



# Tuneladoras em rocha: uma nova fronteira para a engenharia brasileira de túneis

ROBERTO KOCHEN\*

**A**té recentemente tuneladoras para solo, tipo EPB (Earth Pressure Balance – pressão de terra balanceada) eram utilizadas em túneis de pequeno, médio e grande diâmetro. E a tuneladora para a Linha 4-Amarela do Metrô de São Paulo, de grande diâmetro (9,46 m) foi o exemplo mais bem sucedido de utilização deste tipo de “megatatução”, tendo construído recentemente 6,5 quilômetros de túneis em areias, argilas e siltes sem incidentes ou acidentes (foto 1 – H. Rocha, 2012). Desde a implantação da Linha 1-Azul (conhecida na época por linha Norte Sul), o uso de tuneladoras pelo Metrô de São Paulo tem sido estimulado, dentro da tradição desta Companhia de introduzir e prestigiar novas tecnologias.

Para rocha, o primeiro tatução utilizado no Brasil construiu 4,9 quilômetros de túnel sob a Serra do Mar, recentemente (terminando a escavação em 2011), em granitos-gnaisses, migmatitos e diabásios, também sem incidentes ou acidentes (foto 2 – H. Rocha, 2012). Novas linhas do Metrô de São Paulo deverão abranger áreas ainda não exploradas para a implantação de túneis, como por exemplo as linhas 20-Rosa e 6-Laranja, em fase de projeto. E com a malha metroviária se expandindo além dos limites da Bacia Sedimentar de São Paulo, haverá necessidade de se escavar as rochas do embasamento cristalino, onde as tuneladoras em rocha poderão vir a ser usadas pela primeira vez no Metrô desta cidade, dadas as suas vantagens de segurança e rapidez, na escavação e revestimento de túneis.

O gráfico da figura 1 ilustra dois parâmetros fundamentais para a escolha de uma boa máquina TBM para escavação mecanizada em rocha:

1) A taxa de penetração (penetration rate PR) – o quanto os cortadores, girando, podem fazer avançar o disco de corte em uso contínuo. A PR é geralmente medida em metros de avanço do túnel por minuto ou por hora.

2) A taxa de avanço (advance rate AR)

*As tuneladoras têm apresentado utilização crescente no Brasil, mas se limitavam, até pouco tempo atrás, a escavar maciços em solo, para a construção de metrô, rodovias, ferrovias e sistemas de água e esgoto. A construção recente de um túnel em rocha de grande diâmetro e extensão abre novos horizontes para a engenharia brasileira de túneis. A máquina utilizada – uma tuneladora duplo escudo (double shield) com gripper (sapatas laterais) e frente fechada – mostrou que é possível contar com estas máquinas para construir a infraestrutura subterrânea tão necessária atualmente ao desenvolvimento do Brasil. As vantagens e desvantagens destas tuneladoras serão apresentadas, com base na experiência recente de construção de um túnel de grande diâmetro e extensão na Serra do Mar. Novas linhas do Metrô de São Paulo, mais abrangentes e que se estenderão além dos limites da Bacia Sedimentar desta cidade, irão ser escavadas em rocha, e certamente se beneficiarão da tecnologia de tuneladoras em rocha descrita neste trabalho.*

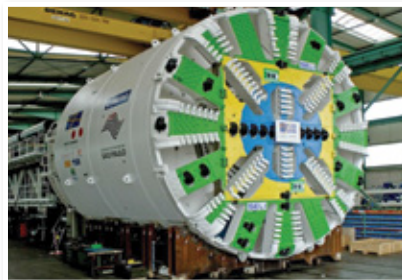


Foto 1 - Tuneladora EPB para solo residual e solo sedimentar (Linha 4-Amarela do Metrô de São Paulo)

– o quanto a tuneladora avança, considerando a sua porcentagem de utilização, ou seja, qual a efetiva utilização da máquina escavando a rocha, já que das 24 horas por dia, em diversas horas a máquina é paralisada para troca de cortadores, manutenção e atividades correlatas. A AR é geralmente medida em metros de avanço do túnel por minuto ou por hora.

Ambos os parâmetros dependem do tipo de rocha, e da classe (qualidade) do maciço (resistência, abrasividade, fraturamento, alteração etc.). O gráfico da figura 1 indica estes parâmetros como uma função do índice Q de Barton, de qualidade do maciço rochoso.

**Nota:** Segue que, embora a PR seja sempre menor à medida que aumenta a qualidade do maciço, a AR é máxima para maciços rochosos de qualidade média. De fato, quanto melhor a qualidade do maciço rochoso (expressa pelo índice Q), maior é o desgaste de cortadores, e o tempo de parada para troca dos mesmos, e manutenção geral da máquina e equipamentos acessórios (backup etc.). Desnecessário dizer que uma avaliação geológica-geotécnica detalhada do maciço rochoso a ser escavado, das classes de maciço a serem atravessadas, e das propriedades destes maciços, inclusive resistência à compressão simples e abrasividade, são essências para a correta escolha da máquina TBM e para um desempenho bem sucedido da mesma na escavação do túnel (Hartwig, M. et al., 2011).

## TUNELADORAS EM ROCHA NO BRASIL

Este trabalho se baseia em informações já publicadas em congressos e seminários sobre o primeiro túnel escavado com tuneladora no Brasil. Trata-se de Double-Shielded TBM, e já foi descrito de forma abrangente e exaustiva em publicações anteriores [ver referências: Rocha, H.C. (2012); Filho, C., et al. (2012); Manzano, A., et al. (2012); Kanji, M., et al. (2012); Elsner, P., et al. (2012); Hartwig, M., et al. (2012); Araujo, R., et al. (2012)].

Descreve-se a seguir os principais aspectos geológicos-geotécnicos da execução de túnel de 5,2 quilômetros (sendo aproximadamente 300 metros em NATM – no seu trecho inicial –, com Double-Shielded TBM no Brasil em rocha granítica). A ênfase é descrever as investigações geotécnicas prévias e durante a escavação, sondagens geofísicas e mapeamento de frente de escavação realizado diariamente. Ao final é realizada uma discussão sobre as principais ocorrências possíveis desse tipo de empreendimento e os cuidados que devem ser tomados para a boa prática da engenharia de túneis.

O início das definições e concepções de obras em túneis passa pela análise global do empreendimento, buscando sempre que possível minimizar aspectos socioambientais negativos. Na visão de (Filho et al., 2012), a construção de um túnel de grande extensão pode possibilitar a minimização de uma vasta gama de impactos socioambientais, se comparada à construção de uma faixa de superfície.

A execução de túnel pode ser a solução encontrada para a transposição de trecho da Serra do Mar, causando o menor impacto ambiental possível, preservando consequentemente grande área de mata nativa do país (Manzano et al., 2012).

Dentre a análise de risco geológico-geotécnico de escavação de um túnel na Serra do Mar, de aproximadamente 5,2 quilômetros de extensão em rocha granítica, com presença identificada em sondagens e reconhecimentos geológicos de campo de zonas fraturadas por milonitos e diques de diabásio, houve escolha pelo uso de equipamento Double-Shielded TBM.

Equipamentos tuneladores em rocha podem utilizar dois mecanismos principais de sistemas de empuxo: grippers laterais, que se apoiam diretamente sobre o maciço rochoso, acionados por cilindros hidráulicos; e traseiros, com cilindros hidráulicos posicionados diretamente sobre os anéis de revestimentos construídos pelo TBM.

O equipamento TBM de Double-Shield possui os dois sistemas de empuxo e pode realizar a operação combinada



Foto 2 - Tuneladora em rocha para túnel sob a Serra do Mar

de ambos, reduzindo seu tempo de ciclo de escavação e aumentando sua produtividade diária com segurança em áreas de menor resistência lateral da rocha, como áreas de rocha fraturada e usualmente no início de suas atividades (Maidl et al., 2008).

A taxa média de avanço da escavação total de um túnel TBM em maciço rochoso de relevante capacidade de suporte (maciço rochosos classe I ou II, em média – sistema Bienawski, 1989), pode ser de 11,2m/d ou 0,47m/h (Elsner et al., 2012).

### ASPECTOS GEOLÓGICOS E INVESTIGAÇÕES REALIZADAS

Nunca é demais enfatizar a importância de estudos geológicos-geotécnicos, e de uma correta e completa caracterização dos maciços de solo e rocha a serem escavados, para o sucesso do empreendimento.

A Serra do Mar é uma das feições mais notáveis da costa sudeste do Brasil. Com até 2 200 metros acima do nível do mar segue embasamento estrutural precambriano constituído de rochas metamórficas intrusivas por várias gerações de rochas graníticas, inclusive o dobramento Ribeira (Hasui et al., 1975). Após um longo período de quiescência tectônica, a atual costa sudeste do Brasil foi submetida a um impor-

tante processo de reativação tectônica, que se manifesta desde os tempos jurássicos que culminou com a abertura do Oceano Atlântico Sul (Almeida, 1976).

O sistema de classificação do maciço rochoso foi o Rock Mass Rating (Bienawski, 1989). O maciço rochoso ao longo dos mapeamentos geológicos realizados apresentou maciço rochoso Classe I e II para 90% do comprimento do túnel.

O túnel foi implantado com início aproximado na cota 60m em relação ao nível do mar e final na cota 200m, com aclividade constante de 3%, a favor da drenagem para o lado externo do túnel. O trecho final do túnel se encontra 540m abaixo da superfície, com confinamento vertical do maciço superior a 1 300tf/m<sup>2</sup>. A condição de confinamento extrema do maciço apresentou Coeficiente de Empuxo (K<sub>0</sub>) com variação em profundidade de 1,5 a 3,0 nos ensaios de campo realizados.

A campanha de ensaios de campo realizada incluiu sondagens mistas e rotativas, geofísicas, probe drilling, perfuração horizontal de grande diâmetro, ensaio de condutividade e fraturamento hidráulico.

O trecho escavado por método mecanizado foi caracterizado como granito-gnaiss muito duro e abrasivo, de pouco fraturamento. A parte inicial do túnel foi escavada pelo método NATM, principalmente em saprólito.

As escavações se desenvolveram por maciço de granito-gnaiss com presença de diques hidrotermais de diabásio, milonitos e pegmatitos.

O ensaio de fraturamento hidráulico foi realizado em profundidades de 138,7 a 149,2m. A orientação de maior tensão horizontal (SHmax) é no intervalo N-NNE. O Coeficiente de Empuxo (K<sub>0</sub>) extrapolado para a profundidade de 540m é de 1,5. A condutividade hidráulica foi determinada em dez intervalos fraturados de três metros cada, em profundidades de 26 a 451m. O ensaio de condutividade hidráulica mostrou fraturas de baixa permeabilidade (K<sub>max</sub> = 10<sup>-6</sup> cm/s), possivelmente relacionadas com as altas tensões de confinamento. A resistência a compressão simples da rocha granítica intacta atingiu valores de 86 a 143

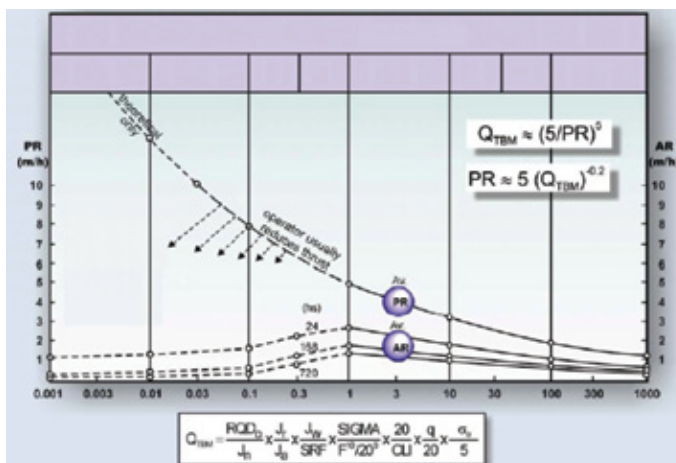


Figura 1 - Gráfico da taxa de penetração e avanço em função da qualidade do maciço rochoso



MPa e o índice Cerchar de abrasividade variou em intervalo de 3,9 a 5,8.

Os principais parâmetros que intervm com a operação do TBM, são o teor de Quartzo, o Índice de Abrasividade Cerchar, o Ensaio de Compressão Puntiforme (PLT - Point Load Test), e a Resistência à Compressão Uniaxial obtida da relação feita com o ensaio puntiforme (Kanji et al., 2012).

O avanço da TBM foi realizado com acompanhamento técnico especializado e utilização de investigações geofísicas (elétrica e sísmica), probe drilling e mapeamento de frente de escavação.

### ATIVIDADES INICIAIS PARA UMA UTILIZAÇÃO BEM-SUCEDIDA DE TUNELADORAS EM ROCHA

#### Planejamento e atividades preliminares

Inicialmente, foi desenvolvida extensa campanha de sondagens e ensaios (caracterização/abrasividade, fraturamento hidráulico etc.) ao longo do eixo do túnel e trechos complementares e geotecnicamente representativos, a fim de desenvolver um perfil geológico-geotécnico abrangente do trecho a ser escavado. Sua importância foi crucial para a determinação do equipamento de escavação mecanizada (TBM) a ser utilizado.

Por conta do pioneirismo do projeto, tal equipamento deveria ser importado. Ele precisou ser desmontado, enviado ao canteiro de obras e montado novamente.

Neste meio tempo, foram fabricadas quantidades suficientes de aduelas de concreto armado de alta resistência a compressão, sob duas configurações distintas, alterando sua capacidade de suporte, a serem aplicadas conforme sua necessidade.

Por conta da concepção do equipamento TBM, projetado para escavação em rocha, houve a necessidade de se escavar algumas dezenas de metros pelo processo NATM até se obter um maciço rochoso compatível com o equipamento de escavação e com os sistemas de empuxo por ele utilizados.

Como a montagem da TBM deveria ser externa ao túnel, foi necessário seu transporte até o trecho inicial. Para tanto foi necessária a construção de longa laje de 40 MPa para seu suporte e sua movimentação com reação dos pistões anteriores em segmentos de madeira. Sua movimentação foi realizada em trilhos montados especificamente para este fim, de configuração diferente de uma via férrea normal.

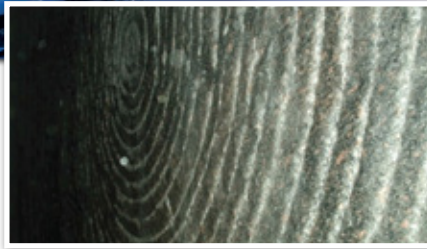


Foto 3 - Frente de escavação, durante mapeamento diário



Foto 4 - Discos de corte e raspadores



Foto 5 - Frente de escavação apresentando planos de fraturamento evidentes em maciço classe III



Foto 6 - Redução de temperatura da frente de escavação com água



Foto 7 - Detalhe de planos de fraturamento e como são quebrados.

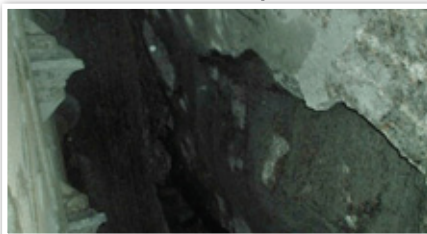


Foto 8 - Detalhe de planos de fraturamento, observando preenchimento brando, condição ainda melhor para a velocidade de avanço. Entretanto, estas zonas devem ser vistas como de maior risco e devem receber maior atenção e imediatas ações de suporte

#### Início da escavação

Uma vez montada a TBM, sua extensão total média cerca de 130m, sendo cerca de 30m de escudo (Shield) e 100m de Back-up, onde são instaladas os diversos sistemas e dispositivos auxiliares de funcionamento da TBM. Como principais exemplos dos últimos pode-se citar o que vai abaixo.

**Cabine de comando** - Responsável pela escavação do equipamento, onde o operador conta com diversas telas apresentando o status dos dispositivos de controle, orientação e sondagem.

**Esteira** - Responsável por transportar o material escavado para a parte anterior do backup, de onde é transportada para fora da obra.

**Eretor de anéis** - Equipamento de operação manual responsável pela instalação dos segmentos de concreto pré-moldados, de forma a se finalizar um anel de concreto com função estrutural. Este anel é montado ainda dentro do escudo da TBM e posteriormente é empurrado pelos pistões anteriores da tuneladora, solidarizando-o aos demais anéis já instalados.

**Magazine** - Estrutura responsável pelo transporte das aduelas de concreto pelo interior do backup até o eretor.

**Bomba de injeção** - Após a montagem dos anéis de concreto, fica ainda um vazio entre este e o maciço, que deve ser preenchido, por exemplo, com injeção de calda de cimento e trechos drenantes com pedrisco.

Existem diversos modelos de tuneladoras atualmente no mercado. Para o caso específico, a região da partida em maciço Classe IV teve de ser reforçada com concreto projetado armado para o apoio dos grippers laterais.

Foram então apoiados os grippers e iniciada a escavação. Esta escavação se dá pelos macacos hidráulicos posteriores, que empurram o disco de corte contra a frente de escavação, reagindo somente nos grippers. Esta prática implica em baixa velocidade de escavação.

Após o avanço do escudo, é necessário iniciar a instalação dos anéis de concreto pré-moldados. Para tanto, é recomendado que se instale um anel metálico chumbado ou estrutura similar reforçada para evitar desalinhamentos.

Após certo número de anéis, já se verifica atrito suficiente para a tuneladora utilizar também os macacos hi-

dráulicos anteriores, garantindo desta forma um aumento significativo de velocidade e eficiência.

Os grippers possuem curso não muito grande, pois, quanto maior seu curso de abertura, mais frágil ele se torna e menos pressão suporta e interfere ao maciço. As escavações em rocha usualmente se iniciam em zonas mais fraturadas, podendo ocorrer capelas ou formações geológicas mais brandas que dificultam ou prejudicam sua atuação, sendo necessárias medidas de readequação.

Quanto à instalação das aduelas, é preciso garantir seu alinhamento e proteção adequada entre os anéis para evitar trincas e pequenas lascas.

Observa-se que os cortadores promovem marcas visíveis no maciço, conforme ilustrado nas fotos 3 e 4, que pode ser identificado como maciço classe I ou II, em função do número e disposição do fraturamento. Este mapeamento é expedito e extremamente complexo e perigoso, uma vez que o espaço entre o maciço e a cabeça de corte da TBM é de cerca de 50 a 70cm.

O processo de escavação mecanizada em maciço classe III é o mais favorável à velocidade de escavação, uma vez que os discos de corte trabalham fissurando o maciço, cortando-o, quebrando-o e raspando-o. Quando ele já se encontra fraturado, o processo é favorecido (ver gráfico da figura 1). Na foto 5 é possível observar os planos de fraturamento evidentes do maciço rochoso conforme o avanço da escavação.

Dependendo do tipo de maciço e condições de água, a escavação provoca muito pó. Durante a etapa de manutenção, quando são trocados os cortadores, raspadores e feitos demais serviços de manutenção necessários, não se pode entrar na “cabeça de corte” até que a temperatura do aço diminua. Esse procedimento pode ser observado na foto 6. Por conta disso, e também por conta da grande quantidade de resíduos de escavação no sistema, é prática comum o lançamento de água sob pressão em toda a região. Esta água colabora também para a viabilização do mapeamento de frente de escavação.

As fotos 7 e 8 ilustram os efeitos de lascamento da rocha escavada com planos de fraturamento.



## ACOMPANHAMENTO TÉCNICO DIÁRIO DO AVANÇO DA TBM

Além do mapeamento diário da frente de escavação, são executadas sondagens profundas horizontais na frente de escavação em rocha e verificada a condição adequada para o início da escavação mecanizada. Para isso são necessários sistemas de investigação do maciço adiante da frente de escavação. Foram utilizados sistemas geofísicos de princípio elétrico e sísmico. Sistemas de investigação elétrica são sensíveis à presença de água no maciço e podem atingir bons resultados a distâncias médias de até 20m. Por outro lado, sistemas de investigação sísmica são sensíveis a maciços rochosos e contatos geológicos de baixa qualidade e podem atingir bons resultados a distâncias médias de até 100m da frente de escavação.

O sistema de monitoramento elétrico da frente de escavação é acoplado ao TBM de modo a se obter contato com o maciço na frente de escavação. Desta sondagem, pode-se obter estimativas de zonas de maior ou menor facilidade de propagação do sinal, podendo ser interpretadas, com algumas correlações técnicas, as condições do maciço adiante da frente de escavação.

Pelas leituras do monitoramento elétrico é possível verificar a possibilidade de zona com baixo grau de fraturamento, nas quais resistividade elevada indica baixa possibilidade de ocorrência de água em vazão elevada.

Pela experiência naquele tipo de maciço, observou-se que o alcance deste equipamento seria de cerca de 20m e sua análise deveria ser extremamente técnica, em função do grau de fraturamento e presença de água adiante da frente de escavação.

O sistema de monitoramento sísmico adiante da frente de escavação utilizado neste tipo de escavação apresenta maior alcance, em função das condições do maciço, como densidade, fraturamento, preenchimento, água etc.

Este sistema sísmico funciona por meio de propagação de ondas e análise de refletores, a partir de um golpe inicial no maciço rochoso em diversos pontos no interior e atrás da tuneladora. Para a análise e interpretação dos dados de saída apresentados, são necessários profissionais extremamente técnicos e treinados, de modo a definir as condições e ações necessárias aos



próximos avanços da TBM.

Como método destrutivo de sondagem da frente de escavação, pode-se utilizar probe drilling. Este método consiste na perfuração em ângulo da frente de escavação, com cerca de 5cm de diâmetro, controlando-se a velocidade de avanço e a pressão de avanço. É possível também a verificação de ocorrência de água e zonas mais brandas ou de falhas.

Um profissional especializado acompanhando esta perfuração pode prever com boa margem de segurança uma zona anômala e, dependendo da intensidade/persistência, uma zona de maior fraturamento do maciço. Esta exploração é feita em função da necessidade e limitações do equipamento. Em média, é executada com cerca de 20m.

As informações apresentadas pelas sondagens geofísicas elétrica e sísmica são utilizadas ao longo de todo o processo de escavação, em conjunto com o perfil geológico desenvolvido em função de sondagens anteriores, rotativas e sísmicas. São também essenciais os ensaios de abrasividade, por conta do desgaste dos cortadores e fraturamento hidráulico do maciço, quando se verificam condições desfavoráveis de estado de tensões muito alto, com cerca de 500m de cobertura de rocha e potenciais fraturas que possam comunicar o túnel com reservatórios de água.

A atuação da empresa de engenharia geotécnica neste processo é de vital importância, pois são seus profissionais que definirão a necessidade ou não de eventuais tratamentos e mesmo a necessidade de reforço no trecho avaliado, caso ocorram sinais de aporte de água consideráveis, com pressão elevada e/ou ocorrência de zonas fraturadas ou com possibilidade de tensões anômalas.

Para estas condições especiais de esforço, são projetadas aduelas de dois tipos, devendo sua atuação ser definida por diversos estudos geológicos-geotécnicos de elevada complexidade.

O mapeamento geológico-geotécnico da frente de escavação apresenta de forma visual os dados inferidos indiretamente e colabora com sua aferição. Este mapeamento deve ser analisado pelo engenheiro geotécnico da obra para, em complemento aos dados já disponíveis apresentados anteriormente, avaliar as definições de escavação.



Foto 9 a 19 - Ilustram diversas etapas de construções de túneis em rocha com escavação mecanizada.

## PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS POSSÍVEIS PARA ESCAVAÇÃO COM TUNELADORAS EM RÓCHA

Como principais tipos de ocorrência para este tipo de obra, devem ser observados os que prejudicam a velocidade de avanço e por isso comprometem o cronograma.

Análises do maciço são muito importantes e devem ser periódicas, pois um maciço muito abrasivo pode desgastar rapidamente uma série de cortadores. Como os cortadores novos não devem ser instalados junto com cortadores de meia vida, a periodicidade de troca destas peças é um dos temas mais importantes de uma obra deste tipo, em função do cronograma do empreendimento e seu custo.

Os cortadores periféricos, por exemplo, são responsáveis pela sobre-escavação do maciço em relação ao shield. Em função da precisão dos comandos e da perícia do operador, pode ocorrer o rápido desgaste destes elementos e a máquina se situar a uma distância menor em relação ao maciço. Nesse caso, o desconfinamento do maciço pode prender o TBM, podendo ser necessário o uso de explosivo para reabilitá-la.

Pode também ser identificada uma região de maior falha adiante da frente de escavação. Este diagnóstico pode ser verificado pelas sondagens adiante da frente de escavação, pelo perfil geológico previamente elaborado, pelo material que sai da frente de escavação, pelo furo de prospecção horizontal (probe drill), entre outros. Neste caso, deve-se verificar as condições de transposição desta zona, avanço máximo e tratamentos eventualmente necessários.

Podem ocorrer zonas de elevado aporte de água para o interior do túnel. Nessa situação é preciso ter cautela com o avanço da escavação, pois a estrutura do túnel tem capacidade de carga limite. Por vezes, é melhor ter-se um túnel drenante e conviver com a água, cuidando-se para que não ocorra perda de material estrutural ou do maciço. Pode-se projetar um túnel drenante com pedriscos, injetados por bomba acoplada na região do backup, e selo de calda de cimento acima e abaixo, entre os anéis de concreto e o maciço rochoso. O importante é que estas injeções sejam feitas o quanto antes, para garantir que não ocorra desconfinamento demaciço.

Existem diversos tipos de tuneladoras

atualmente no mercado, sendo necessário conhecer as atribuições e deficiências de cada tipo. Existem equipamentos que escavam apenas rocha, de classe I a classe IV, portanto o saprólito/classe V pode causar embuxamento da cabeça de corte e, conseqüentemente, reduzir a eficiência do sistema. Caso se verifique a ocorrência deste cenário, os engenheiros geotécnicos devem definir qual a melhor condição para sua transposição. São necessárias verificações quanto ao peso da máquina tuneladora, por exemplo, uma vez que o disco de corte tem um peso muito maior que outras partes do conjunto, podendo instabilizar o equipamento durante a escavação, ainda mais caso não se possam utilizar os grippers e os estabilizadores de escavação. Uma alternativa a essa situação é efetuar a melhoria do solo adiante da frente de escavação, por exemplo.

Outra questão que deve ser observada é quanto à integridade física dos anéis de concreto. Durante o processo de escavação há muita vibração e movimentação no equipamento de escavação mecanizada. Assim que o último anel é montado dentro do escudo da TBM, este já é solidarizado ao anel anterior, de forma que as vibrações e movimentações do back-up são propagadas aos anéis de concreto, podendo fissurar, trincar e lascar algumas aduelas.

Para este tipo de ocorrência, a inspeção de todo o túnel feita por um engenheiro geotécnico experiente é de vital importância, pois ele poderá identificar, dentre as aduelas anômalas, se há alguma ocorrência de instabilidade ou risco de danos estruturais ao túnel ou somente danos superficiais ao revestimento do túnel.

As fotos de 9 a 19 ilustram diversas etapas da construção de túneis em rocha com escavação mecanizada – tuneladoras.


### CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de equipamento tunelador para um túnel em rocha, tão extenso quanto este exemplo, trouxe benefícios como redução do tempo de construção, escavação em perfil preciso, facilidade de uso de elementos de acabamento pré-moldados, processo de trabalho contínuo e automatizado, necessidade de menos operários, melhores condições de segurança de trabalho para os operários e processo mecanizado e automatizado

de escavação com registro computacional do direcionamento do túnel.

Essas vantagens, portanto, compensaram de grande forma o investimento necessário em projeto e elaboração de estudos geológicos-geotécnicos complementares, e principalmente o investimento alto de aquisição e montagem do TBM. Esse empreendimento foi favorável ao uso de TBM, pelo seu elevado comprimento (5,2 km em túnel), prazo curto de execução, e pelo fato de o túnel não possuir desmboque, terminando em poços (shafts) verticais para passagem de dutos.

E de forma geral podemos afirmar que é possível contar com estas máquinas tuneladoras para construir a infraestrutura subterrânea tão necessária

atualmente ao desenvolvimento do Brasil. As vantagens e desvantagens destas tuneladoras, com base na experiência de construção deste túnel de grande diâmetro e extensão na Serra do Mar, mostram que é possível utilizá-las para a construção de linhas de metrô, sistemas de adução de água, e outras obras de infraestrutura, de grande relevância para o nosso país, e extremamente necessárias para compor nossa infraestrutura de logística e transporte. 

*\* Roberto Kochen é engenheiro, professor doutor pela Escola Politécnica da USP, diretor-presidente da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente E-mail: kochen@geocompany.com.br*

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, F.F.M. (1976). The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 48 (suplemento). p. 15-26.
- [2] BIENIAWSKI, Z.T. (1989). Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers and geologist in mining, civil, and petroleum engineering. New York: John Wiley, 251p.
- [3] HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. (1975). The Ribeira Folded Belt. Revista Brasileira de Geociências, v.5, p. 257-266.
- [4] MAIDL, B.; SCHMID, L.; RITZ, W.; HERRENKNECHT, M. (2008). Hardrock Tunnel Boring Machines. Ernst & Sohn, Berlin. 356p.
- [5] ELSNER, P.; VIDAL, C. (2012). Experiences From the Hard Rock TBM Tunnel Drive in Brazil. 3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas.
- [6] KANJI, M.; TEIXEIRA, R.; CEZAR, M.; ELSNER, P. (2012). Geologia do Túnel GASTAU e sua Influência na Escavação por TBM. 3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas.
- [7] MANZANO, A.; MATTOS, T.; ASSIS, S.; OLIVEIRA, W. (2012). O Desafio do Parque Estadual da Serra do Mar – Gasoduto GASTAU. 3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas; Seminário Internacional “South American Tunneling – SAT.”
- [8] FILHO, C.; NETO, J.; ANSALONI, R. (2012). O Túnel do Gasoduto Caraguatuba – Taubaté e a Minimização dos Impactos Sobre o Ambiente Protegido da Serra do Mar. 3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas.
- [9] ROCHA, H.C. (2012). Tunnels in Brazil, CBT – Brazilian Tunneling Committee, Rio de Janeiro, RJ.
- [10] LINS, N. (2012). Obras Subterrâneas para Passagem de Dutos de Óleo, Gás e Álcool, Tunnels and Underground Structures, Rio de Janeiro, RJ
- [11] ARAUJO, R.; YANEZ, D.G.; BASTOS, I.G.; KOCHEN, R. (2012). Túnel em Rocha executado com Double-Shielded TBM no Brasil, COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Porto de Galinhas, PE.
- [12] HARTWIG, M.; ARAUJO, R.S.; BASTOS, I.G.; KOCHEN, R. (2012): TBM tunnel under Serra do Mar range: The first Hard Rock mechanized tunnel in Brazil, COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Porto de Galinhas, PE.
- [13] HERRMANN, M. (2012). Escolhas e Desafios na Logística de Importação de uma TBM, Tunnels and Underground Structures, Seminário IQPC, Rio de Janeiro, RJ
- [14] MATTOS, T. S. (2012). A Construção de Túneis para a Instalação de Dutos e os principais desafios, Tunnels and Underground Structures, Seminário IQPC Rio de Janeiro, RJ.