

Projeto de Túnel Invertido para as Obras do Metrô-DF

Eng^o. Roberto Kochen

Eng^o. Arsênio Negro Júnior
Bureau de Projetos e Consultoria

Eng^o Luiz Gonzaga Rodrigues Lopes
METRÔ-DF

Eng^o Arnaldo Ferreira da Costa
METRÔ-DF

RESUMO: Sistemas de escavação invertida tem sido utilizados desde a década de 70, em conjunto com o método "cut and cover". A escavação invertida convencional consiste na execução de paredes diafragmas contínuas, como em um "cut and cover" tradicional, seguida de uma escavação de pequena profundidade para concretagem de laje de teto, solidarizada e apoiada nas diafragmas executadas previamente. Procede-se ao reaterro sobre a laje de teto, e a escavação prossegue sob a mesma (escavação invertida), minimizando-se assim as interferências com a superfície. Este processo é caracterizado por uma solução "estrutural" onde a participação do solo se dá apenas como agente de carregamento, não contribuindo portanto como elemento de suporte. Já a concepção de túnel invertido, como prevista para o Metrô de Brasília, passa a ter o solo como integrante do sistema de suporte, devido à geometria da seção do túnel, à sequência adotada para a escavação invertida, e ao revestimento interno no túnel.

PALAVRAS-CHAVES: túnel invertido, túnel, Metrô-DF, sistemas de suporte,

1 INTRODUÇÃO

O traçado geométrico do Metrô-DF, no trecho de Ceilândia junto à EPCN (Estrada Parque Centro Norte), sofreu modificação recente para permitir a implantação futura de estação de passageiros (Estação nº 21) junto ao cruzamento com a via de ligação Taguatinga-Samambaia, para fazer frente à demanda de passageiros prevista para o local, resultante da alteração de uso do solo al promovida pelo IPDF (Instituto de Planejamento Urbano e Territorial do Distrito Federal), que prevê o adensamento populacional ao longo da via EPCN. As novas condições geométricas impostas, os problemas de interferência urbana para o caso de construção da via metroviária em vala aberta (conforme projeto anterior), e as peculiaridades

da geologia local, recomendaram o emprego de solução de túnel raso, representado no caso por processo em "túnel invertido". O processo do "túnel invertido", também designado como "túnel alemão", tem no túnel de Oberrieden o seu caso mais conhecido (Sauer 1988). Tal processo não tem precedentes de uso no Brasil, razão pela qual requereu investigações e estudos geotécnicos detalhados além de análise pormenorizada das atividades envolvidas no processo executivo. O trecho do túnel foi designado como "Túnel Onoyama" para referência à chácara de mesmo nome situada em seu trecho inferior.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO TRECHO DE IMPLANTAÇÃO

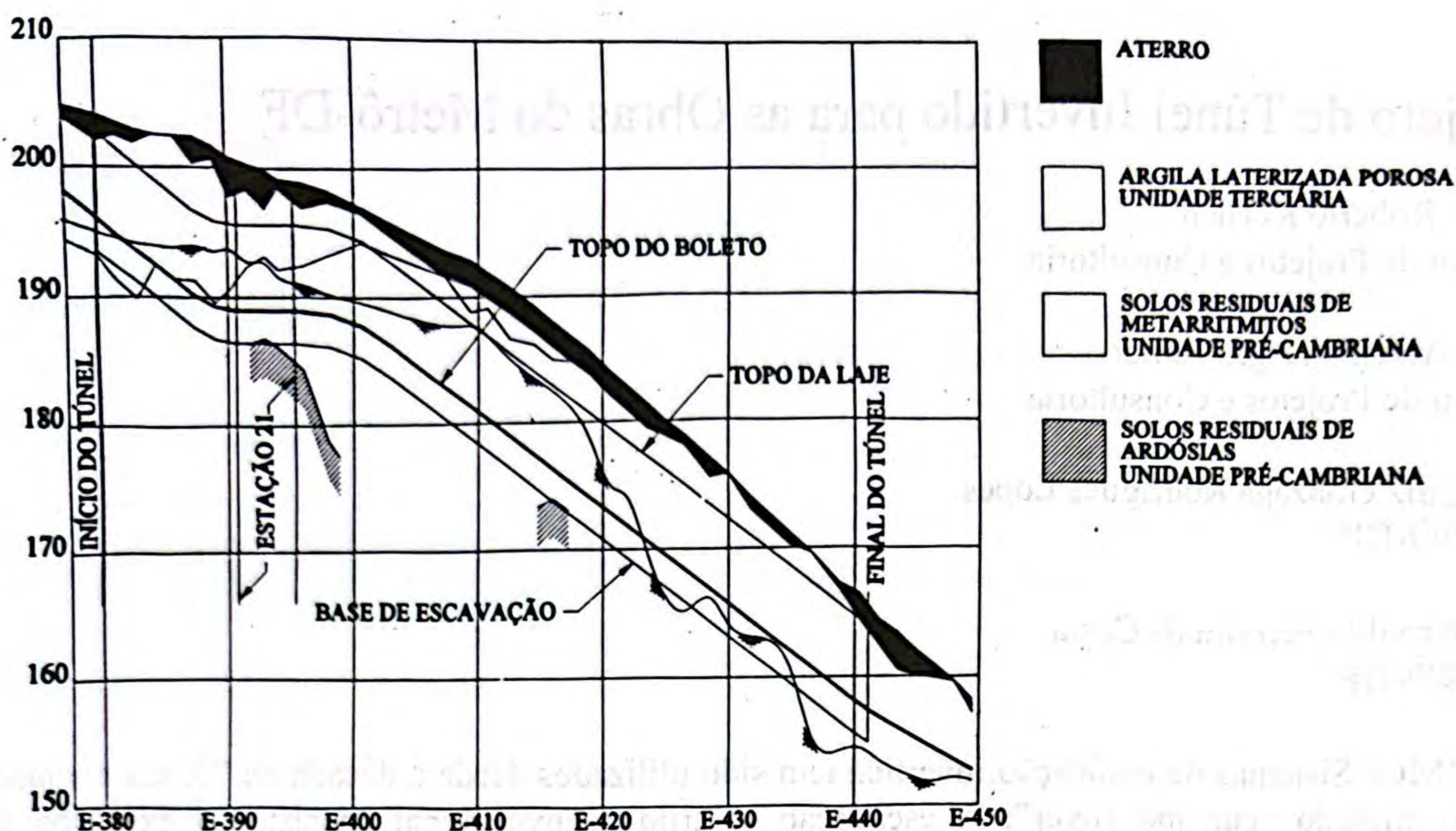


Figura 1. Perfil Geológico do Trecho do Túnel Onoyama

Para o levantamento das características geológico-geotécnicas do trecho de implantação do túnel invertido, foi desenvolvida campanha de investigações de campo, constituída de sondagens de simples reconhecimento (SPT), ensaios de penetração estática de cone (CPT) e ensaios dilatométricos, sempre executados de forma associada para permitir uma melhor aferição de resultados. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, o perfil geológico do trecho do túnel Onoyama, com a representação das principais unidades estratigráficas. Na Figura 2 é mostrado um exemplo da investigação associada efetuada na Est. 380. A Tabela 1 apresenta as estimativas dos índices e parâmetros geotécnicos de resistência e deformabilidade dos solos ensaiados, que serviram de base para os estudos de estabilidade em condições transitórias (taludes escavados da vala superficial) e para o dimensionamento dos elementos do teto (laje de cobertura e perfis metálicos) e do revestimento interno do túnel.

O subtrecho entre as estacas 380 e 390+13 do túnel (antes da Estação 21) será escavado quase que totalmente em solos de evolução pedológica representados, predominantemente por sedimentos argilosos, nas regiões de teto, parede de escavação e piso. A unidade da fácies argilosa mais frequente é a argila siltosa

vermelha porosa, sobrejacente a uma argila arenosa de mesma formação, com comportamento geomecânico ligeiramente mais competente, conforme demonstram os resultados de número de golpes do amostrador SPT. Estes materiais apresentam-se com consistência muito mole a mole. Na parte final deste subtrecho a região inferior da galeria passa a atingir solos residuais do embasamento cristalino, caracterizado ora como um silte arenoso ora como uma areia siltosa.

O subtrecho compreendido entre as estacas 395 e 443 (após a Estação 21) apresenta um desaparecimento da camada de argila porosa nas profundidades do teto, parede e piso do túnel, dando lugar a areia fina siltosa, de compactidade fofa a muito compacta. Em algumas sondagens detectou-se a presença da rocha matriz (identificada pela condição de impenetrável à percussão), basicamente na região do piso do túnel. Entre as estacas 412 e 427 o solo apresenta-se, predominantemente, como silte argiloso (solo residual de ardósia) ao longo da seção transversal do túnel, capeado pela areia fina já mencionada, e sobrejacente à rocha matriz. O nível d'água varia entre 4 e 12 metros de profundidade.

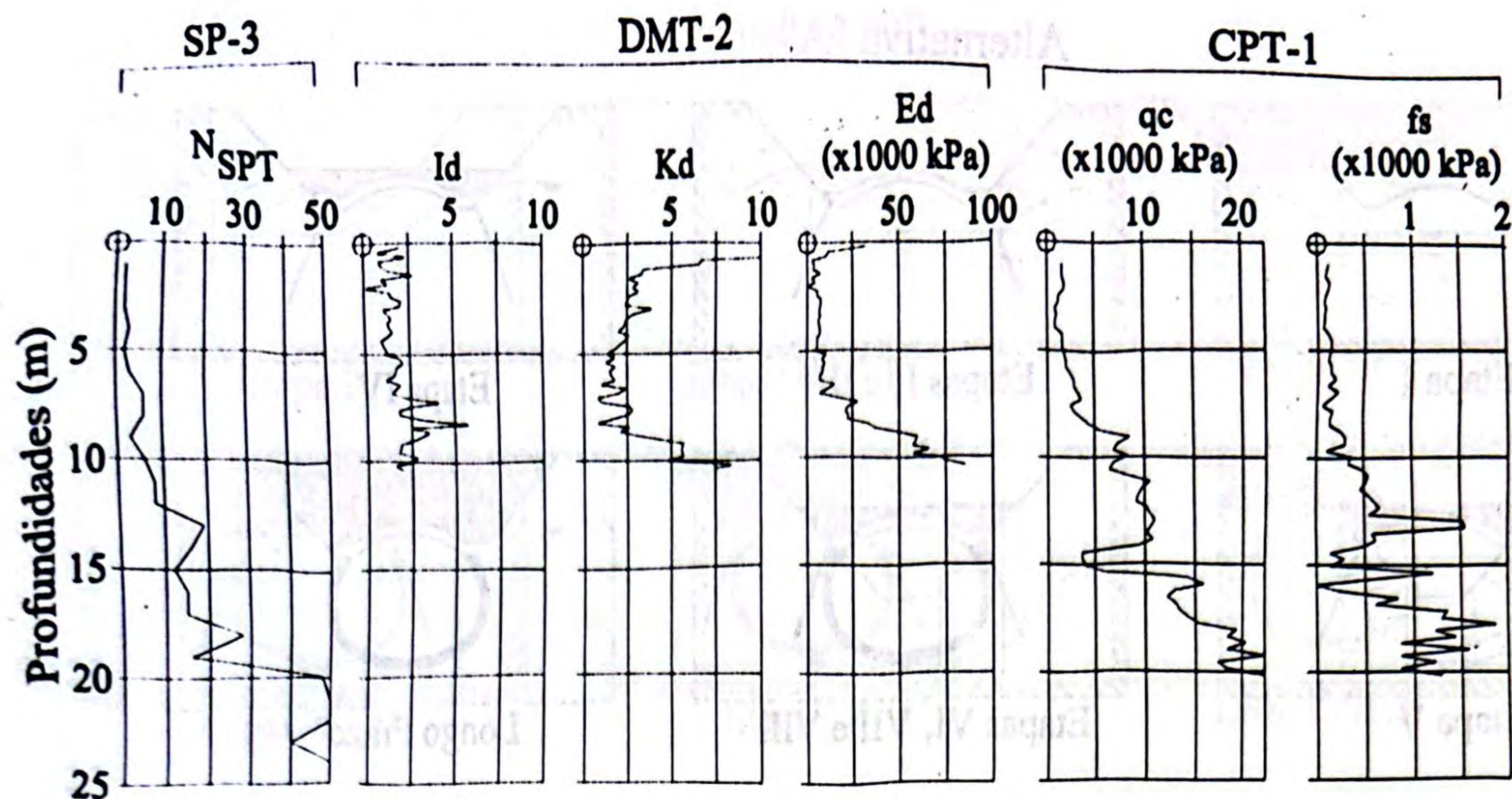


Figura 2. Ensaios Realizados na E-380

Os parâmetros utilizados nos cálculos efetuados foram estimados a partir de correlações baseadas nos resultados das sondagens de simples reconhecimento e na experiência acumulada no projeto e acompanhamento técnico da obra do metrô de Brasília, desde seu início. Esses parâmetros foram confrontados com os obtidos através dos ensaios “in situ” com o objetivo de aferir as correlações e averiguar a sua aplicabilidade. Os parâmetros utilizados nas primeiras análises foram os constantes da Tabela 1.

3 SEQUÊNCIA EXECUTIVA DO TÚNEL INVERTIDO

Para o caso específico do túnel Onoyama foram idealizadas duas alternativas de sequência executiva, resultantes da evolução dos estudos e dos levantamentos de interferências locais, designadas como Alternativa em “Galeria Interna” e em “Avanço em Seção Plena”, cujas vantagens e desvantagens são a seguir relacionados:

Tabela 1. Propriedades dos solos ensaiados.

Tipo de solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	G (kPa)	K (kPa)	k_0
Argila Porosa	16	8	23	1282	2780	0,6
Silte Arenoso	18	15	28	5769	12500	0,5
Areia Siltosa	18	10	30	3846	8330	0,5
Silte, prof. >17,5m	18	15	28	var. de 5769 a 19231	var. de 12500 a 41660	0,5

Obs.: γ = peso específico aparente natural, c' = coesão efetiva, ϕ' = ângulo de atrito efetivo; G = módulo de elasticidade transversal, K = módulo de compressibilidade volumétrica e k_0 = coeficiente de empuxo em repouso.

Alternativa "A"

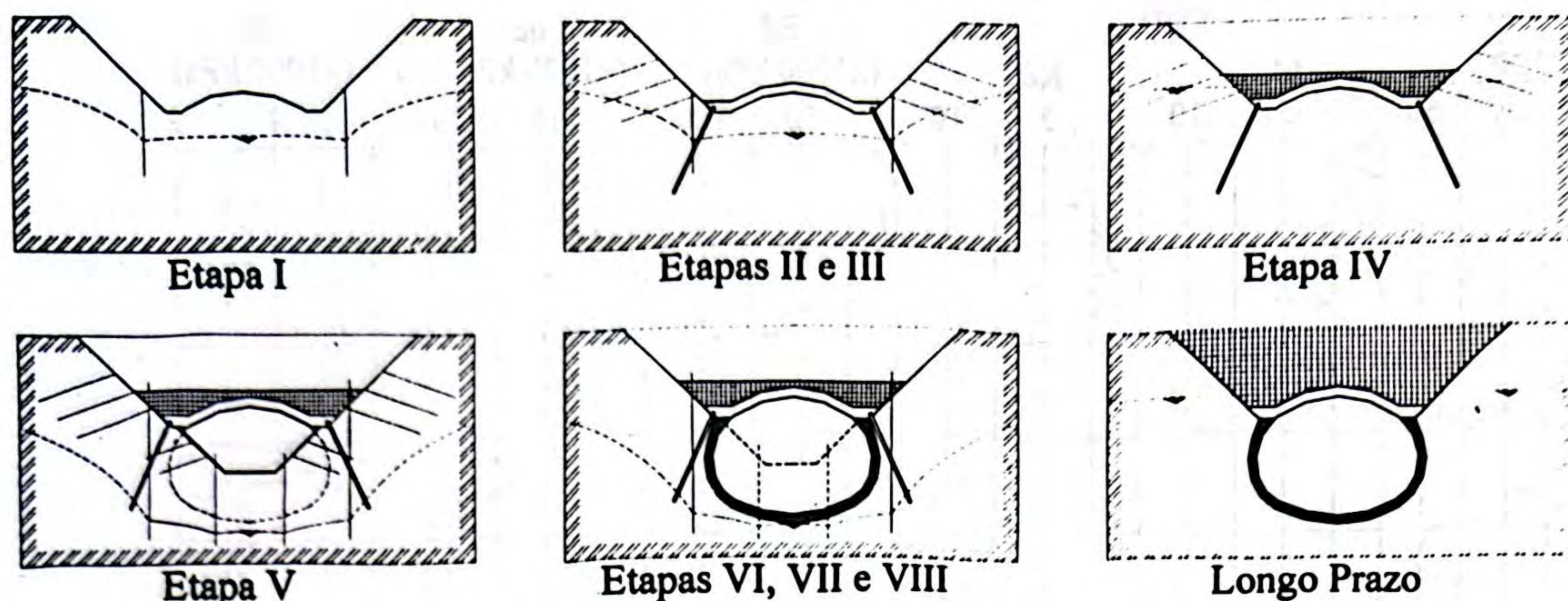


Figura 3. Sequência Executiva da Alternativa A"

3.1 Alternativa em Galeria Interna ("A")

Esta alternativa destaca-se pela abertura de uma galeria de avanço por sob a laje de teto, permitindo a ampliação de frentes de concretagem dos revestimentos (Figura 3), compreendendo as seguintes atividades:

- I. Escavação da trincheira em superfície, rebaixamento de lençol freático (ponteiras) e reforço dos taludes, onde exigido;
- II. Cravação de perfis metálicos que servirão de fundação para a laje de teto;
- III. Armação e concretagem da laje de teto;
- IV. Reaterro parcial cobrindo a laje de teto;
- V. Escavação da trincheira sob a laje de teto, rebaixamento do lençol freático através de ponteiras instaladas ao longo da trincheira (onde exigido) e reforço dos taludes internos;
- VI. Escavação da calota e bancada a partir da trincheira interna;

- VII. Armação (com colocação de gaiolas) e revestimento primário, em concreto projetado, das paredes da calota e bancada;
- VIII. Armação em gaiolas e revestimento secundário em concreto projetado;
- IX. Reaterro final.

3.2 Alternativa em Avanço em Seção Plena ("B")

A alternativa de avanço em seção plena diferencia-se da anterior a partir do item IV, conforme descrito adiante (Figura 4):

- IV. Reaterro total da trincheira em superfície;
- V. Execução de poços profundos para rebaixamento de lençol (onde exigido), e escavação de calota e bancada em avanço único, por sob a laje de teto;
- VI. Armação e revestimento primário, em concreto projetado, das paredes da calota e bancada;
- VII. Armação e revestimento secundário em concreto projetado (parede lateral) e em concreto moldado (arco invertido da seção);

Alternativa "B"

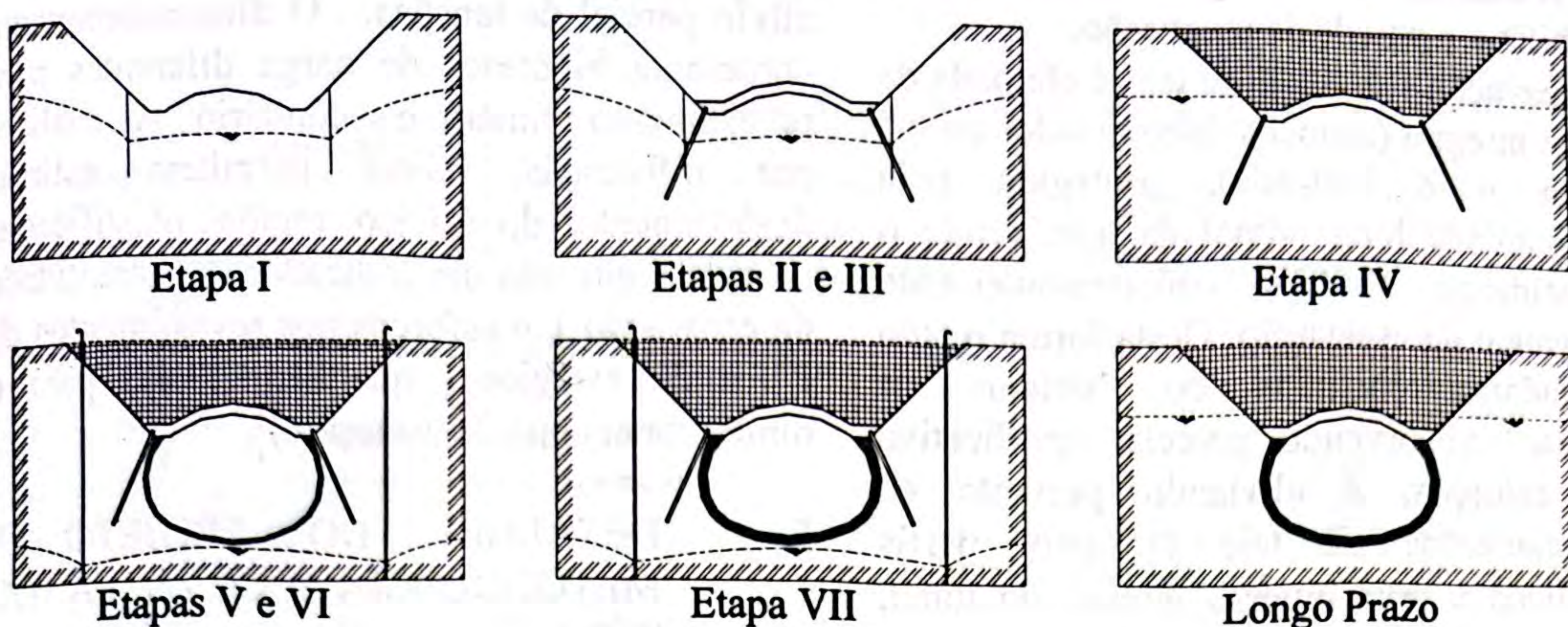


Figura 4. Sequência Executiva da Alternativa "B"

3.3 Comparação de Alternativas

A alternativa "A" privilegia-se pela agilidade executiva, uma vez que permite a abertura de maior número de frentes para execução da escavação na seção final e aplicação dos revestimentos. As desvantagens desta alternativa se devem a:

- o reaterro sobre a laje de teto é apenas parcial, para não criar carga demasiadamente elevada sobre a própria laje e perfis metálicos, que atuam como elementos de fundação da laje de teto. Como a escavação sob a laje seria implantada, em primeira etapa, pelo método de trincheira contínua, praticamente toda a carga seria suportada pela laje e perfis metálicos, uma vez que o fechamento do arco interno do túnel é implantado em etapa posterior e com intervalo de tempo relativamente elevado. Desta forma a interferência com a malha urbana é mantida por longo intervalo de tempo.
- a escavação da trincheira interna propicia taludes totais de elevada altura (talude externo mais o talude interno) exigindo, para as condições geológico-geotécnicas locais, tratamentos intensos de estabilização (grampeamento e aplicação de concreto projetado ao longo do talude) em alguns

trechos mais desfavoráveis, elevando o custo do túnel;

- como o revestimento interno do túnel é executado sem que tenha ocorrido uma transferência efetiva de carga ao solo circundante (arqueamento de tensões), o mesmo será submetido a elevados carregamentos, representados pela complementação do reaterro superficial e pela transferência de carga dos perfis metálicos para o revestimento do túnel, que deve se desenvolver de forma gradual com a oxidação e corrosão dos mesmos, exigindo portanto maior espessura total de revestimento;

No caso da Alternativa "B", pode-se elencar as seguintes vantagens:

- o reaterro é efetuado integralmente, após a conclusão da concretagem da laje de teto, reduzindo-se significativamente a interferência com a malha urbana; desta maneira, os problemas de instabilização de taludes restringem-se apenas à abertura da trincheira superficial, que permanece exposta por pequeno período de tempo (cravação de perfil, concretagem da laje e reaterro), com menores necessidades de tratamentos e com riscos muito inferiores aos da Alternativa "A". Os perfis metálicos cravados atuam como elementos de redução

de recalques e enfilagens laterais para estabilizar a parede da escavação.

- a escavação sob a laje de teto é efetuada de forma integral (avanços diferenciados para a calota e a bancada), protegida pela continuidade longitudinal da laje, sendo o revestimento aplicado concomitantemente ao avanço da escavação. Desta forma o solo circundante participa do "sistema de suporte" absorvendo parcela significativa dos esforços, e aliviando portanto os carregamentos na laje de teto, perfis metálicos e revestimento interno do túnel, traduzindo-se em estrutura mais econômica.

No caso específico do Túnel Onoyama, ocorrem interferências importantes para a implantação do túnel, notadamente com o remanejamento de rede da Telebrasil, e das obras mínimas a serem implantadas para a Estação nº 21, retirando assim as possíveis vantagens da Alternativa "A", ficando portanto altamente favorável a adoção da Alternativa "B", que atualmente encontra-se em implantação no campo.

Comparativamente à solução em processo em NATM, salienta-se que a execução prévia da laje de teto equivale a um tratamento de teto, melhorando muito a condição de estabilidade da escavação. Um tratamento convencional, utilizando jet grouting ou injeção de calda de cimento, sairia múltiplas vezes mais caro que a laje de teto.

4 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DO TÚNEL

Basicamente, o dimensionamento é o mesmo de um túnel NATM. Foi usado o programa de diferenças finitas FLAC, para a integração das equações diferenciais do meio elasto-plástico contínuo que simula o solo. O modelo de cálculo inclui hipótese de deformação plana na seção transversal da galeria, comportamento elasto-plástico perfeito para o solo, com envoltória de resistência obedecendo ao critério de Mohr-Coulomb, sem fluxo associado na plastificação. Foram efetuadas análises para seções típicas em argila porosa e em solo arenoso, ora com a máxima cobertura, ora com cobertura mínima associada a efeito de sobrecarga de tráfego, e simulando-se as

diversas fases de escavação e revestimento, com alívio parcial de tensões. O dimensionamento contempla hipóteses de carga diferentes para revestimento primário e secundário. As análises por diferenças finitas permitem estimar deslocamentos do maciço, regiões plastificadas no solo (que são um indicador da estabilidade da escavação), e esforços nos revestimentos de 1º. e 2º. estágios (que são usados para o dimensionamento da armação).

5 DETALHES DO PROJETO E METODOLOGIA EXECUTIVA DO TÚNEL

A seguir são descritos alguns detalhes do projeto executivo e da metodologia executiva empregada no túnel Onoyama. Na época da elaboração deste artigo técnico, já haviam sido processadas as fases de escavação superficial, cravação de perfis, preparo do terreno e início de concretagem da laje de teto. A Figura 5 apresenta, além do detalhamento estrutural da laje de teto, alguns elementos adicionais de ligação laje - revestimento interno

A escavação da trincheira superficial foi efetuada com equipamentos convencionais de terraplenagem até uma primeira elevação, pouco acima da geratriz interna superior do túnel, a partir da qual executou-se escavação em trincheira nas laterais, para permitir o alinhamento e cravação das estacas em perfil metálico I 8 polegadas (perfil laminado de aço MR-250 ASTM A-36 203x27,3 de primeira alma). Os comprimentos dos perfis foram pré-estimados em função das características geotécnicas dos horizontes atravessados. O controle de cravação atendeu aos comprimentos mínimos estabelecidos e ao critério de "nega", que no caso do túnel Onoyama foi definido como uma relação de avanço máximo por tempo, em função das características da estaca, da carga e do equipamento de cravação. A aferição dos critérios de "nega" será efetuada com bate-estaca de gravidade, convencional. A cravação foi efetuada com o emprego de retroescavadeira adaptada com a inclusão de martelete pneumático.

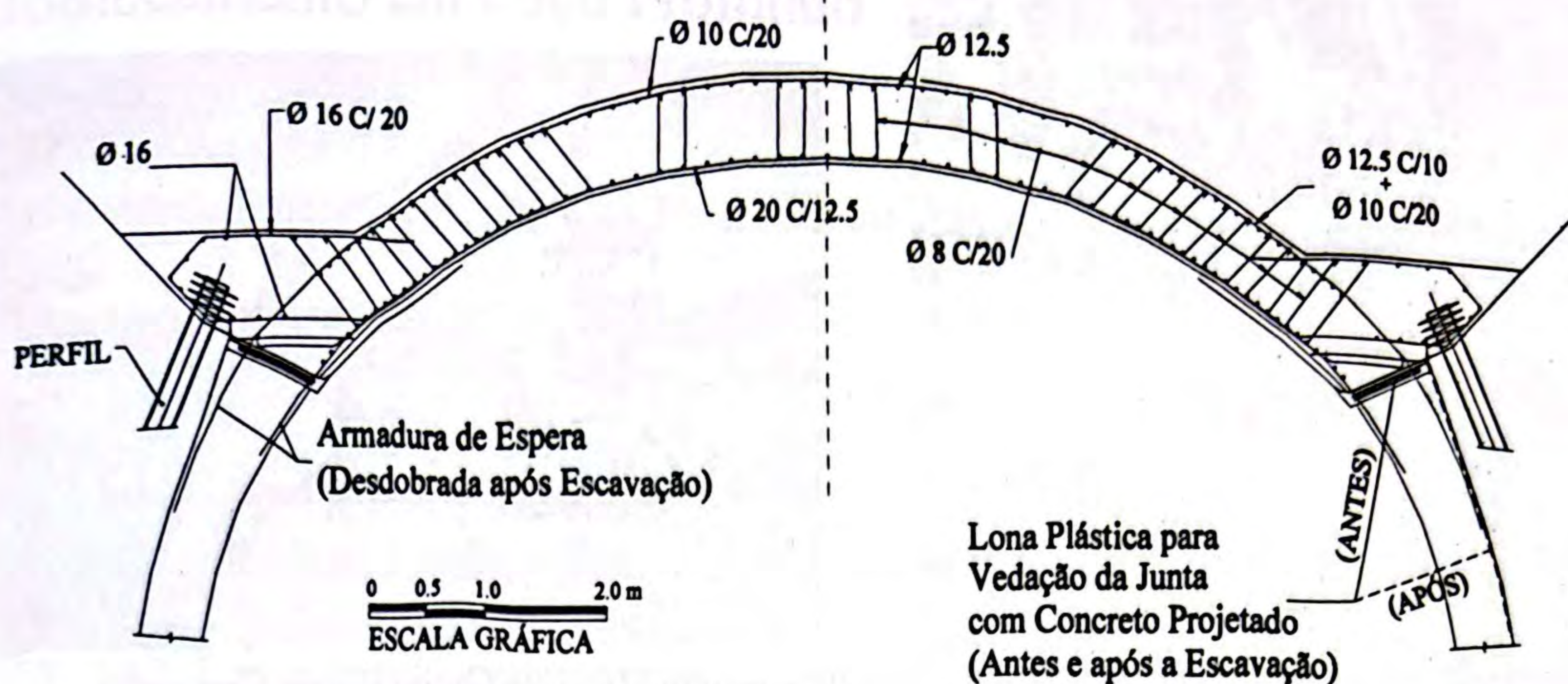


Figura 5. Croquis Indicativo da Armação da Laje de Teto

Sobre a extremidade da estaca, foi incluída ferragem em forma helicoidal, de forma a melhorar a transferência de carga para a laje de teto; concluída a cravação procedeu-se à execução da escavação complementar, de forma a conformar a forma da laje de teto do túnel. A geometria do corte dificultou a proposta inicial de aplicação de pequena camada de concreto de regularização sobre o solo escavado, antecedendo à concretagem principal. Sobre o concreto de regularização seria disposto um lençol de polietileno (plástico preto) para evitar a aderência entre o concreto da laje e a camada de regularização. Desta forma foi testado o emprego de forma de madeirite fino (6 mm) sobre a superfície escavada, que se mostrou bastante apropriado. Ressalta-se que é necessária uma ampla área de contato entre a forma e o solo subjacente, para se evitar a ocorrência de carregamentos concentrados em trechos pontuais da laje, prejudicando o seu comportamento.

Alguns detalhes serão preparados antecedendo a concretagem da laje de teto, visando garantir uma ligação eficiente entre esta e o revestimento interno do túnel. Nas proximidades da estaca metálica será disposta membrana de geocomposto (PVC no lado do solo e geotêxtil no lado interno que receberá posteriormente concreto projetado) além de barras de ferro convenientemente dobradas, a

serem colocadas em sua posição definitiva quando da concretagem no interior do túnel.

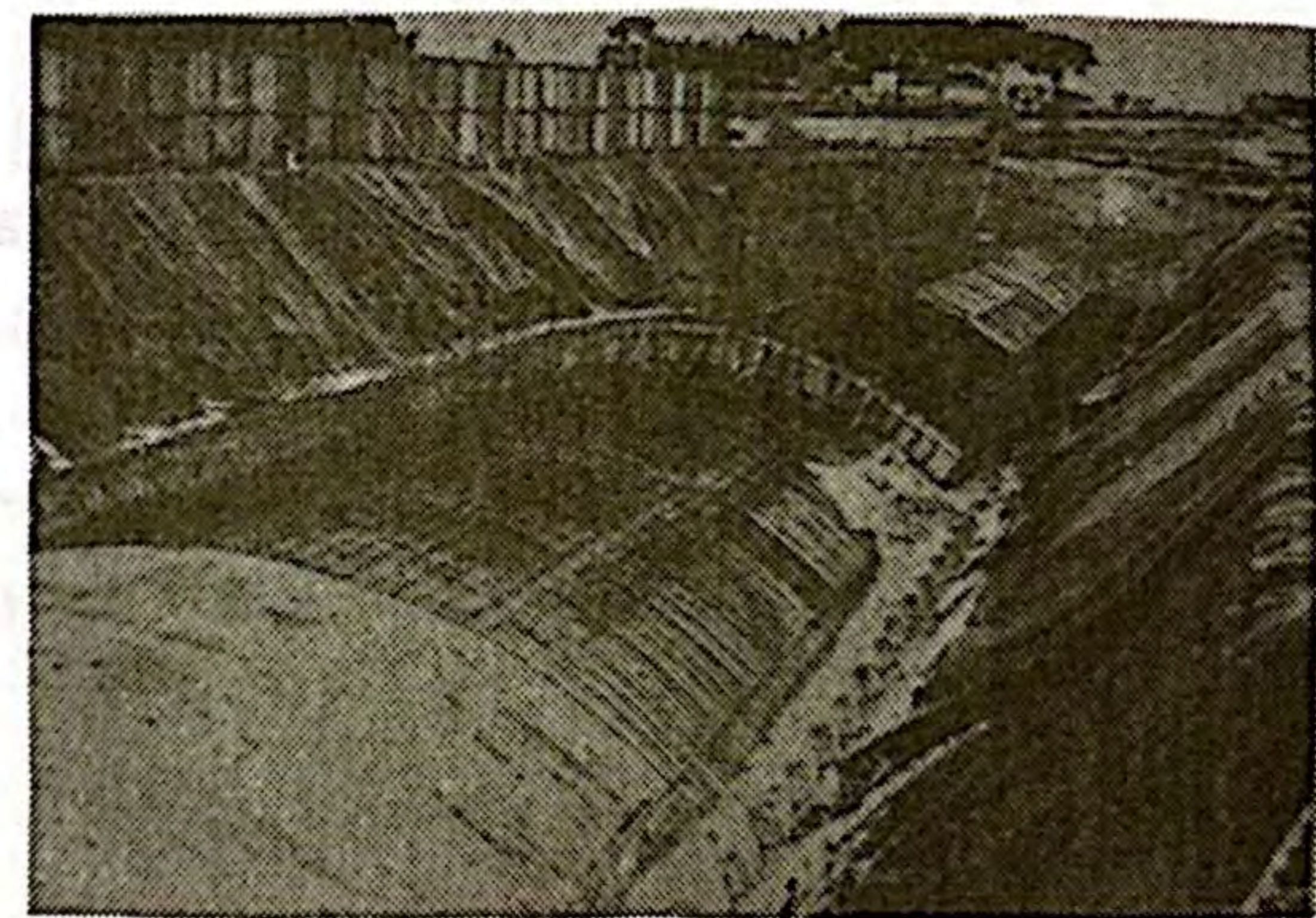


Figura 6. Vista da Trincheira Escavada, Forma e Armação da Laje de Teto.

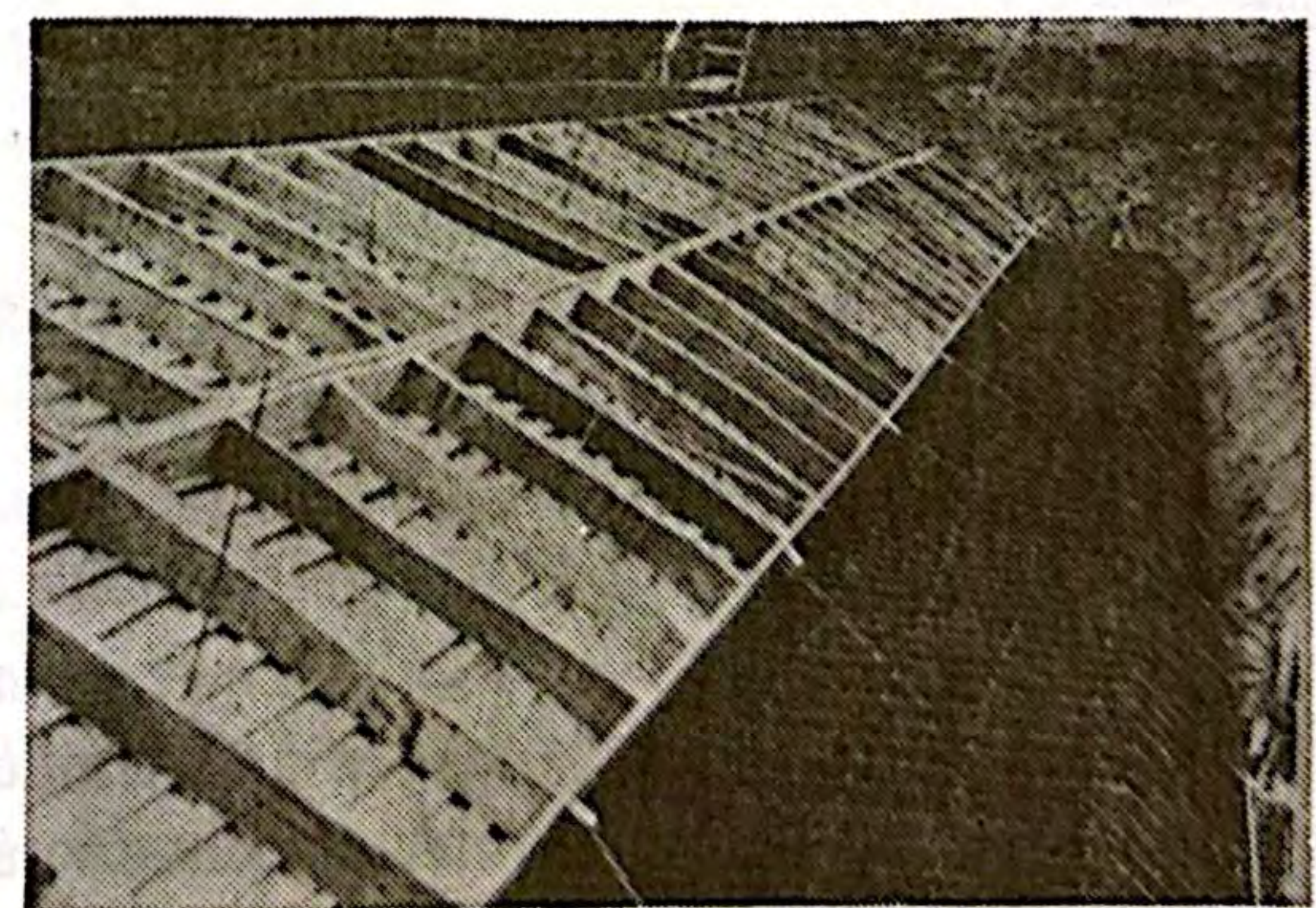


Figura 7. Detalhe da Forma Superior e Armação Sobre as Estacas.



Figura 8. Detalhe da Retro-Escavadeira Adaptada para a Cravação dos Perfis Metálicos.



Figura 9. Detalhe da Armação na Cabeça da Estaca e Manta de Geocomposto.

A membrana será colocada inicialmente em forma “sanfonada” e protegida por camada de areia. Após a escavação interna a manta será estendida sobre a superfície escavada do solo, sendo aplicado concreto projetado sobre a mesma. Sua função será a de impermeabilizar a junta entre a laje de teto e o revestimento interno do túnel. A ferragem a ser desdobrada

garantirá a continuidade estrutural do revestimento.



Figura 10. Vista da Operação de Cravação

6 INSTRUMENTAÇÃO PREVISTA

A instrumentação prevista segue a usual para túneis NATM, empregando-se marcos de recalque superficial, tassômetros, pinos de convergência, inclinômetros, medidores de nível d'água, etc. Com o intuito de estudar em maiores detalhes os processos de transferência de cargas do método executivo em implantação, foi prevista a inclusão de strain gages no topo dos perfis metálicos, nas barras das gaiolas de armação, etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Metrô-DF a permissão para a publicação dos dados ora apresentados, aos profissionais da TC/BR – Tecnologia e Consultoria Brasileira S/A, empresa responsável pelo projeto das obras do Metrô-DF, da Bureau de Projetos e Consultoria e do Metrô-DF, pela colaboração no preparo do presente artigo.

REFERÊNCIAS

Sauer, G. (1988) Further Insights Into the NATM, *Werner Memorial Lecture, Tunnelling 88*, British Tunnelling Society, London, GBR.