



TÚNEIS... A FRONTEIRA DA GEOTECNIA

Roberto Kochen

Presidente e diretor técnico da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente, São Paulo, Brasil e prof. dr. da Escola Politécnica da USP.
www.geocompany.com.br

Izabel Gomes Bastos

Diretora de projetos da GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente, São Paulo, Brasil, e mestre em Engenharia Geotécnica – Escola Politécnica da USP.
www.geocompany.com.br

TÚNEIS – A EVOLUÇÃO DAS ÚLTIMAS DÉCADAS

Os túneis, sejam em solos ou rochas, exercem um grande fascínio sobre a humanidade desde a época em que nossos ancestrais habitavam cavernas. O primeiro túnel feito pelo ser humano data do século VI a.C., na ilha grega de Samos, com o comprimento de aproximadamente 700 m. Foi escavado em rocha para adução de água com cinzel e martelo, como se fosse uma escultura, com seção transversal muito reduzida. Não se sabe quanto tempo levou sua construção.

Desde esta época o homem busca conquistar o espaço subterrâneo, mas só recentemente, nos últimos 60 anos, a tecnologia de escavação de túneis se desenvolveu mais rapidamente, permitindo a utilização ampla de soluções subterrâneas nas cidades, vias de transportes e outras obras de infraestrutura construídas pelo homem.



Foto 1a – TBM – Início de escavação na via Mockingbird, DART – Dallas, 1992



Foto 1b – Perfuratriz Raise Borer para poço inclinado na mina de cobre – Bolívia, 1986



Foto 2a – Escavadeira em túnel de teste em Heathrow – London, UK, 1994



Foto 2b – Escavação com Fresa na Estação Subterrânea Exchange Place – Jersey City, NJ, 2002

Na década de 1950, o prof. Rabcewicz introduziu os conceitos básicos e a metodologia do NATM (New Austrian Tunneling Method), viabilizado tecnicamente pelo advento do concreto projetado. Logo em seguida, empresas como Wirth e Robbins iniciaram o aperfeiçoamento de tecnologias já existentes para obter grande aumento de produtividade, qualidade e segurança em máquinas para escavações mecanizadas (os assim chamados TBM – Tunnel Boring Machines, popularmente conhecidos como “tatuções”).

Estas duas técnicas (NATM e TBM), com o aumento de produtividade, qualidade e segurança obtido nas últimas décadas, viabilizaram o uso

em larga escala de soluções subterrâneas, a ponto de atualmente ser comum o projeto e a execução de linhas inteiras de Metrô, em áreas urbanas, totalmente em subterrâneo.

Com isto, a técnica de projeto e construção de túneis evoluiu e avançou. Ela passou a ser a *Frontera da Geotecnica*, já que fundações e barragens precederam a geotecnica de túneis.

Hoje, os túneis se baseiam predominantemente em duas técnicas bastante difundidas:

- Técnica de Túneis Mecanizados (TBM – fotos 1a e 1b)
- Método de Escavação Manual (NATM – fotos 2a e 2b)

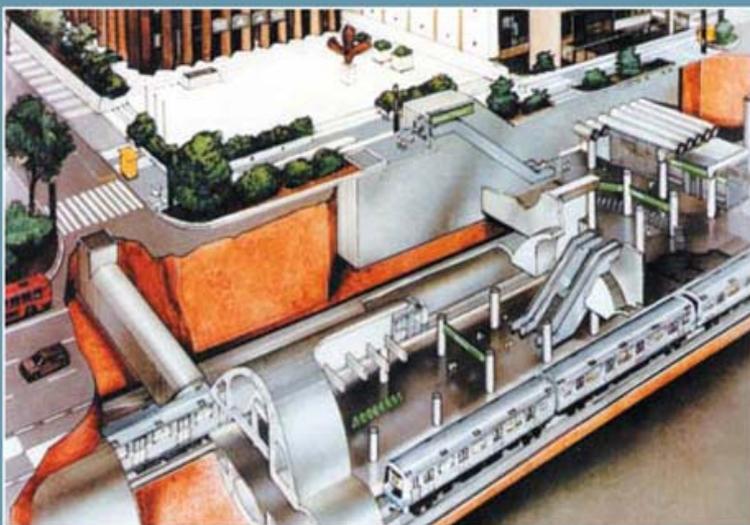


Figura 1 - Perspectiva das estações Brigadeiro e Trianon (CBT, 2006)

TÚNEIS NO BRASIL

O CBT - Comitê Brasileiro de Túneis, publicou em 2006 o livro "Túneis do Brasil", no qual são descritos exemplos notáveis de sucessos alcançados pela engenharia brasileira em obras subterrâneas. O primeiro autor deste artigo elaborou o capítulo

"Túneis de Passagens e Travessias", e deste livro foram retirados a maior parte dos exemplos de sucessos em obras subterrâneas no Brasil descritas a seguir. Uma coletânea destes sucessos (e dos acidentes também) pode ser encontrada em Kochen (2008).

São Paulo

Como exemplo de linha metroviária totalmente subterrânea, podemos citar, entre outros casos a Linha 2 (Paulista) do Metrô São Paulo, em particular as Estações Brigadeiro e Trianon. Elas foram construídas sob a av. Paulista, com baixíssima cobertura de solo (apenas 4 metros) e sem que o tráfego de veículos precisasse ser interrompido por um único dia sequer durante a construção. A figura 1 mostra uma perspectiva das estações Brigadeiro e Trianon, ilustrando a sua disposição tridimensional.

A foto 3 mostra uma vista do túnel de acesso à calota superior da estação Brigadeiro durante a construção. Todos os acessos às estações Brigadeiro e Trianon, durante a construção, foram feitos por ruas laterais, evitando-se interferência na av. Paulista.

Nesta mesma linha, foram construídas com igual sucesso a estação Consolação (foto 4), estação Vila Madalena (foto 5) e, na Linha 1 (Norte-Sul) do Metrô São Paulo, a estação Jardim São Paulo (foto 6).



Foto 3 - Vista do túnel de acesso à calota superior da estação Brigadeiro durante a construção (CBT, 2006)

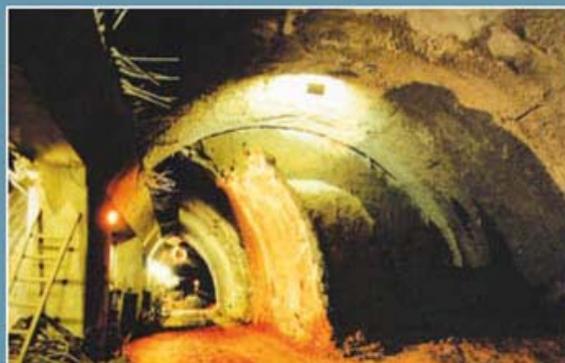


Foto 5 - Vista do interior da estação Vila Madalena durante a escavação (CBT, 2006)

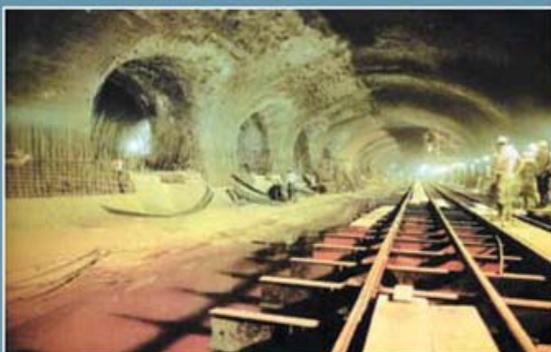


Foto 4 - Vista do interior da estação Consolação durante a escavação (CBT, 2006)

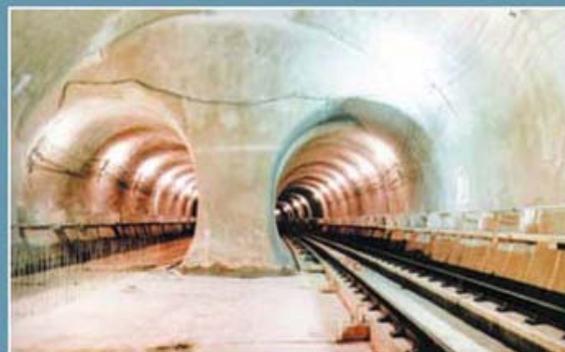


Foto 6 - Vista do interior da estação Jardim São Paulo durante a escavação (CBT, 2006)

Salvador

Da mesma forma, podemos citar na Linha 1 do Metrô de Salvador a estação Campo da Pólvora. A foto 7 mostra o poço de acesso, duplo, escavado na praça de mesmo nome em Salvador. A foto 8 mostra a vista dos emboques dos túneis no interior do poço de acesso da estação Campo da Pólvora.



Foto 8 - Vista dos Emboques dos Túneis no interior do Poço de Acesso - estação Campo da Pólvora (CBT, 2006)



Foto 7 - Poço de acesso duplo na estação Campo da Pólvora - Metrô de Salvador (CBT, 2006)

Brasília

Já no Metrô de Brasília, DF, foram construídas oito estações subterrâneas na Asa Sul, inclusive com passagens por fundações profundas pelo interior do túnel. A foto 9 mostra uma vista de uma das estações já escava-

das, com o emboque do túnel sob a Asa Sul em andamento. A foto 10 mostra um trecho do túnel via dupla do Metrô de Brasília já com o revestimento final, parte em concreto moldado in loco, parte em concreto projetado. E a foto 11 mostra a passagem

do túnel sob estrutura com fundação profunda (Galeria dos Estados), na Asa Sul, que requereu técnicas especiais de tratamento do solo, realização de estrutura de transferência de carga por dentro do túnel, e corte dos tubulões.

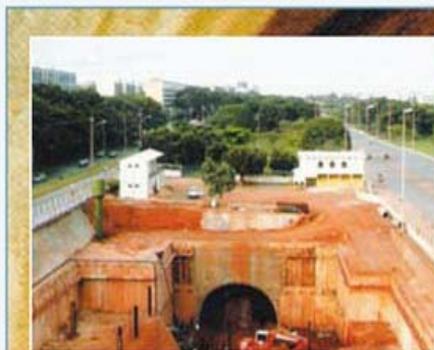


Foto 9 - Vista de estação na Asa Sul, com emboque do túnel já escavado - Metrô DF (CBT, 2006)

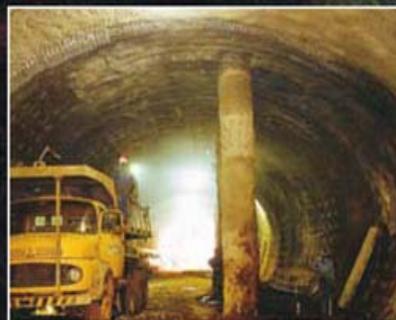


Foto 11 - Passagem do Túnel de Via do Metrô DF sob estrutura com fundação profunda (CBT, 2006)

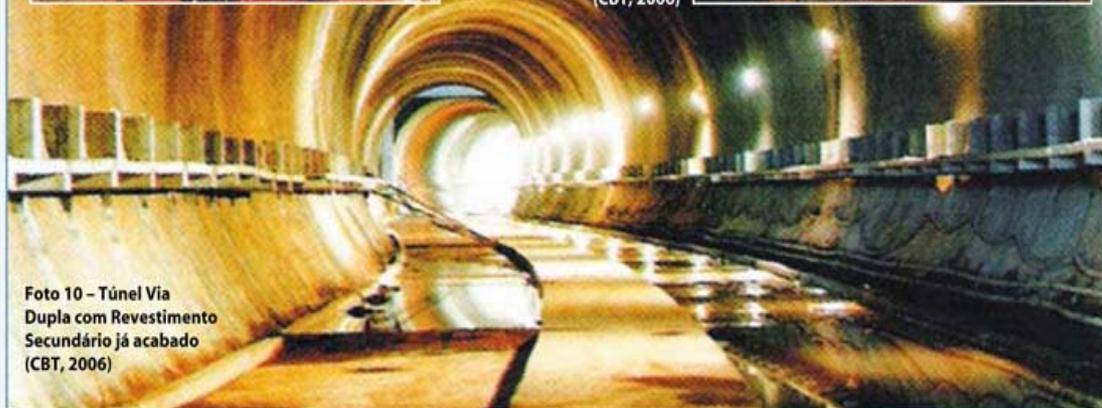


Foto 10 - Túnel Via Dupla com Revestimento Secundário já acabado (CBT, 2006)

O MÉTODO NATM DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

No NATM, a escavação em solos de poços e túneis utiliza normalmente escavadeiras ou fresa (fotos 2a, 2b), com a escavação avançando e sendo suportada incrementalmente. O suporte da escavação é feito passo a passo, com concreto projetado, cambotas treliçadas, enfilagens de barra e/ou injetadas, etc. A escavação em rocha utiliza técnicas de escavação a fogo, com perfuratrizes tipo "jumbo", hoje frequentemente automatizadas, e detonação de explosivos, com elementos de suporte em chumbadores, tirantes e concreto projetado, utilizando-se em alguns casos cambotas treliçadas ou calandradas. A foto 12 mostra uma perfuratriz automática utilizada décadas atrás em um túnel europeu.

Enquanto o TBM usualmente bloqueia toda a face de escavação, a técnica NATM possibilita acesso livre a qualquer parte da área de escavação, permitindo acomodar condições geológico-geotécnicas variáveis, bem como mudanças na seção transversal do túnel. Isto resulta em maior flexibilidade na utilização de medidas de estabilização (como tirantes, chumbadores, enfilagens, etc.) e na possibilidade de rápido acesso à frente de escavação para medidas de estabilização.

Embora a velocidade de escavação de um equipamento TBM seja normalmente superior ao avanço do NATM,

este pode ser aplicado a escavações em praticamente qualquer tipo de condições geológico-geotécnicas.

Técnicas mecanizadas são basicamente aplicáveis a seções transversais geometricamente uniformes (circulares), e formações geológico-geotécnicas também uniformes, permitindo velocidades de avanço rápidas nestas condições. Este fato pode, no entanto, ser compensado no NATM, em muitos casos, pela escavação de frentes múltiplas, utilizando-se poços, túneis de acesso e ligação adicionais (assegurando-se o cumprimento dos cronogramas de construção), mantendo-se as vantagens de observação da face de escavação e a possibilidade de modificar o sistema de suporte inicial, se necessário.

No NATM, há um grande número de recursos de projeto, construção e tratamento do maciço que permite a escavação do túnel em praticamente qualquer condição de solo (figura 2), e através de qualquer obstrução, incluindo fundações profundas. Isto também é verdade para a escavação de grandes obras subterrâneas, como estações de metrô, com cobertura mínima, de modo a não se ter impacto na superfície (que sofreria grandes perturbações usando método de escavação a céu aberto). Com o NATM, recursos atualmente disponíveis permitem escavar qualquer tipo de solo com segurança, como mostra a figura 2, na página seguinte.



Foto 12 - Perfuratriz tipo "Jumbo" automática, usada em variante do Túnel de Graz, Áustria, 2001 (Sauer, 2003)

Princípios de projeto do NATM

Solos apresentam tempo de autossuporte limitado quando escavados. Este fato leva às mais importantes regras e requisitos do NATM:

- A seção transversal de escavação deve sempre ter uma forma ovalada, ou o mais próxima possível da forma circular.
- A instalação imediata e contínua de suporte no perímetro da escavação (e, se necessário, na face também) é um fator significativo para minimizar a movimentação do solo circundante e garantir a estabilidade da frente de escavação.
- É também essencial, sob o aspecto estrutural, fechar o anel de revestimento (o arco invertido, em concreto projetado) o mais rápido possível, até uma distância máxima de 1 (hum) diâmetro do túnel, atrás da face de avanço da escavação. Para condições desfavoráveis do maciço sendo escavado, esta distância pode e deve ser reduzida, a critério do Projetista e do ATO (Acompanhamento Técnico de Obra).

O NATM é um método observacional e, conseqüentemente, a monitoração (medição *in-situ*) da deformação no maciço, e das tensões no revestimento inicial (concreto projetado), é essencial para verificação da adequação do suporte e da estabilidade do maciço.

A EVOLUÇÃO DOS PROJETOS (DAS REGRAS DE BOLSO À MODELAGEM NUMÉRICA)

No século 19, o Projeto de Túneis era realizado de forma 100% empírica, por tentativa e erro. Existiam na época os métodos Belga, Alemão e Austríaco Antigo de escavação, entre outros. Desta época, destaca-se o primeiro túnel em shield, projetado pelo

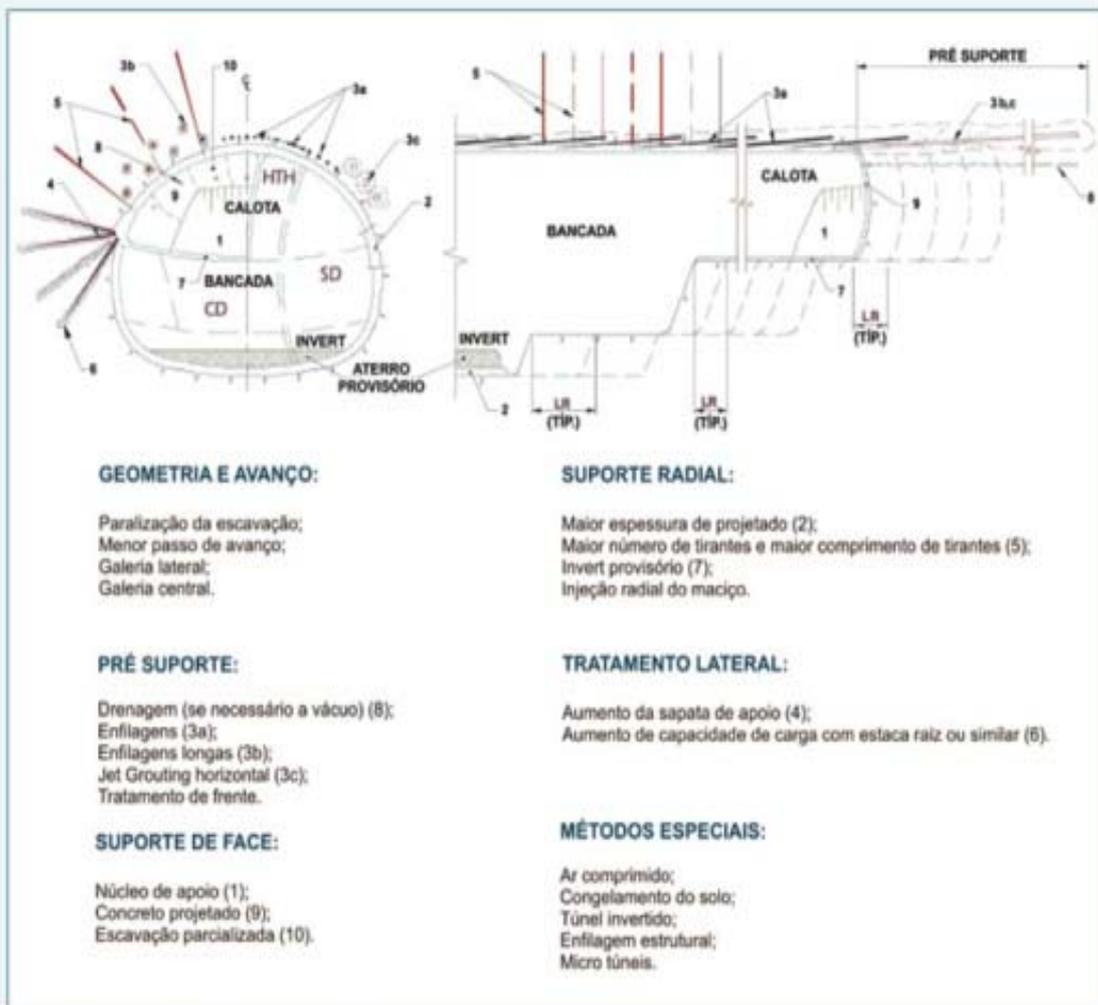


Figura 2 – Recursos do NATM (Sauer, 2003)

engenheiro inglês Brunel. Trata-se do túnel sob o rio Tamisa, que levou 25 anos na sua execução (!), utilizando um shield retangular de madeira para escavar cerca de 400 m na argila rija de Londres.

No início do século 20, surgem os primeiros shields modernos, com anel de ferro fundido, e os primeiros túneis imersos. Na década de 1950, o prof. Rabcewicz inaugura o NATM – Novo Método Austríaco, tirando partido do alívio de tensões na escavação e da resistência do maciço rochoso. Os Túneis pelo NATM resultam em revestimentos mais leves, escavação mais rápida, e são mais econômicos e flexíveis.

Os métodos de análise da época de Rabcewicz são teóricos e empíricos,

usando o Método da Convergência – Confinamento (que considera Deformação Unidimensional, Radial, do Maciço Rochoso).

Na década de 1960, surgem as primeiras análises pelo MEF (Método dos Elementos Finitos), permitindo calcular com maior precisão deslocamentos do maciço, recalques, esforços no revestimento, estabilidade da escavação, etc.

Na década de 1970, as análises/modelagens numéricas se disseminam por vários métodos numéricos (elementos finitos – MEF – programa Staub; elementos de fronteira – programa Examine; diferenças finitas – programa FLAC, elementos distintos – programa UDEC; etc.).

Na década de 1980, a modelagem numérica passa a ser utilizada rotineiramente no projeto de obras subterrâneas de porte, como as Estações Brigadeiro e Trianon – projetadas para a Linha Paulista do Metrô de SP.

Na década de 1990, com os microcomputadores, os programas migram para computadores de mesa, tornando mais rápido, barato e fácil realizar a modelagem numérica de obras subterrâneas como túneis e estações de Metrô, para uma diversidade de condições, levando a projetos mais econômicos e, teoricamente, mais seguros.

A seguir, alguns exemplos de modelagens numéricas realizadas para os túneis do Rodoanel, Elo Oeste, em São Paulo, utilizando o programa FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua).

MODELAGEM NUMÉRICA – RODOANEL

Na análise do Túnel 1 do Rodoanel de São Paulo, Elo Oeste, foram formulados modelos matemáticos pelo programa FLAC, do Itasca Consulting Group. Foram elaborados modelos para várias seções do Túnel 1, com parâmetros estabelecidos de acordo com a compartimentação geológico-geomecânica do Maciço Rochoso. Foram estudadas a seção de transição solo-rocha e seção em rocha, presente nos emboques do túnel, e mais duas seções em rocha ao longo do túnel (Kochen & Castro, 2004).

Para a modelagem numérica do Túnel 1, foi utilizado o programa de diferenças finitas FLAC, que permite analisar obras geotécnicas com grande precisão e modelar fases de escavação e revestimento, comportamento não-linear dos materiais (plastificação), comportamento não-linear do maciço (grandes deslocamentos, etc.).

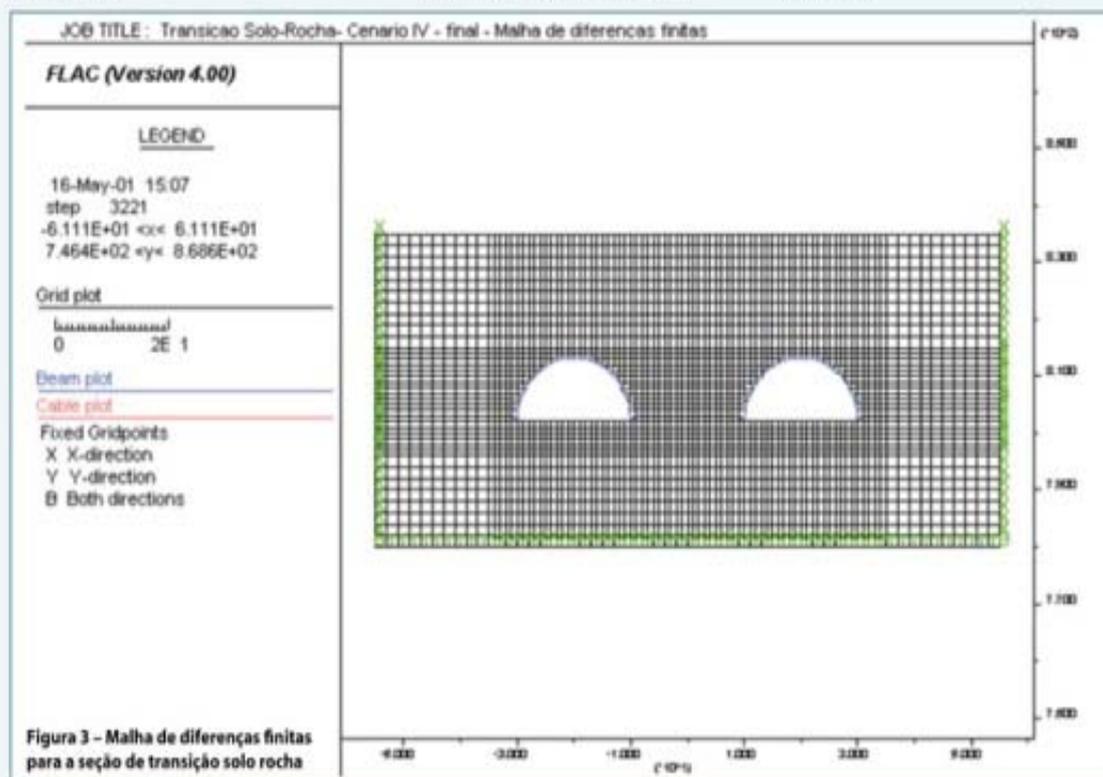
Foram considerados quatro cenários para as solicitações no revestimento secundário:

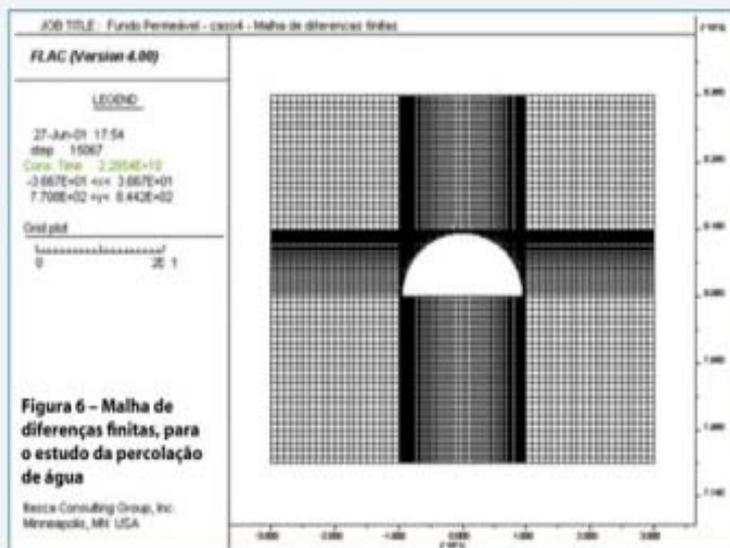
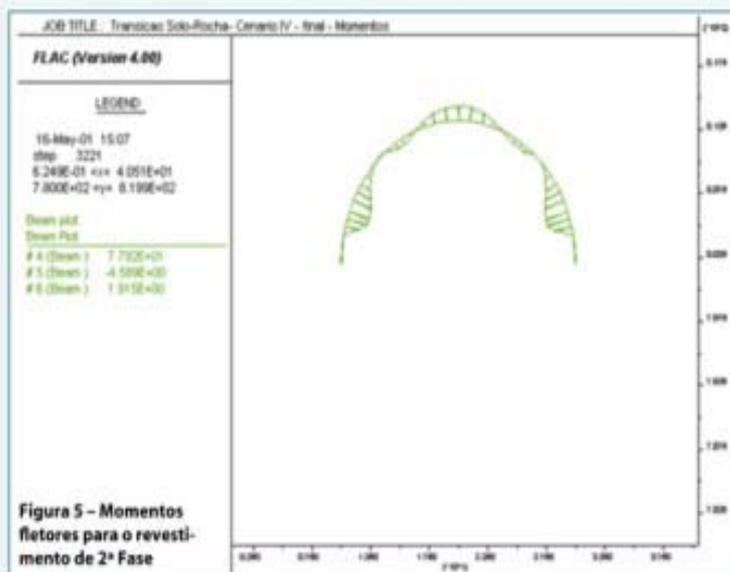
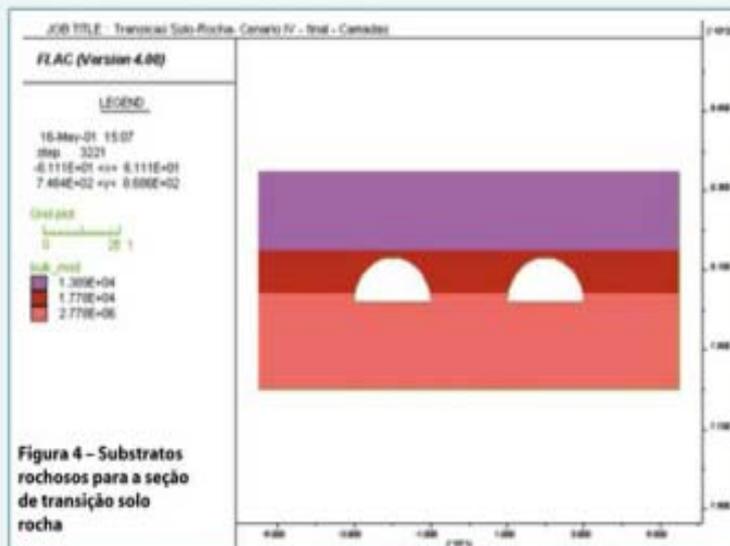
- Cenário I (favorável ao revestimento de 2ª Fase) – alívio de 50% das tensões iniciais na escavação, alívio de 30% na instalação do revestimento de 1ª Fase e alívio dos 20% finais (por efeito de deformação lenta do maciço) na instalação do revestimento de 2ª Fase, atuando solidariamente ao revestimento de 1ª Fase com espessura integral.
- Cenário II (neutro para o revestimento de 2ª Fase) – alívio de 30% das tensões iniciais na escavação, alívio de 20% na instalação do primário e alívio dos 50% finais (por efeito de deformação lenta do maciço) na instalação do revestimento de 2ª Fase, atuando solidariamente ao revestimento de 1ª Fase com espessura integral.
- Cenário III (desfavorável ao revestimento de 2ª Fase) – alívio de 0% das tensões iniciais na escavação, alívio de 30% na instalação do primário e alívio dos 70% finais (por efeito de deformação lenta do maciço) na instalação do revestimento de 2ª Fase, atuando solidariamente ao revestimento de 1ª Fase com espessura integral.
- Cenário IV (extremo para o revestimento de 2ª Fase) – alívio de 0% das tensões iniciais na escavação, e alívio dos 100% finais (por efeito de deformação lenta do maciço) na instalação do revestimento de 1ª Fase e 2ª Fase simultaneamente, atuando solidariamente ao revestimento de 1ª Fase com espessura integral.

O Cenário IV se revelou o mais desfavorável para o revestimento de 2ª Fase. Para efeito de dimensionamento, foi considerado o cenário IV nos Emboques. Na análise dos trechos em rocha, no interior do túnel, foram considerados apenas os Cenários I e II. Isto porque o passo de avanço da escavação é muito elevado (cerca de 4 metros), possibilitando o alívio de tensões iniciais na escavação. Ocorrendo esse alívio, não é razoável considerar os cenários III e IV.

Resultados da análise

A seguir, nas figuras 3 a 5, apresentamos um exemplo dos diagramas gerados pela modelagem numérica pelo FLAC.





ESTUDO DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO REVESTIMENTO

Para verificar se a espessura do revestimento calculado satisfaz a condição de estanqueidade foi realizado um estudo de percolação de água no revestimento dos túneis. Isso foi feito através de uma modelagem numérica com a utilização do programa FLAC. Foi criado um modelo representativo da seção do túnel, com geometria e cobertura próximas da situação real. Foi considerado revestimento de concreto para o túnel, e maciço saturado no entorno do mesmo.

Para o concreto projetado foi adotado coeficiente de permeabilidade igual a $1,0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, valor esse considerado médio segundo estudos de retroanálise de infiltrações em vários túneis.

A seguir serão apresentados os diagramas gerados pela modelagem numérica pelo FLAC.

Para os parâmetros apresentados, a vazão máxima no revestimento do túnel é igual a $4,6 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$, ou seja, 0,81 litros / dia / m^2 . Essa vazão é aceitável para o revestimento do túnel, uma vez que não acarretaria infiltrações excessivas ou ocorrência de gotejamentos de água.

IDENTIFICAÇÃO E GERENCIAMENTO DE RISCOS NAS OBRAS SUBTERRÂNEAS

Obras subterrâneas apresentam maior risco de imprevistos e acidentes do que obras a céu aberto, pela variabilidade inerente às formações geológicas a serem atravessadas e os desvios construtivos possíveis em relação ao que é especificado e projetado. O risco, em qualquer empreendimento de Engenharia, é composto de três elementos: Probabilidade de Ocorrência, Escolha e Consequência. Para mitigar riscos, como os inerentes a execução de obras subterrâneas de túneis, deve-se implantar um conjunto de controles que minimizem (ou

mitiguem) as chances de o empreendimento ser afetado pelo evento de risco, caso ele ocorra (Kochen, 2009).

Para um empreendimento bem sucedido, do ponto de vista de riscos em obras subterrâneas (ou seja, realizar a obra no prazo e no cronograma previstos, sem ocorrência de acidentes de porte significativo), é necessário se ter os seguintes planos e processos, antes do início da obra:

- Plano e estratégia de gerenciamento de riscos
- Processo de identificação dos riscos
- Processo de qualificação dos riscos
- Processo de quantificação dos riscos
- Processo de monitoramento e controle dos riscos

Em todas estas fases, e desde o início do projeto de obras subterrâneas, é necessário introduzir os conceitos de Gerenciamento de Riscos, através de sistemas de controle adequados, para evitar nível de risco elevado na construção e operação do empreendimento.

Toda esta sistemática é consolidada em um "Plano de Gerenciamento de Riscos" para as obras subterrâneas do empreendimento, que inclui uma

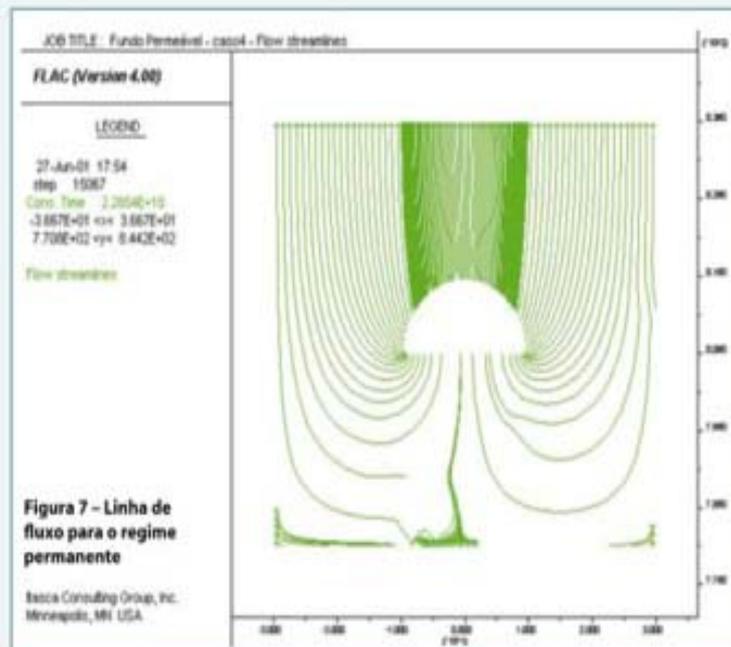


Figura 7 - Linha de fluxo para o regime permanente

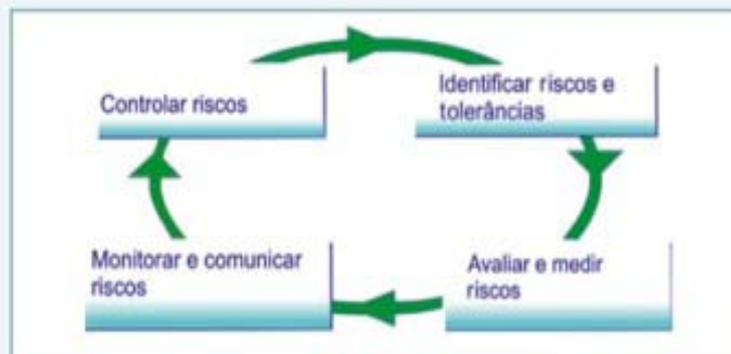


Figura 8 - Atividades do Plano de Gerenciamento de Riscos de obras subterrâneas

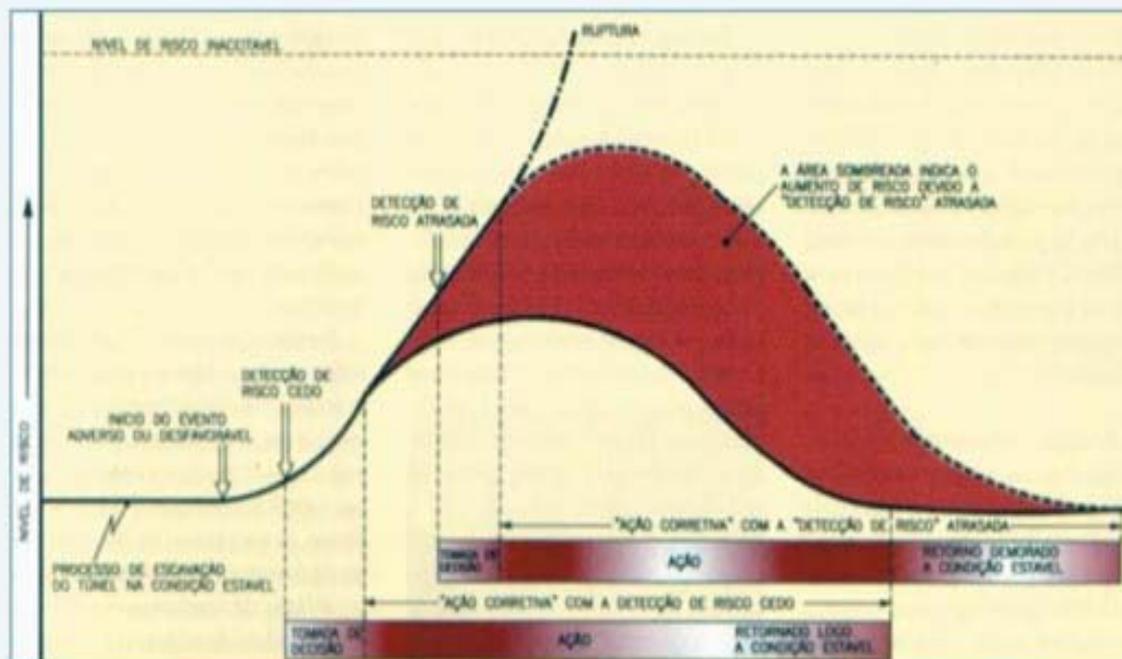


Figura 9 - Procedimentos de Detecção de Risco e Ação Corretiva para Gerenciamento de Riscos em Túneis

sequência obrigatória de atividades, representada na figura 8.

O Plano de Gerenciamento de Riscos é essencial, nos dias de hoje, para reduzir riscos em obras subterrâneas. Casos de gestão inadequada de riscos em obras subterrâneas não são mais aceitáveis pelos padrões atuais.

OBJETIVOS E RESULTADOS DE PROCEDIMENTO DE GERENCIAMENTO DE RISCOS

É necessário, em cada empreendimento de obra subterrânea, estabelecer padrões mínimos de avaliação de riscos e procedimentos de gerenciamento de riscos. Para isto, deve-se definir claramente as responsabilidades das partes envolvidas, para reduzir as probabilidades de perdas.

Os procedimentos de Gerenciamento de Riscos em obras subterrâneas devem envolver as seguintes etapas de atividades:

- "Detecção de risco" e "Ação corretiva"
- Recomendações para incremento da segurança
- Complementação de informações de ATO (Acompanhamento Técnico de Obra)
- Lista de verificação ("check list") de fatores de risco.

O procedimento de Detecção de Risco e Ação Corretiva é ilustrado pela figura 9, que mostra que, ocorrendo o evento adverso ou desfavorável na construção do túnel, o incremento de risco deve ser avaliado e tratado com medidas mitigadoras o mais rapidamente possível, antes que o risco cresça e saia fora do controle (causando um acidente, colapso, etc.).

A etapa onde é possível se obter a maior redução no nível de risco da obra subterrânea é justamente no

Projeto (fase pré-construção), o que nem sempre é compreendido e reconhecido pelos proprietários e construtores de obras subterrâneas.

CONCLUSÕES – O FUTURO DOS TÚNEIS NA GEOTECNIA

Com a evolução recente das técnicas de projeto, construção e monitoração de túneis, tornou-se possível realizar obras subterrâneas em grande número de locais que, anteriormente, em decorrência de condições geológico-geotécnicas ou de interferências urbanas, requeriam a utilização de outros métodos, como valas a céu aberto, linhas em superfície, ou em elevando, causando grandes distúrbios e elevados impactos na construção, principalmente em regiões urbanas.

Os próximos anos irão permitir aos cidadãos brasileiros usufruir de grande número de obras subterrâneas de infraestrutura, como metrô, linhas férreas, sistemas de saneamento, dutos e empreendimentos assemelhados, que serão construídos sem interferir com o meio urbano. De forma rápida e segura, proporcionando significativa melhoria na qualidade de vida de todos nós.

LEITURAS COMPLEMENTARES

"NATM and Its Toolbox", Gerhard Sauer, Earth Retention Systems 2003, Nova York: A Joint Conference, ASCE Metropolitan Section Geotechnical Group, The Deep Foundations Institute, and ADSC: The International Association of Foundation Drilling (New York City, May 6 & 7, 2003).

"NATM for Tunnels in Soft Ground, – Design and Practice Guide", ICE – The Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, Londres, Inglaterra, 1996.

"Segurança, Colapso e Ruptura de Túneis Urbanos em NATM", Francisco Ribeiro e Roberto Kochen, Revista Engenharia no. 540, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP, 2000 (<http://www.geocompany.com.br/ftp/Artigo8.pdf>).

"The Risk to Third Parties from Bored Tunnelling in Soft Ground", W. S. Atkins, Health and Safety Executive – HSE, Research Report 453, Londres, Inglaterra, 2006.

"Túneis do Brasil", livro publicado pelo CBT – Comitê Brasileiro de Túneis, São Paulo, Brasil, 2006.

"Sucessos e Acidentes na Engenharia", Roberto Kochen, Revista Engenharia no. 585, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP, 2008 (<http://www.geocompany.com.br/ftp/sucessos2008.pdf>).

"Gerenciamento de Riscos em Obras Subterrâneas de Engenharia", Roberto Kochen, Revista Engenharia no. 595, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP, 2008 (<http://www.geocompany.com.br/ftp/gros.pdf>).

"Revestimento de 2ª Fase de Túnel com base no Mapeamento Geológico durante a Escavação", Roberto Kochen e Gerson Rodrigues de Castro, Revista Engenharia no. 561, Instituto de Engenharia, São Paulo, SP, 2004 (<http://www.geocompany.com.br/ftp/Artigo11.pdf>).

Newsletter



Receba as principais notícias do setor de construção civil atualizadas diariamente.

CADASTRE-SE GRATUITAMENTE

www.revistafundacoes.com.br