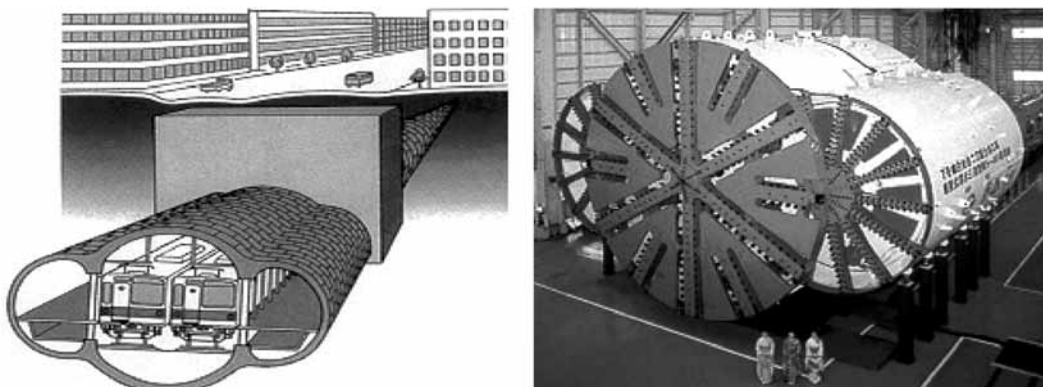
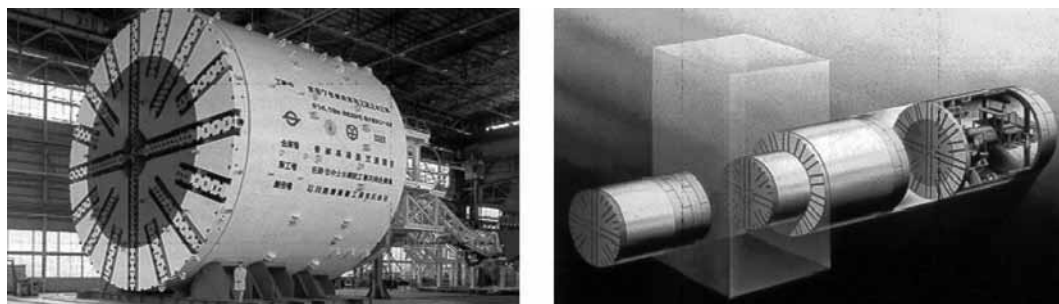


FIGURA 17. TBMS (PAI E FILHO) USADAS NA ESCAVAÇÃO DA LINHA NANBOKU NO METRO DE TÓQUIO, (ASSIS, 2001)



O método de escavação sequencial aplicado em solos ou rochas brandas, por vezes chamado *NATM urbano*, continuará em uso, sobretudo as modalidades com tecnologias mais avançadas, como o método do guarda-chuva. Túneis importantes têm sido construídos por recurso a estes processos e crê-se que as suas potencialidades continuarão a ser exploradas muito mais tempo.

Alguns túneis recorrem a reforços especiais, como é o caso de um túnel de grandes dimensões, construído a pouca profundidade, em Itália, e que constitui um exemplo do chamado método do arco celular. Este processo permitiu, através de grandes tubos em redor do tecto, criar uma incrível secção com 20m de altura e 28,8m de largura. Esta ideia de construção de uma casca exterior tem vindo a ser aperfeiçoada, tal como outras, conceptualmente novas, têm vindo a surgir, indicando que os esforços para produzir grandes cavidades irão denodadamente continuar.

A Figura 18 mostra precisamente o túnel ferroviário da *Stazione Venezia* em Milão, construído com recurso à técnica do arco celular inventada por *P. Lunardi* em 1990 para escavar cavernas subterrâneas de grande vão em solos incoerentes.

FIGURA 18. IMAGEM DA STAZIONE VENEZIA EM MILÃO E ESBOÇO DO ARCO CELULAR DE LUNARDI
(www.floornature.com)



Em jeito de conclusão, salienta-se uma vez mais a crescente demanda pela abertura de túneis, em especial os superficiais. Estes proporcionam, como se sabe, algum do último espaço que ainda está disponível para veículos e comboios, água e esgotos, e até mesmo, energia e cabos de comunicação. Não subsistem por isso dúvidas de que tonificar, expandir e aperfeiçoar as infraestruturas urbanas subterráneas, será um caminho inevitável para promover a melhoria global das condições de vida das populações. Citando *Hanamura* (2001: 1127-1137), “o espaço subterráneo não é mais um espaço opcional, mas antes um espaço necessário para as cidades”.

referências bibliográfias

- ALMEIDA E SOUSA, J. (1998). *Túneis em maciços terrosos – Comportamento e modelação numérica*. Tese de doutoramento em Ciências de Engenharia – Especialidade de Fundações e Geotecnia. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra.
- ALVAREZ, L. C. (1988). *Escavacion mecanica de tuneles*. Editorial Rueda, SL. Porto Cristo, Alcorcon (Madrid).
- ASSIS, A. P. (2001). “Métodos construtivos aplicados a túneis urbanos”. *Curso sobre túneis em meios urbanos*. Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Coimbra.
- GUEDES DE MELO, P. M. (2001). *Modelação numérica da construção de túneis em solos*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil. UTL. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- KÉRISEL, J. (1985). “The history of geotechnical engineering up until 1700”. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco. A. A. Balkema, Rotterdam/Boston, pp: 3-93
- HANAMURA, T. (2001). “Underground space development and tunneling technology”. *Modern Tunneling Science and Technology*, Adachi et al (eds), Swets & Zeitlinger, A. A. Balkema Publishers. Vol. II, pp: 1127-1137.

MOREIRA, C. (2003). *Estimativa por retroanálise de parâmetros geotécnicos de maciços envolventes de túneis superficiais*. Tese de doutoramento em Ciências de Engenharia – Esp. de Fundações e Geotecnia. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra.

MOREIRA, C. ; ALMEIDA E SOUSA, J. (2001). “Identification of the soil parameters in the analysis of a shallow tunnel”. *Modern Tunneling Science and Technology*, Adachi et al (eds), Swets & Zeitlinger, A. A. Balkema Publishers. Volume I, pp: 101 a 104.

MOREIRA, C. ; ALMEIDA E SOUSA, J. ; LEMOS, L. L. (2005). “Túnel do término da Estação Alameda II. Identificação dos parâmetros geotécnicos”. *Geotecnia*, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Volume 102, pp: 5-32.

ROCHA, M. (1976). *Estruturas subterrâneas*. Lições dos cursos de mestrado em Geologia da Engenharia e Mecânica dos Solos e das Rochas. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

THE NEW CAXTON ENCYCLOPEDIA. Caxton Publications, London.

VITRUVII POLLIONIS. *De Architectura*. Liber Decimus Ultimisque. Caput XXII. In The Classics Page. Ad Fontes Academy.