






Túneis no Brasil pelo Método Austríaco

Prof. Dr. Roberto Kochen – Diretor de Infraestrutura do Instituto de Engenharia e Diretor Técnico da GeoCompany – Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente kochen@geocompany.com.br

MAIO/2014 www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

1



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 escavado pelo ser humano data do século VI AC, na ilha grega de Samos, escavado em rocha para adução de água.

Na década de 1950, o Prof. Rabcewicz introduziu os conceitos básicos e a metodologia do NATM (New Austrian Tunnelling Method), viabilizado tecnicamente pelo advento do concreto projetado.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

2

TÚNEIS NO BRASIL

Como exemplo de linha metroriária totalmente subterrânea pelo NATM, pode-se citar, entre outros casos, a Linha 2 (Paulista) do Metrô São Paulo, em particular as Estações Brigadeiro e Trianon, construídas sob a Av. Paulista, com baixíssima cobertura de solo (apenas 4 metros), sem que o tráfego de veículos precisasse ser interrompido por 1 único dia sequer, durante a construção.

A Foto 1 mostra uma perspectiva das Estações Brigadeiro e Trianon, ilustrando a sua disposição tridimensional.

www.geocompany.com.br
 +55 11 2110-7211 a 7214

3








Foto 1 – Perspectiva das Estações Brigadeiro e Trianon (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
 +55 11 2110-7211 a 7214

4

A Foto 2 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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

5







Foto 2 – Vista do túnel de acesso à calota superior da Estação Brigadeiro durante a construção (CBT, 2006).

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

6



Nesta mesma linha, foram construídas com igual sucesso a Estação Consolação (Foto 3), Estação Vila Madalena (Foto 4), e na Linha 1 (Norte - Sul) do Metrô São Paulo, a Estação Jardim São Paulo (Foto 5).

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

7



Foto 3 – Vista do Interior da Estação Consolação durante a escavação (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

8



Foto 4 – Vista do Interior da Estação Vila Madalena durante a escavação (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

9



 



Foto 5 – Vista do Interior da Estação Jardim São Paulo durante a escavação (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214



10

Da mesma forma, pode-se citar, na Linha 1 do Metrô de Salvador, a Estação Campo da Pólvora. A Foto 6 mostra o poço de acesso, duplo, escavado na praça de mesmo nome em Salvador, e a Foto 7 mostra a vista dos emboques dos túneis no interior do poço de acesso da Estação Campo da Pólvora.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

11




Foto 6 – Poço de Acesso Duplo na Estação Campo da Pólvora, Metrô de Salvador (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

12










Foto 7 – Vista dos Emboques dos Túneis no Interior do Poço de Acesso, Estação Campo da Pólvora (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

13






Já no Metrô de Brasília, DF, foram construídas 8 estações subterrâneas na Asa Sul, inclusive com passagens por fundações profundas pelo interior do túnel.

A Foto 8 mostra uma vista de uma das estações já escavadas, com o emboque do túnel sob a Asa Sul em andamento.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

14



A Foto 9 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 10 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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214



15



Foto 8 – Vista de Estação na Asa Sul, com emboque do túnel já escavado, Metrô DF (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

16




Foto 9 – Túnel Via Dupla com Revestimento Secundário já acabado (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

17


 



Foto 10 – Passagem do Túnel de Via do Metrô DF sob estrutura com fundação profunda (CBT, 2006)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

18




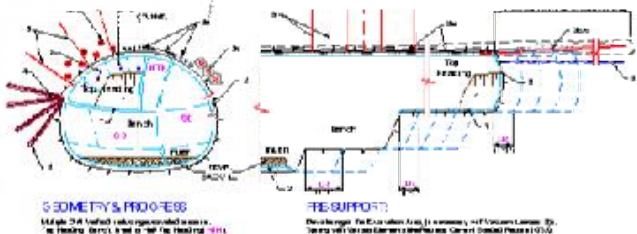
No **NATM**, há um grande número de recursos de projeto, construção e tratamento do maciço que permite a escavação do túnel em praticamente qualquer *condição de solo* (Fig. 5), e através de qualquer obstrução, incluindo fundações profundas.

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 Fig. 5

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

19

GEOMETRY & PROCESS
 Multiple 2-D or 3-D profiles can be generated in any direction. The resulting profiles are used to create the tunnel. The profiles are used to create the tunnel. The profiles are used to create the tunnel.

FACE SUPPORT
 The face of the tunnel is supported by a variety of methods. The face of the tunnel is supported by a variety of methods. The face of the tunnel is supported by a variety of methods.

ROCK WALL IMPROVEMENT
 The rock wall of the tunnel is improved by a variety of methods. The rock wall of the tunnel is improved by a variety of methods. The rock wall of the tunnel is improved by a variety of methods.

ANNUALS SUPPORT
 The annual support of the tunnel is provided by a variety of methods. The annual support of the tunnel is provided by a variety of methods. The annual support of the tunnel is provided by a variety of methods.



OTHER SPECIAL METHODS
 Other special methods are used to support the tunnel. Other special methods are used to support the tunnel. Other special methods are used to support the tunnel.

EMERGENCY INTERVENTIONS
 Emergency interventions are used to support the tunnel. Emergency interventions are used to support the tunnel. Emergency interventions are used to support the tunnel.

Figura 5: Recursos do NATM (Sauer, 2003)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214



20

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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

21



A Evolução dos Projetos (Do Empirismo 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 1º túnel em shield, projetado pelo 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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

22






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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

23

MODELAGEM NUMÉRICA – RODOANEL

Na análise do Túnel 1 do Rodoanel de São Paulo, Elo Oeste, foram formulados modelos matemáticos 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).

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

24

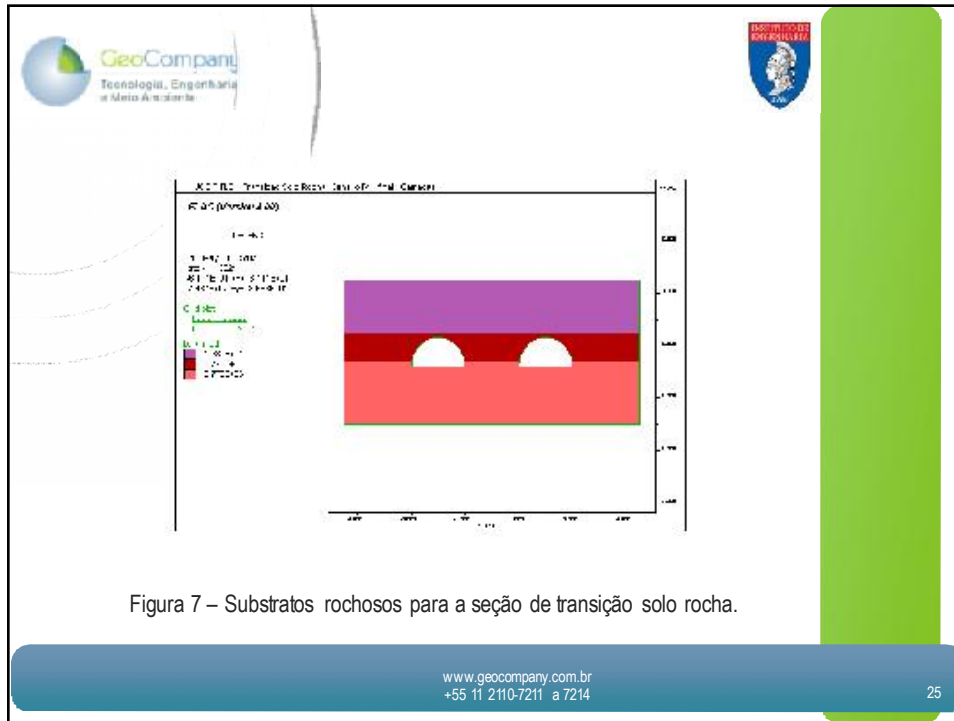


Figura 7 – Substratos rochosos para a seção de transição solo rocha.

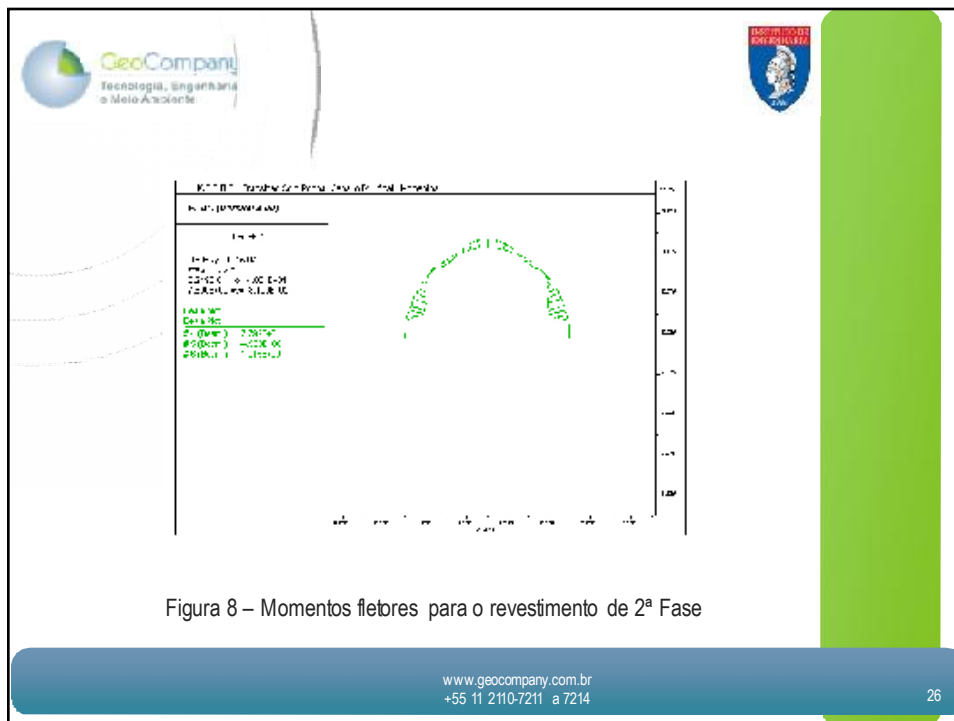




Figura 8 – Momentos fletores para o revestimento de 2ª Fase





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. 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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

27



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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

28

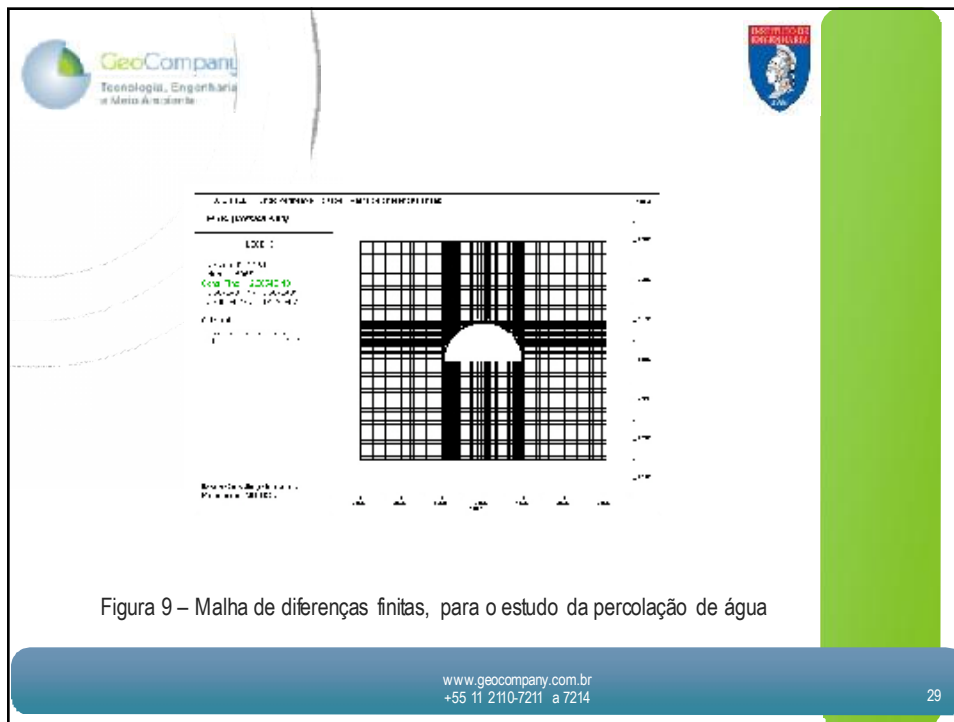


Figura 9 – Malha de diferenças finitas, para o estudo da percolação de água

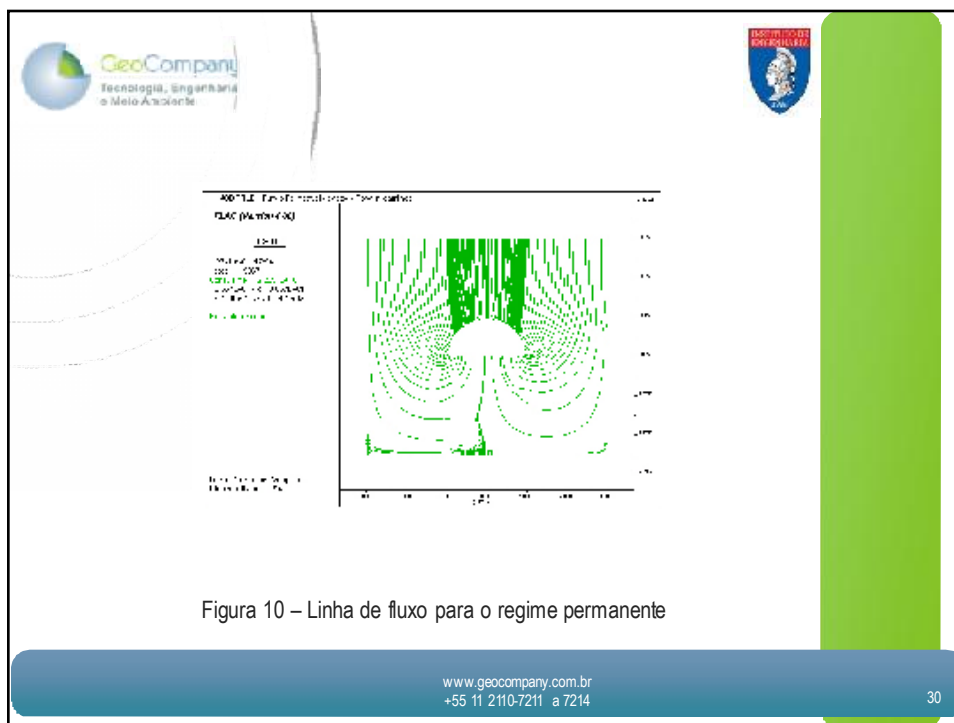






Figura 10 – Linha de fluxo para o regime permanente



Para os parâmetros acima, 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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

31





Conclusões – o Futuro dos Túneis no Brasil

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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

32

Conclusões – o Futuro dos Túneis no Brasil

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.

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

33





Referencias Bibliográficas

- “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, Thomaz 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>).

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

34






Referencias Bibliográficas

- “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>).

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

35

Referencias Bibliográficas

- “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>)

www.geocompany.com.br
+55 11 2110-7211 a 7214

36