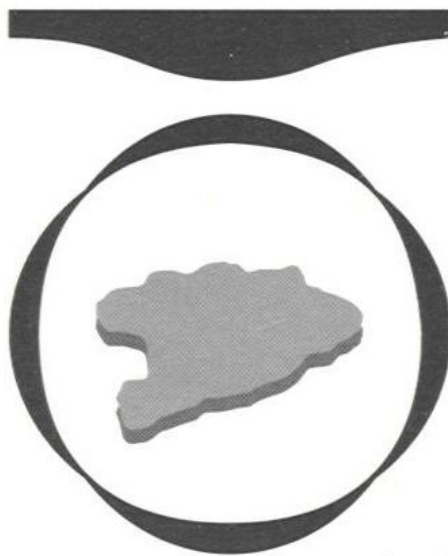


# 1º Encontro Técnico do CBT

## Túneis em Solo

# Comitê Brasileiro de Túneis



*F. F. F. F.*

**Aguabrás**



Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - Núcleo Regional de São Paulo

Comitê Brasileiro de Túneis

## **Tratamento do Solo**

Roberto Kochen

### **RESUMO**

O uso de tratamento de solo e de pré-suporte para túneis construídos em solos moles está se intensificando em regiões urbanas, visando melhorar a condição de estabilidade da escavação e reduzir os recalques induzidos pelo túnel. Este trabalho revê os fundamentos do projeto de pré-suporte e analisa os principais fatores controlando o comportamento de túneis pré-suportados. Apresenta-se uma metodologia geral para projeto de túneis pré-suportados, baseada em relações entre eficiência do tratamento de solo (relativa a recalques) e parâmetros adimensionais. O desempenho de técnicas distintas de pré-suporte pode ser então avaliado, permitindo comparar projetos alternativos. O comportamento previsto e observado de túneis pré-suportados em solos moles, construídos recentemente no Brasil, é apresentado e analisado. Técnicas de tratamento de solo e pré - suporte pouco utilizadas no Brasil até o momento são também apresentadas e discutidas.

### **ABSTRACT**

The use of pre-support in soft ground tunnels is increasing in urban regions with the purpose of improving excavation stability and reducing settlements induced by tunnelling. Pre-support design is reviewed in this paper, and the main factors controlling it's behaviour are analyzed. A dimensionless parameter reflecting the efficiency of pre-support is proposed. A general methodology for the design of tunnel pre-support is presented, based upon relationships between ground treatment efficiency and dimensionless parameters. Hence the performance of some pre-support techniques can be assessed, allowing the comparison of alternative designs. Predicted and observed behavior of pre-supported soft ground tunnels recently built in Brazil are presented. It is concluded that reasonable estimates of pre-suppport efficiency (and of settlements induced by the excavation) can be provided, in cases where good ground control conditions exist during tunnel construction. Pre-support and ground treatment techniques seldom used in Brazil are also presented and discussed.

### **INTRODUÇÃO**

No decorrer dos últimos anos, tem sido observado um aumento acentuado na utilização de túneis construídos em solos moles, principalmente em regiões urbanas. Estes túneis tem sido construídos para atender a uma variedade de finalidades, como transporte (viário, ferroviário e metroviário), adução de água, e como parte de sistemas de coleta de esgotos. A tendência atual consiste no aumento da utilização de escavação parcializada com suporte em concreto projetado, e tratamento de solo empregado seletivamente, onde necessário. Esta alternativa resulta usualmente em menores investimentos iniciais em

equipamento, e maior flexibilidade na construção, quando comparada à alternativa de escavação em couraça. A utilização de parcialização e pré-suporte, no entanto, normalmente resulta em velocidades de avanço mais reduzidas. A utilização de pré - suporte (como, por exemplo, jet grouting e congelamento de solo) tem sido também reportada na construção de poços em solos moles ( Bell et. al., 1991).

A construção de túneis em solos moles em regiões urbanas requer que a estabilidade da escavação seja assegurada, e que os deslocamentos no maciço induzidos pela escavação sejam limitados a valores aceitáveis. Na medida em que os requisitos de segurança e as limitações de recalques admissíveis tornam - se mais rigorosas, a utilização de pré - suporte torna-se viável. Neste trabalho, pré-suporte designa qualquer técnica de tratamento, condicionamento ou modificação do solo, executada antes da escavação do túnel, de modo a incrementar a condição de estabilidade da escavação e reduzir os recalques induzidos (por exemplo: injeções com cimento ou resinas; enfilagens estruturais; enfilagens injetadas; jet grouting; pré-corte mecânico; congelamento; agulhamento da frente e reforço estrutural do terreno, entre outras). Portanto, neste trabalho, pré-suporte e tratamento de solo tem o mesmo significado no que se refere a túneis escavados em solos moles, e ambos os termos serão usados aqui indistintamente e de forma intercambiável. Técnicas de tratamento de solo utilizadas intensamente no Brasil ( como, por exemplo, injeções de cimento, enfilagens estruturais ou injetadas, e rebaixamento do lençol freático) são amplamente dominadas no meio geotécnico nacional, não sendo necessário analisá-las neste relato.

O projeto convencional de pré-suporte baseia-se predominantemente em critérios empíricos, que freqüentemente resultam em espessuras excessivamente elevadas de tratamento de solo. Critérios de projeto consistentes devem idealmente considerar a interação entre o maciço de solo e o sistema de pré - suporte, e serem passíveis de validação por retro-análise de escavações monitoradas.

Este trabalho apresenta casos de túneis em solos moles em que se utilizou pré - suporte.

O comportamento do sistema de pré-suporte é também analisado (em alguns casos), por meio do conceito de eficiência do tratamento de solo. Uma metodologia geral para projeto do sistema de pré - suporte de túneis é apresentada, aplicável a injeções (de cimento ou silicatos), enfilagens (estruturais ou injetadas), jet grouting (vertical ou horizontal), pré-corte mecânico, congelamento de solo, e reforço estrutural do terreno.

Por meio da modelagem do maciço tratado por métodos numéricos (diferenças finitas ou elementos finitos), obtém - se relações entre a eficiência do tratamento de solo e parâmetros adimensionais, possibilitando prever a eficiência de técnicas distintas de pré - suporte, bem como a comparação e otimização de alternativas de tratamento de solo.

## **TRATAMENTO DO SOLO**

A validação da metodologia apresentada é verificada comparando-se resultados previstos e resultados observados (por meio de instrumentação) para túneis em solos moles pré-suportados construídos recentemente no Brasil. Mostra - se que estimativas adequadas para fins de engenharia da eficiência do sistema de pré - suporte (e dos deslocamentos induzidos pela escavação) podem ser feitas, em casos onde a construção do túnel é feita

boas condições de controle do terreno. Técnicas de tratamento de 8010 e pré - suporte pouco empregadas no Brasil são também apresentadas e discutidas.

## **PRÉ-SUPORTE DE TUNEIS EM SOLOS MOLES**

O projeto de sistemas de pré - suporte deve idealmente assegurar condições adequadas de estabilidade na face de escavação, e minimizar os deslocamentos do solo devidos à escavação. Nos últimos anos, diversas técnicas tem sido empregadas para atender estes objetivos, podendo - se destacar enfilagens (estruturais e injetadas), jet grouting (vertical e horizontal), congelamento de 8010, pré - corte mecânico e reforço estrutural do terreno.

Algumas técnicas tem sido progressivamente menos utilizadas, como injeções ( de cimento ou químicas), face ao risco de poluição ambiental, velocidade de execução inferior à obtida com outras técnicas, e necessidade de granulometrias apropriadas para garantir a permeação do maciço pela resina injetada. Outras técnicas ( como por exemplo enfilagens injetadas a alta pressão, provocando o fraturamento hidráulico do maciço; e jet grouting, provocando a formação de colunas de 8010 - cimento) apresentam a vantagem de serem aplicáveis a 8010s com permeabilidade qualquer, em contraposição a técnicas de injeção que requerem a penetração do maciço. Para a técnica de jet-grouting, é necessário distinguir entre 3 variantes possíveis, com características e comportamento distintos (Kochen, 1992) : a) CCP (Cement Churning Pile); b) Jumbo Grout ; c) Column Jet .

A experiência brasileira mostra que colunas de 8010 – cimento formadas com a técnica jet grouting apresentam elevada variabilidade no que se refere a: propriedades mecânicas e de resistência; diâmetros obtidos no campo; e integridade estrutural (continuidade da coluna). Métodos de projeto tradicionais baseiam - se em critérios empíricos, e freqüentemente resultam espessuras de tratamento de 8010 mais elevadas do que necessário, com margem de segurança desconhecida. Da mesma forma, para se obter uma execução confiável de colunas jet-grouting, é necessário fazer colunas piloto no campo, antes da construção do pré - suporte do túnel. A monitoração dos parâmetros de execução, e a medição dos diâmetros de coluna obtidos no campo, permite fazer o ajuste fino dos procedimentos de execução, e adaptá-los para as condições locais do sub8010. Em conseqüência, pode - se obter um nível de qualidade mais elevado para o pré - suporte do túnel (Humes & Kochen, 1991).

Técnicas de tratamento de solo envolvendo injeções químicas (principalmente as que usam resinas especiais, como as utilizadas no Túnel do Canal da Mancha, lado francês - Gouvenot, 1990) para pré - suporte de túneis são também freqüentemente projetadas com base em regras empíricas apenas. Procedimentos empíricos não permitem efetuar comparações entre alternativas de pré - suporte. A otimização da alternativa adotada, em termos da espessura de pré - suporte e de sua resistência, também não é possível com base em regras empíricas apenas. Procedimentos para um projeto adequado do pré - suporte de túneis foram apresentados anteriormente por Gartung et. al. (1979), e Tan & Clough (1980). No entanto, a metodologia apresentada por estes autores limita - se a condições específicas. Conseqüentemente, as regras empíricas para projeto de túneis pré - suportados permaneceram em uso até recentemente.

## EFICIÊNCIA DE TRATAMENTOS DE SOLO

Para se projetar túneis pré - suportados em bases objetivas e científicas, é indicado incluir a eficiência de tratamentos de solo em uma metodologia geral, aplicável a qualquer tipo de pré - suporte. Eficiência, no contexto deste trabalho, é uma função das perdas de solo induzidas pela escavação do túnel. Perda de solo, conforme a definição de Cording & Hansmire (1975), é o volume de solo que cruza o perímetro da escavação. Uma eficiência de 100 % corresponde a perdas de solo nulas, e uma eficiência de 0 % corresponde a uma perdas de solo idênticas às apresentadas por maciços não - tratados.

A eficiência de sistemas de pré - suporte pode ser quantificada usando - se a Equação 1 abaixo:

$$E = ( 1 - V 1 / V 2 ) \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

onde E é a eficiência do pré - suporte ( na faixa de 0 % a 100 % ), V 1 representa a perda de solo para o maciço tratado, e V 2 é a perda de solo para o maciço não tratado.

Solos que apresentam redução de volume ao deformar podem gerar recalques superficiais mesmo com perdas de solo nulas, na medida em que o volume de recalques aumente por efeito do adensamento do maciço (devido a drenagem e outros efeitos). Por este motivo, a eficiência é definida neste trabalho em função das perdas de solo, e não do volume de recalques.

Gartung et. al. (1979) e Tan & Clough (1980) mostraram que tratamentos de solo com configuração geométrica circular ou semi-circular são os mais eficientes. Estes resultados foram confirmados em pesquisas patrocinadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (Negro, 1988), que comparou a eficiência de tratamentos com forma circular e retangular, ambos apresentado o mesmo volume de solo tratado. A retro-análise de túneis pré - suportados, por meio de modelos de elementos: finitos, mostrou que o pré-suporte em forma circular apresentava, para o túnel via dupla analisado, uma eficiência de 60% ao passo que o tratamento com formato retangular realizado acima do teto do túnel apresentava uma eficiência menor ( 30% ) . Para o mesmo túnel metroviário de via dupla, enfilagens injetadas apresentaram uma eficiência de apenas 9% . Embora as enfilagens injetadas, neste túnel, tenham sido executadas segundo uma configuração geométrica semi-circular, sua espessura era reduzida (cerca de 0.05 do raio do túnel), e sua flexibilidade era elevada, resultando em uma eficiência global do tratamento pouco elevada.

## PROJETO DE TUNEIS PRE - SUPORTADOS

Dentro do conhecimento do autor, a única metodologia aplicável a projetos específicos de túneis pré - suportados é a apresentada por Tan & Clough (1980). No entanto, os parâmetros usados por estes autores não são adimensionais, tornando difícil a sua aplicação na prática. Kochen (1991) apresentou uma metodologia alternativa para aplicação em túneis escavados em solos moles, baseada em parâmetros adimensionais, e na eficiência do tratamento, como definido pela Equação 1. Os principais objetivos da metodologia apresentada são :

- a) identificar mecanismos de comportamento de solos tratados;
- b) identificar parâmetros - chave para avaliação da eficiência;
- c) estabelecer uma metodologia de projeto que permita otimizar a espessura e a deformabilidade do solo tratado;

Estes objetivos levaram ao desenvolvimento de uma metodologia de projeto simples e expedita para fins de aplicação prática. Seus principais parâmetros estão representados na Figura 1, onde:  $R$  - raio do túnel;  $H$  - profundidade do eixo;  $E_m$  - módulo de elasticidade do solo natural;  $K$  - relação entre as tensões horizontais e verticais "in situ";  $t$  - espessura do tratamento de solo;  $E_t$  - módulo de elasticidade do solo tratado; e  $E_b$  - módulo de elasticidade do material da bancada. As principais hipóteses desta metodologia foram explicadas detalhadamente em trabalhos anteriores (Kochen, 1991 e 1992), e não há necessidade de repeti-las aqui.

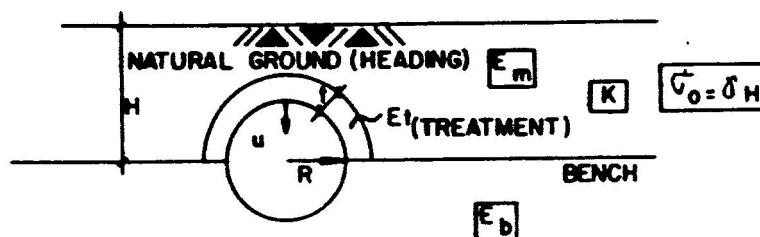


Figura I - Modelagem do Pré Suporte de Túneis em Solos Moles

Com base em hipóteses simplificadoras, é possível agrupar os parâmetros governando o deslocamento vertical do teto do túnel no fator adimensional  $U$ , definido por Einstein & Schwarz (1979). Para uma relação  $t/R$  fixa, o deslocamento adimensional  $U$  passa a ser uma função da rigidez relativa entre o solo tratado e o solo natural ( $E_t/E_m$ ).

Valores numéricos de  $U$  foram computados para faixas usuais, observadas na prática, dos parâmetros  $H/R$ ,  $t/R$ , e  $E_t/E_m$ . Os primeiros dois parâmetros são uma função da geometria do tratamento, da geometria do túnel e de sua profundidade. Com relação a  $E_t/E_m$ , a experiência mostra que este parâmetro varia entre 20 e 120 para tratamentos empregando jet grouting, e para condições de execução observadas em túneis construídos recentemente no estado de São Paulo, Brasil.

As Figuras 2 a 5 mostram o parâmetro adimensional  $U$  em função de  $E_t/E_m$ , para  $H/R$  na faixa de 3.0 a 1.50. Em cada figura, quatro curvas estão representadas (para  $t/R$  na faixa de 0.05 a 0.40). Embora  $U$  seja uma função não-linear de  $H/R$  e  $t/R$ , para fins de aplicação prática pode-se interpolar valores destes parâmetros dentro da faixa de valores representada nas figuras 2 a 5.

Eficiência, como definido pela equação 1, corresponde à comportamento elástico-linear para o solo. Túneis pré-suportados, mesmo sendo rasos, usualmente apresentam comportamento elástico, devido ao fato de que o tratamento de solo aumenta significativamente a resistência do solo e sua rigidez. Para solos não-tratados com baixa

resistência e rigidez, o comportamento do maciço pode ser altamente não-linear, devido ao desenvolvimento de regiões plastificadas na massa de solo. Nestes casos, mesmo tratamentos de solo com baixa resistência e rigidez (como, por exemplo, enfilagens estruturais ou injetadas) podem ser altamente eficientes, se a rigidez do tratamento for suficiente para limitar as deformações do solo ao domínio elástico.

Os resultados apresentados nas figuras 2 a 5 são válidos para material da bancada com rigidez significativamente mais elevada do que a rigidez do solo natural na calota (Figura 1). Uma relação de rigidez  $E_b/E_m$  pouco elevada resulta na ocorrência de deslocamentos adicionais no teto do túnel, induzidos pela deformação da bancada, e conseqüentemente reduzindo a eficiência do pré-suporte. A Figura 6 apresenta o deslocamento adimensional  $U_b$  em função de  $E_b/E_m$  (sendo  $E_b$  o módulo de elasticidade do material da bancada). Para rigidez relativa  $E_b/E_m$  maior que 30, os deslocamentos da bancada são desprezíveis, e podem ser omitidos na avaliação da eficiência do tratamento.

Os resultados apresentados nas figuras 2 a 6 podem ser organizados em uma metodologia de projeto (Kochen, 1991), uma vez conhecidos os seguintes parâmetros: geometria do túnel e tratamento ( $H$ ,  $R$  and  $t$ ); tensão vertical inicial  $p$  no centro do túnel; e o módulo de elasticidade dos materiais da calota, bancada e tratamento ( $E_m$ ,  $E_b$ , and  $E_t$ ). O deslocamento adimensional do teto do túnel pode ser obtido através das figuras 2 a 5, para solo tratado e não-tratado ( $U_0$  e  $U_1$ , respectivamente). Onde o material da bancada for deformável em relação ao solo natural, o deslocamento adimensional do contacto tratamento - bancada pode ser obtido da figura 6 ( $U_2$ ).

A eficiência do pré - suporte pode então ser avaliada pela equação 2 :

$$E = [ 1 - (U_1 + U_2) / U_0 ] \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Se a eficiência do tratamento de solo for inferior ao valor requerido, as suas características podem ser modificadas para aumentar a eficiência (por exemplo, aumentando - se  $t$  ou  $E_t$ ). Se a eficiência for superior ao valor necessário, então o custo do tratamento de solo poderá ser reduzido otimizando - se  $E_t$ .

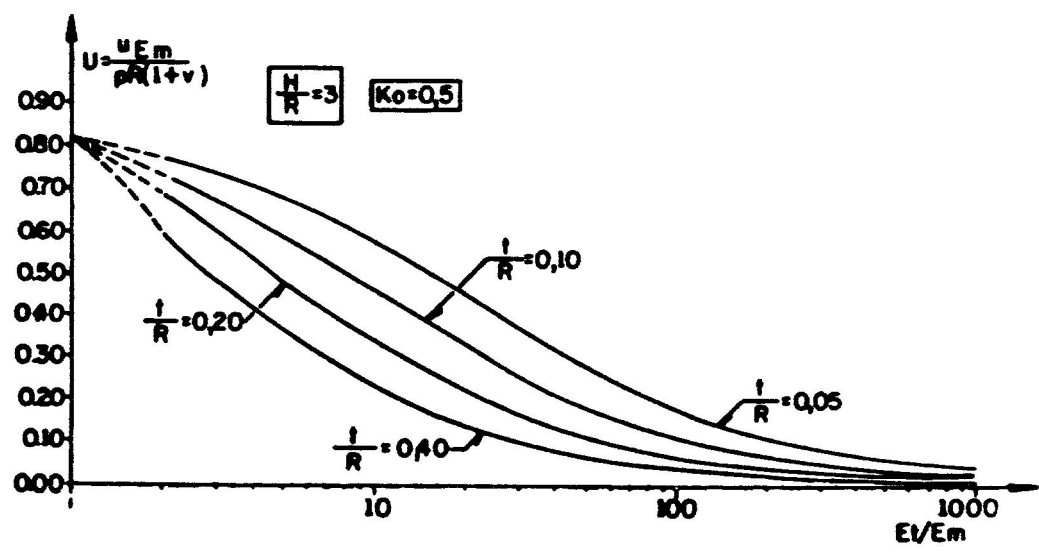


Figura 2 - Parâmetro U em Função de  $E_t/E_m$  ( $H/R = 3.00$ )

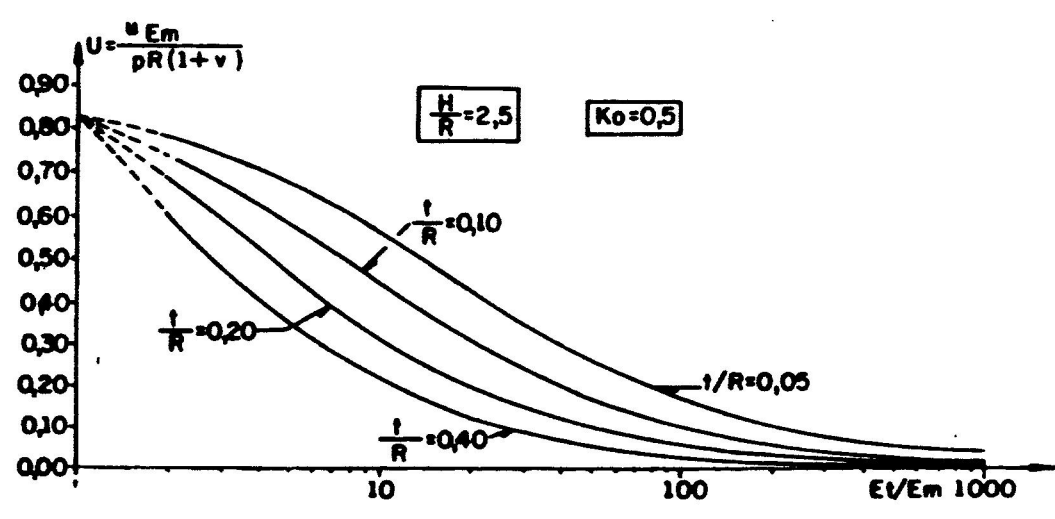


Figura 3 - Parâmetro U em Função de  $E_t/E_m$  ( $H/R = 2.50$ )



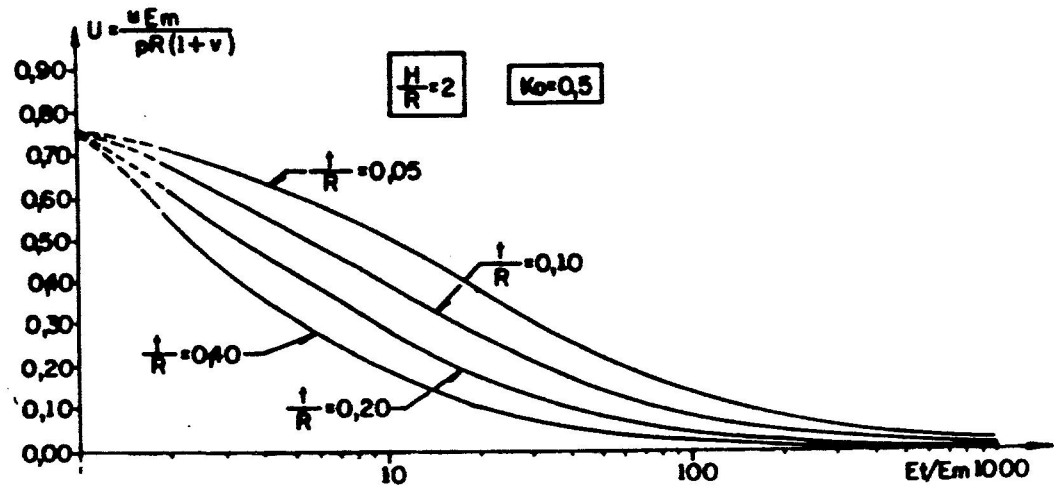


Figura 4 - Parâmetro U em Função de  $E_t/E_m$  ( $H/R = 2.0$ )

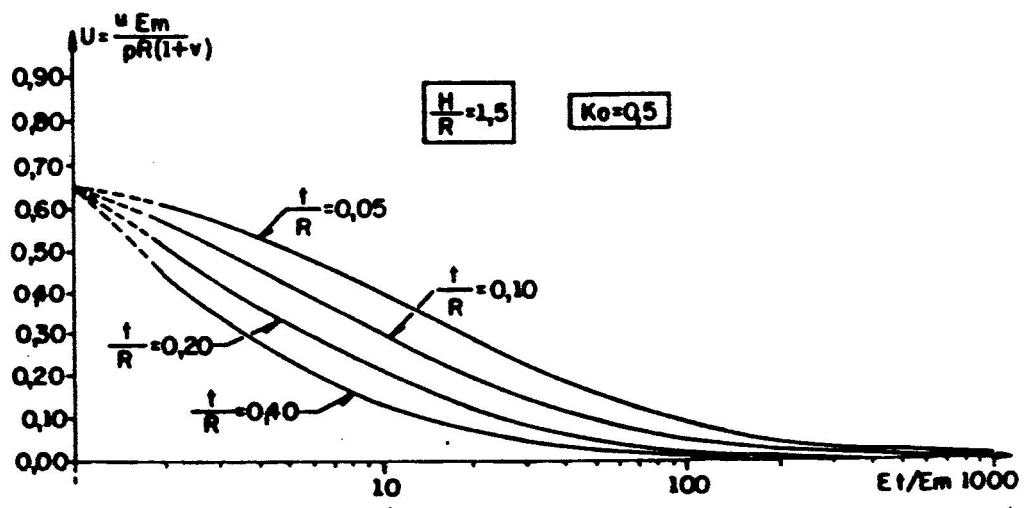


Figura 5 - Parâmetro U em Função de  $E_t/E_m$  ( $H/R = 1.50$ )

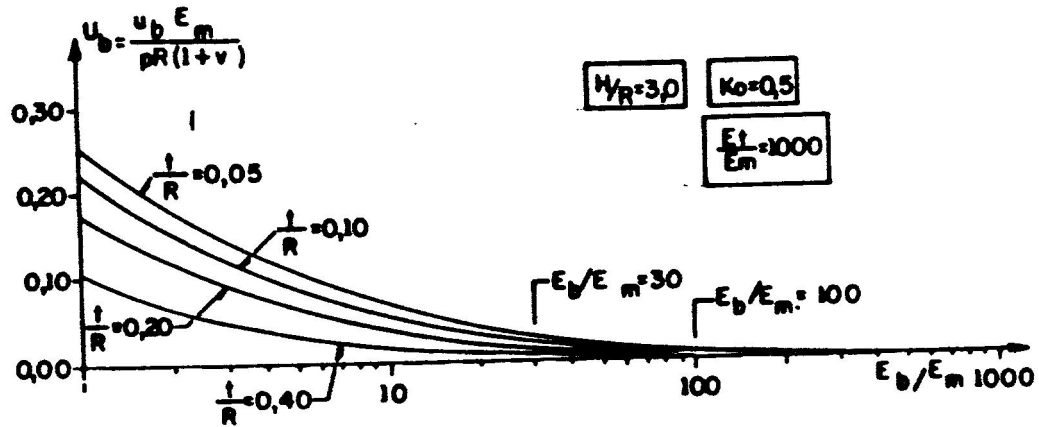


Figura 6 - Deslocamento Adimensional  $U_b$  em Função de  $E_b/E_m$

## O TÚNEL TIETÊ

A figura 7 mostra uma seção longitudinal do túnel Tietê, parte do sistema de coleta de esgotos da Cidade de São Paulo. Este túnel foi escavado com o emprego de uma couraça de frente aberta. O perfil geológico ao longo de seu alinhamento apresentava uma camada de argila mole com resistência não-drenada baixa (SPT entre 2 e 5).

Adotou-se tratamento de solo (colunas CCP) nesta região para aumentar a estabilidade de frente da escavação, e tornar viável a escavação por meio da couraça de frente aberta em uso no restante do túnel. Mais informações sobre este túnel de esgoto podem ser encontradas em Pan & Oliveira (1983).

A figura 8 mostra duas seções típicas de tratamento: na primeira, o pré-suporte foi efetuado nas laterais e no teto do túnel; na segunda, o piso foi também pré-revestido com colunas CCP. A espessura de tratamento no teto do túnel é de 3,00 m, resultando em uma relação espessura - raio ( $t/R$ ) igual a 1,20. Com base em ensaios de laboratório realizados em amostras extraídas destas colunas de solo - cimento, e com o emprego de correlações empíricas, foram efetuadas estimativas do módulo de elasticidade para o solo e para as colunas CCP.

O poder de pré-suporte para este túnel poderia ter sido feito, alternativamente, estimando-se a espessura de tratamento necessária para atingir um valor especificado de eficiência. Neste exemplo, adota-se um valor mínimo de eficiência de 80%.

Para uma espessura de pré-suporte de 1 (hum) metro, obtêm-se os seguintes valores de eficiência para este túnel de esgoto:

- Seção I:  $E_t/E_m = 20$

$U_0 = 0,80$ ;  $U_1 = 0,13$ ;  $U_2 = 0,00$  .....  $E = 84\%$

- Seção II : Et /Em = 75

U<sub>0</sub> = 0.80; U<sub>1</sub> = 0.05; U<sub>2</sub> = 0.00 ..... E= 94 %

Os resultados acima mostram que uma espessura de pré - suporte de 1 (hum) metro teria sido suficiente para se obter um valor de eficiência, para este túnel, superior ao valor mínimo adotado.

## **OS TUNEIS VIÁRIOS DE CAMPINAS**

A figura 9 mostra a seção transversal dos túneis viários de Campinas. Tratam - se de túneis viários paralelos, com 400 m de comprimento cada, construídos na região central de Campinas, e passando sob diversas edificações sensíveis à recalques, e sob linhas ferroviárias ativas. Sua seção transversal foi projetada para conter três vias de tráfego por túnel, com uma área de escavação elevada (125 m<sup>2</sup>), e seção aproximadamente elíptica, com 14 m de largura e 11 m de altura. O perfil geológico, na região da bancada, era constituído predominantemente por areia média fofa a pouco compacta. O nível d'água encontrava - se próximo ao teto do túnel em 60% da sua extensão, e cerca de 2 m abaixo do teto nos 40 % restantes.

A execução dos túneis viários de Campinas foi iniciada no emboque sul, após o tratamento deste emboque com colunas Jumbo Grout verticais. A cobertura de era reduzida (4 metros). A seqüência de execução compreendia a escavação da calota; instalação do revestimento primário ( cambotas metálicas e concreto projetado ); escavação da bancada ( em areia medianamente compacta a compacta, e solo de alteração de arenito ); instalação do revestimento primário da bancada; e revestimento final ( concreto moldado no local). A parte central destes túneis foi pré - suportada com colunas de jet grouting horizontal, executadas por dentro da calota em uma linha simples com 0.60 m de espessura. No emboque norte, a escavação da calota passou sob um pátio ferroviário em operação, com uma cobertura de solo de 3.50 metros, e com restrições rigorosas quanto aos recalques induzidos pelo túnel. A escavação neste emboque foi feita com sucesso, mediante o emprego de colunas jet grouting horizontais, executadas em linha dupla com espessura de 1.20 metros.

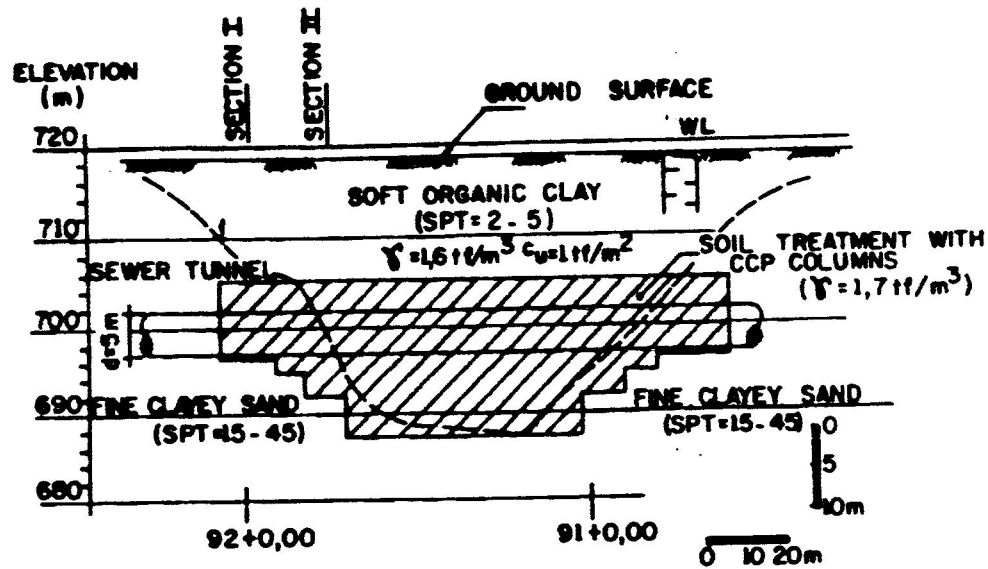


Figura 7 - Seção Longitudinal do Túnel Tietê (São Paulo)

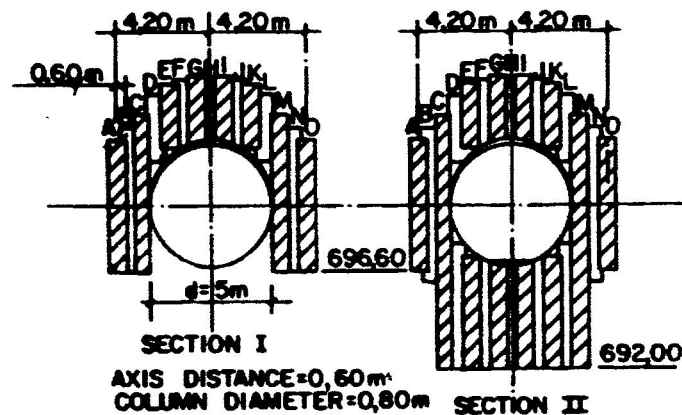


Figura 8 - Túnel Tietê : Geometria Típica do Pré - Suporte

A metodologia apresentada anteriormente neste trabalho permite estimar o deslocamento adimensional  $U$ , e o deslocamento do teto do túnel (sendo conhecidos os módulos de elasticidade do solo natural, do tratamento de solo e do material da bancada). Os recalques superficiais podem ser obtidos por extrapolação dos deslocamentos do teto usando - se correlações empíricas. Para a seção mais profunda do túnel, efetuou - se uma previsão de recalques, considerando - se uma cobertura de solo de 17 metros. O perfil do

subsolo nesta seção está representado na figura 10. Os correspondentes parâmetros adimensionais de geometria e rigidez nesta seção são os seguintes:

$$- H/R = 2.0; t/R = 0.05; E_t/E_m = 14; E_b/E_m = 4.$$

O deslocamento do teto pode ser avaliado usando - se a equação 3 :

$$U_{roof} = (U_1 + U_2) \cdot p \cdot R(1 + \nu) / j E_m \dots\dots\dots(3)$$

O recalque superficial foi estimado extrapolando-se o deslocamento do teto para a superfície usando-se a correlação empírica de Atkinson & Potts , com o parâmetro alpha igual a 0.13, conforme proposto por Eisenstein & Negro (1985) para solos tropicais residuais. O recalque previsto foi de 5.5 cm, apresentando boa concordância com o valor observado de 6.3 cm. Outras previsões, efetuadas para diferentes seções destes túneis, resultaram em valores de recalque 10 % a 30 % inferiores aos valores observados. Os valores de recalques subestimados devem - se provavelmente ao fato de que o controle das perdas de solo durante a escavação não foi adequado, provocando um afastamento da resposta do maciço em relação a comportamento elástico-linear. Ocorreram perdas de solo adicionais (em acréscimo aquelas geradas pela deformação elástica do pré-suporte), como resultado de a calota ter sido escavada em material arenoso fofo a pouco compacto, sob o nível d'água, e com um sistema de pré - suporte muito flexível (colunas jet grouting horizontais formando um arco de solo tratado com 60 cm de espessura) . Para seções de escavação contendo uma proporção mais elevada de solos argilosos na calota, obtiveram-se previsões mais acuradas. Em solos argilosos, o volume de água percolando através dos vazios do pré - suporte (provocando carreamento de partículas e aumentando as perdas de solo) foi reduzido ou nulo, e conseqüentemente a escavação da calota se deu no regime elástico.

Aplicações desta metodologia para previsão de recalques levam à obtenção do limite inferior de recalques, correspondente ao comportamento elástico para o maciço circundando o túnel. Portanto, estas aplicações podem conduzir a bons resultados na prática da engenharia, quando combinadas com discernimento adequado.

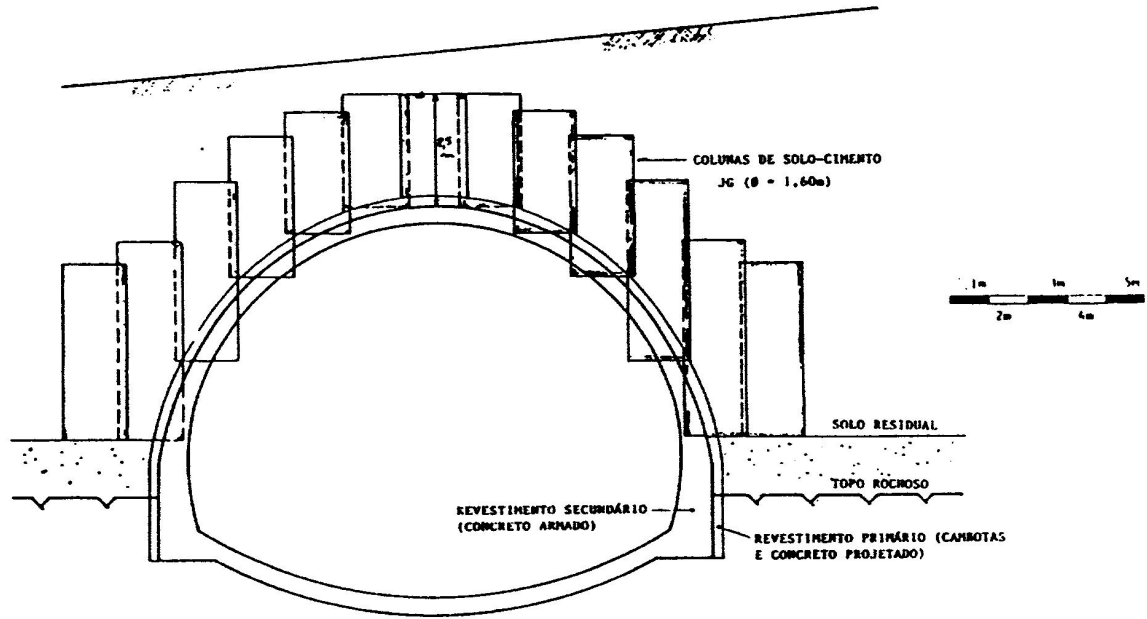


Figura 9 - Seção Transversal dos Túneis Viários de Campinas

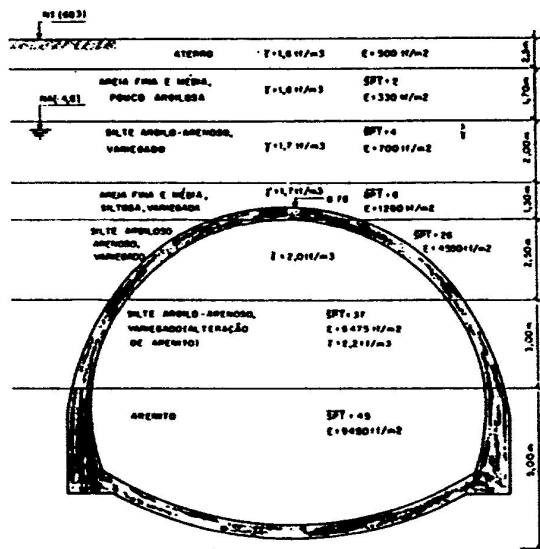


Figura 10 - Perfil Geotécnico na Seção Mais Profunda (Túneis Viários de Campinas)

### TUNEL VIÁRIOS DE GRANDE SEÇÃO TRANSVERSAL (SAO PAULO)

São Paulo, em decorrência de sua grande população, apresenta forte necessidade de expandir seus sistemas de transporte. Conseqüentemente, diversos túneis tem sido construídos desde 1985 como parte de linhas metroviárias e sistemas viários. Os túneis

viários de grande seção transversal aqui analisados foram projetados como parte da conexão entre duas rodovias de tráfego intenso (Anchieta e Imigrantes), localizadas nos limites da cidade. Cada um destes túneis paralelos tem 740 metros de extensão, com três vias de tráfego cada, e uma seção transversal de grande dimensão, com área de escavação de 125 m<sup>2</sup>. A geometria da seção transversal é a mesma da dos túneis de Campinas descritos anteriormente, com altura de 11 m e largura de 14 m, aproximadamente. A distância entre os eixos dos túneis é de 28 metros.

A construção de ambos os túneis se iniciou no emboque Anchieta, após execução de pré - suporte do solo com colunas Jumbo Grout verticais, em uma cobertura de solo de 4 metros. Estes túneis foram escavados em solos arenosos, saturados e em estado fofo a pouco compacto. A seqüência de execução começou com a escavação de um túnel piloto na região inferior da bancada; seguida pela escavação da calota; instalação do revestimento primário (cambotas metálicas e concreto projetado) da calota; escavação da bancada; instalação do revestimento primário da bancada; e revestimento final (concreto moldado no local). A escavação da calota foi precedida pela execução do pré-suporte. No trecho inicial do túnel, até 30 metros a partir do emboque, foram utilizadas colunas de jet grouting vertical como pré - suporte, seguindo uma configuração geométrica similar à adotada nos túneis de Campinas (e representada na fig. 9). Após o trecho inicial, a escavação da calota prosseguiu empregando pré - suporte formado pela execução de colunas jet grouting horizontais (a partir do interior do túnel), em linha simples, com espessura de 0.60 metros. A figura 11 apresenta uma seção transversal típica da geometria destes túneis.

Os túneis piloto foram executados com uma seção transversal típica de 10 m<sup>2</sup> (3 m de largura, e 3.5 m de altura, aproximadamente). Sua construção tinha por objetivo: confirmar o perfil geológico estabelecido com base em sondagens com espaçamento elevado (provocado pela ausência de acesso pela superfície, em decorrência desta região urbana ser densamente ocupada por edificações); realizar sondagens verticais a partir do interior dos túneis piloto (para coleta de informações precisas sobre as camadas de solo existentes no local); drenagem das camadas arenosas na região da calota dos túneis;

e eventual tratamento destas camadas arenosas por injeções químicas (na eventualidade de a drenagem se revelar ineficiente).

Nesta obra, efetuou - se monitoração com o objetivo de medir recalques induzidos pela execução de colunas jet grouting horizontais e detectar assimetrias no perfil de recalques, devidas à seqüência de execução das colunas.

A figura 12 mostra a seqüência de execução de colunas jet grouting empregadas na obra, e os recalques superficiais observados. O arco de pré - suporte foi executado em 6 fases, com recalques medidos em cada uma das fases. O máximo recalque observado na execução das colunas foi de 5 mm, e o máximo recalque observado nesta seção após escavação da calota foi de 50 mm. Ou seja, os recalques induzidos pela execução do pré-suporte (neste caso, colunas jet grouting horizontais ) atingiram cerca de 10% do recalque total induzido pela escavação do túnel.

O perfil de recalques observado é assimétrico, com recalques maiores concentrados no lado direito da curva. O tratamento do lado esquerdo foi construído antes, e conseqüentemente as colunas do lado direito foram executadas em uma massa de solo já perturbada e amolecida. As fases de execução 5 e 6 foram as responsáveis pelos maiores aumentos de recalque, devido ao fato de conterem um número de colunas maior do que o das fases anteriores ( 6 colunas executadas nas fases 5 e 6, 4 colunas nas fases 2 e 4, 3 colunas nas fases 1 e 3 ). Para a parcela remanescente dos túneis, os recalques induzidos

pela execução do jet grouting foram reduzidos pela adoção de uma seqüência de execução simétrica.

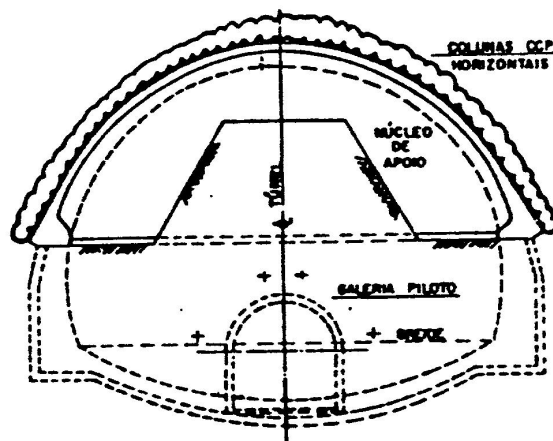


Figura 11 - Seção Pré - Suportada com Jet Grouting Horizontal, e Túnel Piloto Escavado abaixo da Calota ( Túneis Viários de São Paulo )

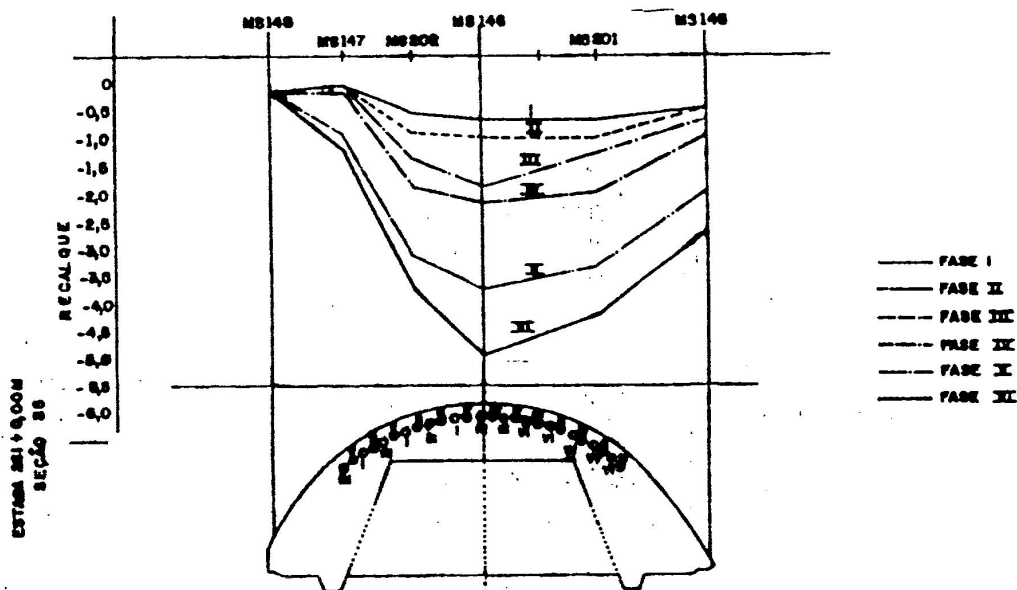


Figura 12 - Fases de Execução e Deslocamentos Monitorados na Superfície ( Seção Pré - Suportada com Jet Grouting Horizontal)



## O USO DE PRÉ - CORTE MECÂNICO

O uso de equipamento para corte mecânico do maciço (referido na literatura como MPTM- Mechanical Pre Cutting Tunnelling Method; Van Walsum – 1992) é particularmente adequado à construção de túneis de grande seção transversal em solo ou rochas brandas (com resistência à compressão simples igualou inferior a 70 MPa). Com a utilização do MPTM, é possível minimizar recalques (em túneis em solo) ou vibrações provocadas pela escavação a fogo (em túneis em rocha), e assim este sistema de pré suporte é indicado principalmente para obras urbanas.

O pré-corte mecânico foi utilizado pela primeira vez nos EUA, em 1950, nas obras do reservatório de Fort Randall, projetadas pelo Corps of Engineers. Simultaneamente, as primeiras máquinas de escavação mecanizada de túneis em rocha (TBM - Tunnel Boring Machine) começaram a ser utilizadas, levando a uma paralisação do desenvolvimento do MPTM na América do Norte. Nos anos setenta, o MPTM foi redescoberto na França, e passou a ser utilizado desde então com sucesso, demonstrando ser um método de escavação de túneis confiável, seguro e econômico. Na França, sua utilização predomina em áreas urbanas localizadas em Paris, Lille, Toulouse e regiões próximas; nas quais a construção de obras subterrâneas deve - se situar dentro de limites rigorosos referentes a recalques máximos induzidos, vibrações e ruído. O MPTM permite, na eventualidade de serem encontradas rochas mais duras do que o previsto, retornar ao método convencional de escavação a fogo sem prejuízo da velocidade de avanço do túnel.

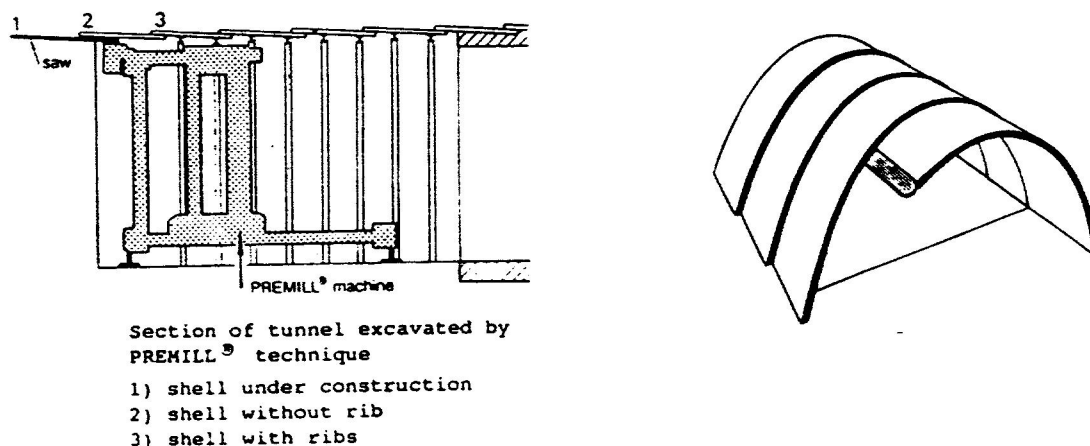
Atualmente, três grandes obras subterrâneas em construção na França estão utilizando o MPTM:

a) o túnel La Galaure, perto de Grenoble. Trata-se de um túnel ferroviário de via dupla, fazendo parte do sistema TGV (trens de alta velocidade), apresentando seção transversal de grande dimensão (forma elíptica, com vão de 14.20 m e altura de 12.50 m). Este túnel está sendo escavado em seção plena, contendo parte solo arenoso, e parte em mármore;

b) O túnel Limeil - Brevannes, também fazendo parte do sistema TGV, com vão de 11.42 m e altura de 9.83 m. Trata-se também de um túnel ferroviário via dupla, que está sendo escavado em seção plena, sendo o maciço constituído de arenito fraturado e mármore;

c) Os túneis da auto - estrada A14, em St Germain en Laye, perto de Paris. A seção transversal apresenta vão de 12.72 m, e a escavação está sendo realizada em seção plena, em maciços constituídos de arenito e mármore.

O pré - corte mecânico consiste em realizar uma "pré - furação" (pré-corte) na linha correspondente ao extradorso da escavação, com uma máquina especial dotada de uma perfuratriz similar à uma serra automática. A perfuratriz corta o terreno em lâminas de 14 a 20 cm de espessura, extensão de 0.80 a 2.00 m, e profundidade variável de 2.00 a 4.00 m (em função do tempo de auto - suporte do maciço). A perfuração é imediatamente preenchida com concreto "injetado", formando uma casca contínua no entorno da futura linha de escavação, e constituindo um sistema de pré-suporte de dimensões mínimas e altamente eficiente ( figura 13 ).



**Figura 13 - Execução de Pré - Corte Mecânico .**

Na França, o sistema de pré-corte mecânico possibilitou obter índices de produção de 9 a 10 m por dia, com 3 lances de pré - revestimento. Devido à espessura reduzida da casca de concreto obtida por este sistema, a estabilidade do suporte da escavação é garantida e complementada através da instalação de cambotas metálicas, como no método austríaco. O suporte primário passa a ser constituído pelo pré-revestimento e pelas cambotas metálicas, e a estabilização definitiva da escavação é feita com a instalação de um sistema de suporte secundário.

Um outro aspecto de interesse relativo à aplicação de pré - corte mecânico refere - se ao túnel metroviário de Fontenay-Sous - Bois, nas proximidades de Paris, escavado em solos coesivos e xistos (Van Walsum, 1992). A seção transversal deste túnel e sua localização no perfil geológico (típico da região de Paris) encontram - se indicadas na figura 14. Durante a construção (de 1974 a 1976), mediram - se os recalques superficiais, para este túnel e para um túnel similar, construído em um maciço de mesmas características em Grigny para a SNCF (Ferrovias Nacionais Francesas), usando o método austríaco (NATM). Ambos os túneis foram escavados em calota, bancada e piso. A principal diferença entre os dois métodos construtivos é que, no MTPM, o túnel encontra-se pré-suportado. A cobertura do túnel de Fontenay (MPTM) era da ordem de 1.8 diâmetros, e no túnel de Grigny (NATM) da ordem de 1.5 diâmetros. Os recalques superficiais observados para ambos os túneis encontram - se representados na figura 14.

O túnel escavado pelo MPTM apresentou recalques 70 % inferiores aos observados no túnel escavado pelo NATM, apesar do diâmetro do primeiro ser 20 % superior ao do segundo.

A construção de outros túneis usando pré - corte mecânico mostrou que avanços em seção plena, mesmo em solos moles com condição de estabilidade insatisfatória, tornam - se viáveis, tornando desnecessário usar métodos construtivos com elevada parcialização (como calota e bancada, ou galerias laterais). Assim, torna - se possível acelerar a velocidade de construção, reduzir custos e minimizar os recalques induzidos pela escavação.

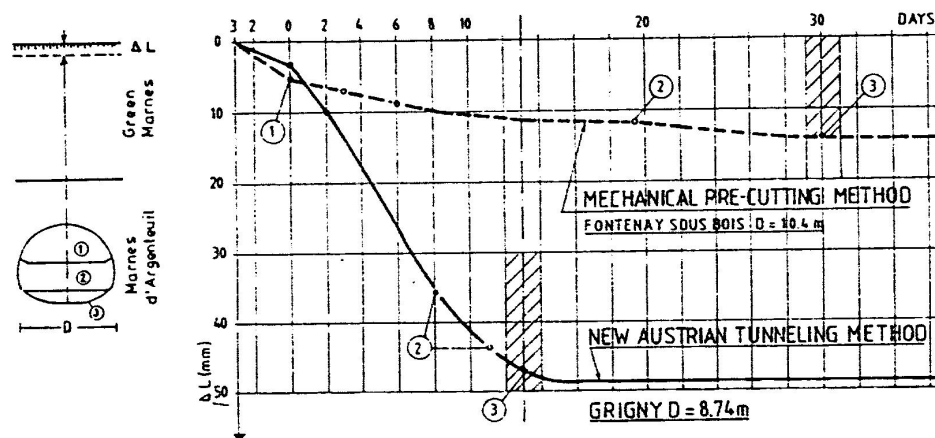


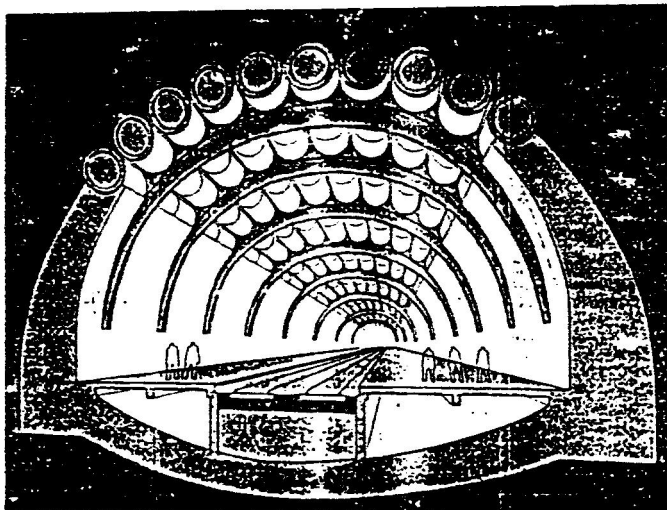
Figura 14 - Recalques Superficiais Observados em Túneis Executados pelo MPTM (Fontenay) e NATM (Grigny)

## A UTILIZAÇÃO DE REFORÇO ESTRUTURAL DO TERRENO

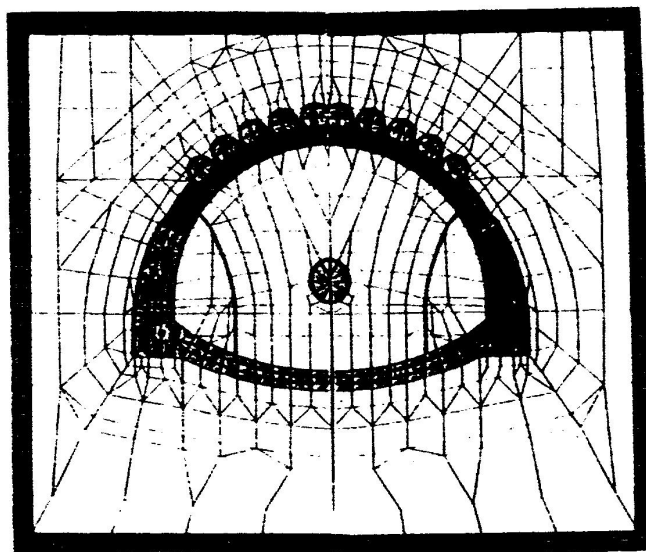
Recentemente, observou-se um aumento na utilização de sistemas de pré-suporte envolvendo reforço estrutural do terreno. Estes sistemas consistem basicamente na execução de enfilagens de grande diâmetro, por tubo cravado, mini-couça ou sistemas de escavação similares. Estas enfilagens (com ou sem camisa metálica) são preenchidas com concreto, e apresentam quase sempre armaduras (frouxas ou protendidas) para assegurar sua rigidez. Carmes (1990) descreve o projeto da caverna de cruzamento do túnel do Canal da Mancha, lado francês ("Cross Over France"), em que se utilizou reforço estrutural do terreno para pré-suportar esta escavação, apresentando seção transversal com área de 350 m<sup>2</sup>. No pré-suporte desta caverna, foram utilizadas 11 galerias com diâmetros variando de 1,70 a 4,20 m, preenchidas com concreto não armado antes da escavação principal ser realizada.

Outro exemplo de utilização de reforço estrutural do terreno como sistema de pré-suporte encontra-se em Milão, Itália, na estação Venezia. Esta estação liga o Metrô de Milão com o sistema ferroviário local. Sua localização, e a necessidade de evitar distúrbios na superfície e na vida da cidade, levou à eliminação de alternativas de escavação a céu aberto, e à adoção de método de escavação subterrânea. As dimensões desta estação (diâmetro de escavação de 28.80 m, e cobertura de solo de 4 a 5 m), associadas às condições geológicas locais (ocorrência de solo mole não-coesivo, e presença do nível d'água em cota elevada), levaram a empresa projetista (Rocksoil S.P.A.) a empregar reforço estrutural do terreno. Isto permitiu assegurar condições adequadas de estabilidade à escavação, e manter os recalques devidos à escavação dentro de limites aceitáveis.

A figura 15 mostra uma perspectiva interna da Estação Venezia. A figura 16 mostra a malha de elementos finitos adotada na análise numérica da construção desta estação, simulando as diversas fases de escavação e revestimento.



**Figura 15 - Perspectiva Interna da Estação Venezia.**



**Figura 16 - Malha de Elementos Finitos empregada na Simulação da Construção da Estação Venezia.**

A Estação Venezia é um dos primeiros casos de utilização de reforço estrutural ao terreno como pré - suporte, em que se realizou ensaios de campo, testes das enfilagens, e monitoração da obra, permitindo avaliar o comportamento da escavação e a eficiência do pré-suporte por meio de retroanálises de leituras de instrumentação. A seqüência executiva adotada consistiu das seguintes fases:

- a) Escavação de túnel piloto central, para tratamento de solo na região das galerias laterais;
- b) Abertura de duas galerias laterais em calota e bancada, complementação do tratamento para execução do reforço estrutural do terreno, e concretagem dos pilares internos;
- c) Execução de 10 enfilagens de grande diâmetro ( 2.1 m ) de concreto, por método misto (escavação em mini - couraça e tubo cravado);
- d) Conexão transversal das enfilagens, por meio de arcos estruturais em concreto armado, a cada 6 m, executados a partir de túneis de ligação, escavados entre galerias laterais;
- e) Armação e concretagem dos arcos e enfilagens;
- r) Escavação parcializada do túnel central com aproveitamento das enfilagens na estrutura permanente da abóbada;
- g) Escavação parcializada da estação, e concretagem do arco invertido definitivo;

Por se tratar de obra urbana, esta escavação foi monitorada intensamente com vários tipos de instrumentos (pinos, placas, extensômetros magnéticos e inclinômetros para o maciço; convergências, nivelamento do teto e células de pressão para o revestimento).

Infelizmente, por se tratar de obra recente, as leituras de instrumentação observadas não estão ainda disponíveis na literatura.

## **CONGELAMENTO DO SOLO**

O processo de congelamento foi inventado há mais de cem anos, tendo sido usado inicialmente na construção de poços. Nos últimos 30 anos, as investigações foram no sentido de explorar as propriedades térmicas e mecânicas do solo congelado. Neste período, o congelamento de solo passou a ser utilizado cada vez mais para escavações em solo. A técnica atual utiliza nitrogênio líquido para congelamento do solo.

Na escavação de túneis, o congelamento é feito usualmente na forma de arco, congelando - se o extradorso da calota e as laterais do túnel. Usualmente, o pré - suporte com solo congelado apresenta espessura mínima de 1.00 metro.

Normalmente, é necessário recorrer a cálculos térmicos para determinar o instante de execução do pré - suporte em solo congelado, e estimar sua capacidade de suporte.

Estes cálculos podem ser feitos por elementos finitos ou diferenças finitas (utilizando - se, por exemplo, o programa FLAC, do Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, EUA). Com isto, é possível determinar a evolução de temperatura com o tempo no solo congelado, o fluxo de calor que deve ser extraído no processo, e a quantidade de calor total. Entre os principais fatores que influenciam o tempo necessário para proceder ao congelamento, pode - se citar:

- a) tipo e estrutura do solo;
- b) composição mineralógica;
- c) posição do lençol freático;
- d) posição, no solo, da furação para abrigar as tubulações de nitrogênio líquido;
- e) parâmetros físicos do solo (teor de umidade, grau de saturação, porosidade e densidade seca);

f) parâmetros térmicos do solo (capacidade e condutividade térmica - material congelado e na temperatura ambiente);

O monitoramento da temperatura no maciço de solo a ser congelado é muito importante, devido às dificuldades de se prever teórica ou numericamente a evolução da região congelada no tempo. O congelamento induz um aumento de volume, uma expansão do solo, que se anula no descongelamento, provocando recalques adicionais e podendo levar a danos nas estruturas e utilidades sobrejacentes ao solo tratado. Esta expansão é mais acentuada para solos de granulação grossa, que permitem a absorção de água na zona congelada durante o processo.

Curiosamente, no último congresso da International Tunnelling Association, ITA ("Towards New Worlds in 'Tunnelling'", Acapulco, May 1992, Balkema, Rotterdam), não foi apresentado nenhum trabalho técnico sobre congelamento de solo. Como exemplo de túnel pré - suportado utilizando - se o método de congelamento por nitrogênio líquido, cabe citar a passagem sob o canal de Main - Donau, realizada para a construção do Metrô de Nuremberg. Tratam - se de dois túneis paralelos, cada um com uma extensão total de 1050 m. Estes túneis foram escavados em formações geológicas constituídas por areias médias e solos de alteração de arenito.

O lençol freático na região é governado pelo canal de Main - Donau, que é permeável no seu fundo. Os túneis em questão passam sob o canal, com uma cobertura de solo de apenas 4 a 5 metros. A figura 17 mostra um corte longitudinal da passagem sob o canal. A figura 18 mostra um corte transversal dos túneis, também na seção sob o canal. Na região do canal, foi identificada uma falha geológica no arenito, com elevada permeabilidade, comprometendo a segurança da escavação. Para proteção adicional, foi executada uma manta de concreto submerso no fundo do canal, impermeabilizando o. O congelamento foi efetuado para travessia da zona de falha, conforme indicado nas figuras 17 e 18. A figura 19 mostra um detalhe do tratamento de solo efetuado por congelamento.

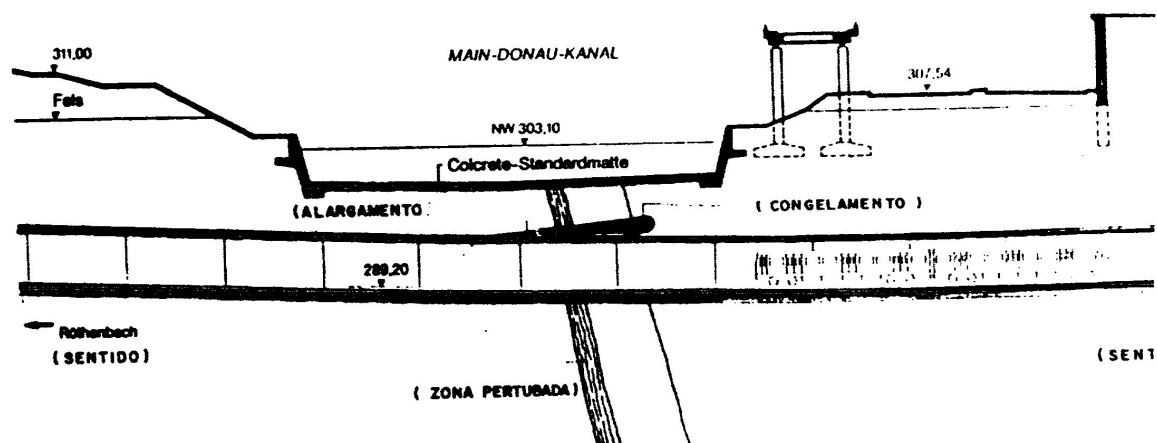


Figura 17 - Corte Longitudinal da Passagem sob o Canal de Main - Donau

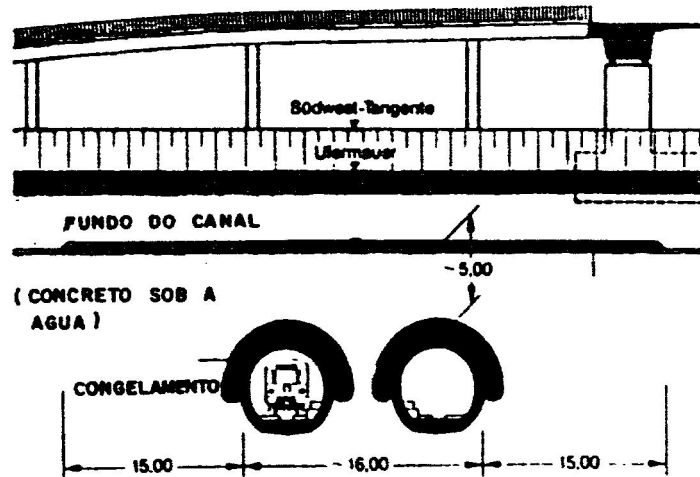


Figura 18 - Corte Transversal sob o Canal de Main - Donau

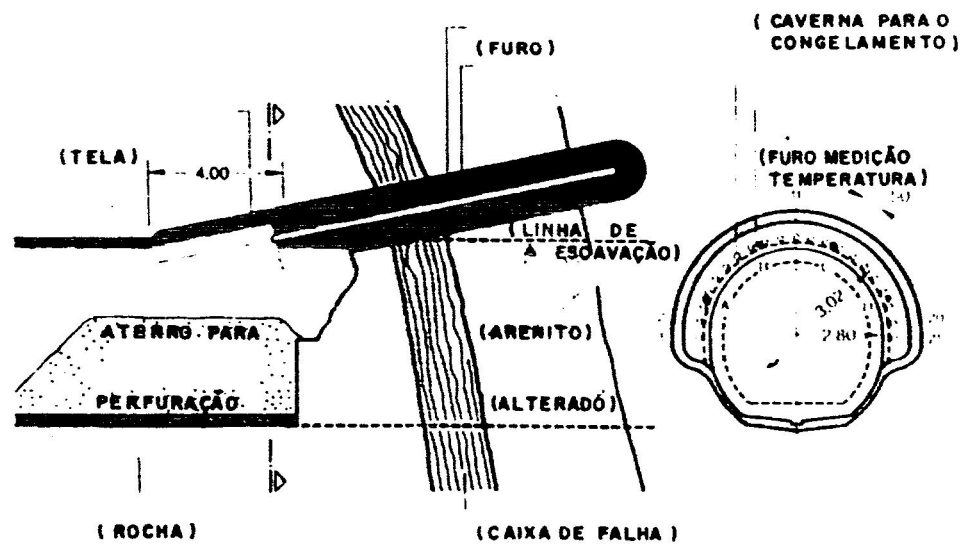


Figura 19 - Detalhe do Tratamento por Congelamento na Caixa de Falha

Antes de se optar por congelamento de solo nesta travessia, foram feitas tentativas de tratamento da caixa de falha (preenchida por material arenoso e fragmentos de arenito) por injeções, sem sucesso. Nestas condições, o tratamento por congelamento de solo com nitrogênio líquido poderia ser usado mantendo - se condições de segurança adequadas.

Após uma semana de congelamento, foi possível prosseguir com a escavação dos túneis.

## AGULHAMENTO DA FRENTE

Para túneis escavados em seção plena e/ou com área exposta de escavação suficientemente grande para instabilizar a face, o uso de agulhamento da frente com tubos de fibra de vidro é indicado, e permite manter a integridade do núcleo de solo na face de trabalho a ser escavada. Um exemplo de aplicação desta metodologia, empregada para o túnel Poggio Orlandi (parte da linha ferroviária de alta velocidade Roma - Firenze), é descrito por Lunardi et. al. (1992). Este túnel foi projetado com escavação em seção plena, após agulhamento prévio da frente. Este foi realizado por meio da inserção de tubos de fibra de vidro no núcleo de solo adiante da face, preenchidos por calda de cimento. Após a escavação, efetuava - se imediatamente a aplicação de concreto projetado para reforço das paredes, e concretava - se o arco invertido a uma distância de aproximadamente 1.5 vezes o diâmetro do túnel (figura 20).

Este procedimento permitiu reduzir e/ou estabilizar as deformações induzidas pela escavação, que no caso do túnel Poggio Orlandi eram de magnitude elevada, devido à consistência mole do solo silto-arenoso saturado encontrado na face de escavação. Este efeito é obtido pela restrição que o agulhamento da frente impõe aos deslocamentos longitudinais à face de escavação, criando um confinamento adicional nesta região, e reduzindo o alívio de tensões. A frente agulhada também comporta - se como um solo pregado, com o conseqüente aumento na resistência do solo tratado por este método.

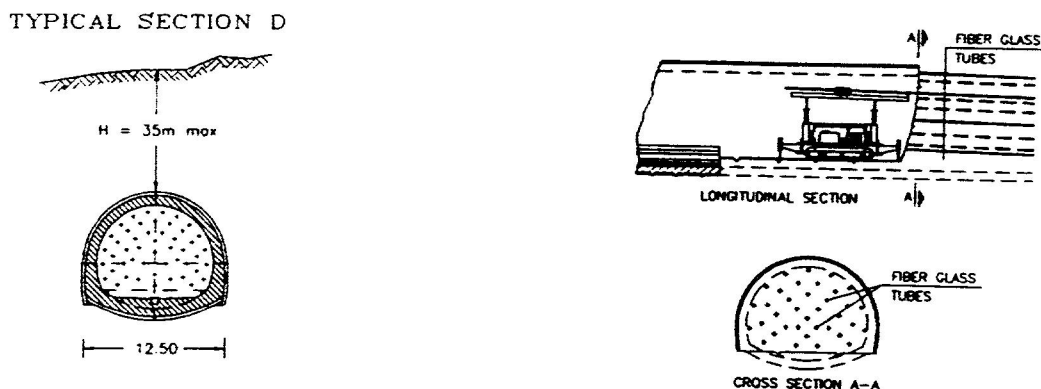


Figura 20 - Agulhamento de Frente : Seções Típicas

## RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma revisão de metodologias de projeto de pré - suporte para túneis em solos moles, e discutiu-se resumidamente os principais fatores governando o



comportamento de túneis executados desta maneira. Definiu - se pré - suporte, no contexto deste trabalho, como o uso de técnicas de tratamento ou reforço de solo (como injeções de cimento ou silicatos, jet grouting, enfilagens estruturais ou injetadas, pré - corte mecânico, congelamento de solo, reforço estrutural do terreno, e agulhamento da frente, entre outras), executadas previamente à escavação do túnel para aumentar a rigidez e resistência do maciço, e melhorar a condição de estabilidade durante a construção do túnel. O fator predominante no que se refere ao comportamento do pré - suporte (recalques induzidos pela escavação) foi analisado utilizando - se o conceito de eficiência de tratamentos de solo. Técnicas de tratamento de solo onde o meio geotécnico nacional possui experiência acumulada em volume considerável (como, por exemplo, injeções de cimento, e enfilagens injetadas ou estruturais) não foram abordadas no presente relato. Preferiu-se remeter o leitor à literatura especializada (como, por exemplo, Oliveira & Ferreira, 1982), e utilizar o espaço disponível para descrever novas técnicas de tratamento de solo e pré - suporte de túneis. O rebaixamento do lençol freático (a rigor, um método de condicionamento do terreno, e não de tratamento de solo), enquadra- se na mesma categoria (técnica bastante conhecida no Brasil, não sendo necessário analisá-la no presente trabalho ).

Utilizou - se modelamento numérico por elementos finitos para relacionar eficiência do pré - suporte a parâmetros adimensionais de determinação expedita. Este procedimento permitiu estabelecer uma metodologia simples para estimativa da eficiência do tratamento de solo e dos recalques associados à escavação do túnel. Desta forma, a eficiência de técnicas distintas de pré - suporte pode ser estimada, tornando possível comparar projetos alternativos. Kochen (1989) mostrou que há uma espessura ótima de tratamento para cada valor de rigidez relativa  $E_t/E_m$ . Espessuras superiores ao valor ótimo aumentam o custo do tratamento de solo sem que ocorra um aumento equivalente de sua eficiência. Estimativas da eficiência do pré - suporte e dos recalques induzidos pela escavação podem ser feitas, nos casos em que a perda de solo durante a escavação do túnel seja controlada.

A análise do túnel Tiete mostrou que uma espessura menor de pré - suporte teria sido adequada para assegurar uma eficiência aceitável para o tratamento de solo empregado.

Os túneis viários de Campinas, apresentando grande seção transversal de escavação, foram analisados. As previsões de recalques feitas apresentaram boa concordância com valores observados em seções onde a calota foi escavada em material com alto teor de argila. Para solos arenosos, as previsões resultaram em recalques menores que os observados, na medida em que o comportamento do solo durante a escavação dos túneis se desviou do regime elástico, em decorrência de perdas de solo causadas pelas condições desfavoráveis encontradas durante a construção. A monitoração dos túneis viários de São Paulo's mostrou que os recalques induzidos pela execução do pré - suporte são geralmente baixos, e podem ser minimizados por um planejamento cuidadoso da sequência de execução das colunas de solo - cimento do tratamento.

Técnicas de tratamento de solo e pré - suporte pouco utilizadas no Brasil até o momento são também apresentadas e discutidas. Entre estas, destacam-se o pré-corte mecânico, o reforço estrutural do terreno, o congelamento de solo, e o agulhamento da frente de escavação. Estas técnicas foram descritas e comentadas sucintamente neste texto.

O pré corte mecânico permite minimizar recalques (para túneis em solo), ou vibrações (para túneis em rocha), sendo particularmente indicado para obras urbanas. O reforço estrutural do terreno permite escavar túneis e cavernas subterrâneas de grandes dimensões em solo, com recalques mínimos. O congelamento de solo é indicado para

condições particularmente difíceis de escavação, como, por exemplo, travessias subaquáticas atravessando falhas com preenchimento arenoso, e tratamento impossível por métodos convencionais. O agulhamento da frente permite estabilizar a face de escavação, e utilizar seção plena no método construtivo, com ganhos consideráveis na produtividade da obra.

## AGRADECIMENTOS

Ao Comitê Brasileiro de Túneis, pelo convite formulado para apresentação do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- **Bell, A.L.; Crockford, P.M. & Manley, G.D. (1991):** “Soilcrete Jet Grouting in Tunnel Construction in Cohesive Soils at Burnham-on-Sea, Somerset, England”, Tunelling 91, Min. Metall., London.
- **Campanhã, C.A.; Kochen R.; Margarido, A. & Koshima, A. (1990):** “Efeitos de Execução Observados nos Túneis do Anel Viário de São Paulo”, 9º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Salvador, Brasil.
- **Carmes, J. (1990):** “Lê Cross Over France: Conceptin D’un Ouvrage Très Special”, Franchissements Souterrains Pour L’Europe, Legrad (ed.), Balkema, Rotterdam.
- **Cording, E.J. & Hansmire, W.H. (1975):** “Displacements around Soft Ground Tunnels”, 5<sup>th</sup> PCSMFE, Buenos Aires, Argentina, Vol. 4, pp. 571 – 633.
- **Eisenstein, Z. & Negro, A. (1985):** “Comprehensive Method for Shallow Tunnels”, Proc., on Underground Structures in Urban Areas, Prague, Czechoslovakia, Vol. 1, pp. 375 – 391.
- **Einstein, H.H. & Scwarz, C.W. (1979):** “Simplified Analysis for Tunnel Suports”, JGED, ASCE, Vol. 105, no. GT4, pp. 499 – 518.
- **Gartung, E.; Dubois, J. & Bauerfind, P. (1979):** “Viscoplastic Finite Elements Analysis of Tunnel Sections in Grouted Sands”, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. On Num. Meth. In Geomech., Aachen, Germany.
- **Gouvenot, D. (1990):** “Les Nouvelles Techniques de Reconnaissance et de Traitment des Sols”, Franchissements Souterrains pour l’Europe, Legrand (ed.), Balkema, Rotterdam.

- **Humes, C. & Kochen R. (1991):** “Propriedades de Colunas Jet Grouting Obtidas a Partir de Campos de Prova”, 2º Seminário de engenharia de Fundações Especiais (SEFE), São Paulo, Brasil.
- **Kochen, R. (1989):** “Contribuição ao Dimensionamento do Pré-Revestimento de Túneis Rasos em Solo”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- **Kochen, R. (1991):** “Pré Support Desing for Shallow Tunnels”, 9<sup>th</sup> PCSMFEE, Vol. III, pp. 1363 – 1376, Viña Del Mar, Chile.
- **Kochen, R. (1992):** “Pre Supported Soft Ground Tunnels”, 10<sup>th</sup> Anual Canadian Tunnelling Conference, TAC – Tunnelling Association of Canada, Oct. 1992, Banff, Albert, Canada.
- **Lunardi, P.; Focarraci, A.; Giogi, P. & Papacella, A. (1992):** “Tunnel Face Reinforcement in Soft Ground Desing and Controls during Excavation”, Proc., International congress “Towards New Worlds in Tunnelling”, Acapulco, May 92, Balkema.
- **Negro Jr., A. (1988):** “Design of Shallow Tunnels in Soft Ground”, Ph. D. Thesis, Departament of Civil Engineering, Universite of Alberta.
- **Oliveira, M. & Ferreira, A.A. (1982):** “Csolidação de Solo Aluvionar Mole: Relato de um Tratamento por Injeção de Cimento para Escavação de Túnel Urbano na Cidade de São Paulo”, Simpósio Sobre Escavações Subterrâneas, ABGE – ENGEFER, Rio de Janeiro, Vol. 1, 335 – 351.
- **Pan, Y.E. & Oliveira H.G. (1983):** “Relevant Geothnical Aspects of a 12 Km Intercepting Sewer Tunnel in São Paulo, Brazil”, 7<sup>th</sup> PCSMFEE, Vancouver, Canada, pp. 269 – 279.
- **Van Walsum, E. (1992):** “The Mechanical Pre-Cutting Tunnelling Method”, Proc., International Congress “Towards New Worlds in Tunnelling”, Acapulco, May 92, Balkema.
- **Tan, P.V. & Clough, G.W. (1980):** “Ground Control for Shallow Tunnels by Soil Grouting”, JGED, ASCE, Vol. 106, nº GT9.