

**HOCHTIEF
MONTREAL
DECONSULT**

**Sistema Integrado de
Transporte Rápido Coletivo da
Cidade de São Paulo**

2

**Estudo Técnico
Pré-projeto de Engenharia**



Entrego a público, na qualidade de Prefeito de São Paulo, os **Estudos Sócio-Econômicos, de Tráfego e de Viabilidade Econômico-Financeira** e o **Estudo Técnico — Pré-Projeto de Engenharia** para construção do sistema de transporte rápido em massa — Metrô — que já começou a ser implantado na maior cidade brasileira.

Elaborados com a participação equitativa de firmas e técnicos nacionais e de origem alemã, a responsabilidade pelo alto nível dos trabalhos irmana e exalta ambas as técnicas, ora a serviço do progresso de São Paulo.

No primeiro trabalho (vol. 1) reúnem-se os resultados e conclusões de pesquisas, análises, diagnoses e prognoses, conduzidas com recurso aos mais rigorosos processos e métodos da técnica moderna, ficando plenamente explicitada a exata amplitude matemática de tudo aquilo que, numa primeira fase, se intuíra como realidade ou que, apenas de forma necessariamente superficial, se pudera mensurar.

Resultam também comprovadas, quer a necessidade da inadiável construção do Metrô, quer a perfeita viabilidade do empreendimento face aos recursos financeiros disponíveis ou mobilizáveis, quer a rentabilidade da futura operação do sistema, quer o alcance social de sua implantação no suprir carência hoje suportada, principalmente, pela imensa massa de trabalhadores da comunidade

paulistana que, como ensejam entrever as projeções estatísticas, será integrada, dentro de 15 anos, por mais de 10 milhões de habitantes.

Por sua vez, o Estudo Técnico — Pré-Projeto de Engenharia (vol. 2) equacionou os problemas concretos para a execução da obra que será desenvolvida ao longo de uma rede básica, de 66 km, cujo dimensionamento e traçado consideraram todos os estudos anteriores, máxime as contagens, diagnósticos e respectivas revisões e atualizações, que permitiram definir, desde logo, a primeira linha e exigiram o complexo processamento da pesquisa de origem — destino para seu ajustamento e definições finais.

Além disso, para o Pré-Projeto de Engenharia foram avaliadas, exaustivamente, as características viárias, topográficas e geológicas da urbe, bem como a ponderação de custos entre as várias alternativas possíveis.

Firmou-se, assim, a concepção técnica básica da maior obra de engenharia urbana jamais realizada no país. E, a partir desse roteiro, os problemas de cada trecho puderam ser enfrentados na fase de detalhamento que, por sua vez, possibilitou o início das obras.

Desta forma, os dois volumes que, como esclarecimento e prestação de contas, ora entrego ao domínio público, refletem e coroam

um árduo período de trabalho e reflexão, durante o qual o estudo crítico, a ponderação metódica, as avaliações rigorosas e as estimativas realistas, constituíram-se em norma rotineira e, ao final, ensejaram à Administração Municipal decisão de tal responsabilidade e de tão profundo alcance econômico e social.

No espigão do Jabaquara, a 14 do corrente mês, coube-me a honra e ventura de presidir o início das obras, destinadas a desencadear um amplo processo de estímulo ao desenvolvimento econômico e social de São Paulo e do Brasil.

A Linha Norte-Sul da cidade começou a ser rasgada, dando consistência a um sonho acalentado por meio século. Milhares de operários, equipes de engenheiros, calculistas, projetistas e técnicos de vários níveis, sob o comando da Companhia do Metropolitano de São Paulo, irão constituir a vanguarda de um exército maior que participará da mesma batalha nas indústrias de material rodante, de máquinas e equipamentos, de construção civil, elétrica e eletrônica, siderúrgicas, enfim extrativas ou de transformação, todas elas solicitadas a participar significativamente com seu esforço produtivo.

O mercado de trabalho ampliar-se-á, desta forma, ao impacto das necessidades de mão de obra, sendo certo o afluxo de brasileiros de todos os rincões, ávidos por se associarem

à glória de construir, pioneiramente no país, o metrô paulista.

Paralelamente, a tecnologia nacional continuará a bem desincumbir-se do encargo de assimilar, criticar, inovar e adaptar as técnicas desenvolvidas alhures à nossa realidade e às características de nosso país. E a mocidade brasileira passará a contar com um gigantesco laboratório e campo de pesquisas e treinamento desde já abertos a todas as Universidades.

Além disso, trata-se de obra que deverá prosseguir no tempo, pois as estimativas do Plano Urbanístico Básico de São Paulo indicam para 1990 a necessidade de cerca de 390 km de vias expressas e 360 km de linhas de Metrô para atender mais de 10 milhões de habitantes somente no Município de São Paulo.

Eis o quadro — epopéia mesmo — cujo retrato extravasará o texto, hoje liberado, delineando-se, ao longo do tempo, em contornos e matizes vários, no contexto do desenvolvimento de nossa terra.

Sintetizando-o superficialmente neste preâmbulo, seja-me dado finalizá-lo partilhando, por igual e dispensando citações, com os dedicados e leais companheiros de Administração, o mérito de tão importante iniciativa, que, desde o início, contou com o brilho e o entusiasmo de sua capacidade administrativa e técnica.

São Paulo, dezembro de 1968

J. V. de Faria Lima
J. V. de Faria Lima
Prefeito

Grupo Executivo do Metro
(de 31-8-66 a 24-4-68)

Coordenador
Francisco de Paula Quintanilha Ribeiro

Secretário Executivo
Marco Antonio F. Mastrobuono

Membros
Alberto Pereira Rodrigues
Antonio Delfim Netto
José Carlos de Figueiredo Ferraz
Luiz Carlos Berrini Junior
Luiz Carlos dos Santos Vieira
Maury de Freitas Julião

**Companhia do Metropolitano de
São Paulo — METRO**
(constituída em 24-4-68)

Presidente
Francisco de Paula Quintanilha Ribeiro

Vice-Presidente
Armando Costa de Abreu Sodré

Superintendente
Luiz Carlos dos Santos Vieira

Diretor Técnico
Marco Antonio F. Mastrobuono

Diretor Financeiro
Raimundo Cabral

Diretor de Serviços Externos
Maury de Freitas Julião

Diretor Administrativo
Luiz Carlos Berrini Junior

Diretor de Relações Públicas
Luciano Nogueira Filho

Membros do Conselho Fiscal

Efetivos
Antonio Rodrigues Alves Neto
Boaventura Farina
Januario de Crescenzo

Suplentes
José Vasques Bernardes
Sebastião Carneiro Giraldes
Maurício Grimberg

HOCHTIEF - MONTREAL - DECONSULT
ESTUDOS DO METRÔ DE SÃO PAULO

São Paulo, 8 de outubro de 1968

P - MSP - 0/541
MM/vrg/51-01-02

A
Cia. do Metropolitano de São Paulo - Metrô
Rua Florêncio de Abreu, 301 - 3º
CAPITAL

Ref.: Relatório Final sobre o Estudo Econômico-Financeiro
e sobre o Pré-Projeto de Engenharia de Sistema de
Transporte Rápido e em Massa de Passageiros de São
Paulo.

Prezados Senhores,

Em cumprimento da cláusula 15 do nosso contrato,
entregamos em maio do corrente ano os resultados dos nossos estu-
dos.

Todos os capítulos dos citados resultados foram
nos meses seguintes objeto da mais acurada análise por parte dos
técnicos e especialistas de sua Companhia. Naquela ocasião, de a-
côrdo com a cláusula 2.1 do contrato, estivemos à disposição de V.
Sas. para muitos comentários adicionais, tendo sido esclarecidas -
todas as questões em aberto, em entendimentos conjuntos.

Igualmente, todos os itens do seu Of. P/018/68,-
de 4.7.1968, foram levados devidamente em conta e considerados em
nosso Relatório. Submetemos especialmente os textos em português-
do nosso Relatório a uma cuidadosa verificação por parte do Sr. Prof.
Paulo Mendes da Rocha, acreditando portanto que agora, particular-
mente no que diz respeito aos termos técnicos, tenha sido atingida
a necessária clareza dos textos.

Entregamos a V.Sas. os textos elaborados e par-
cialmente reescritos do nosso Relatório Final e acreditamos que os
mesmos correspondam inteiramente aos desejos de V.Sas.

Enviamos esses textos também à tipografia, sendo
que esta última imprimirá 3.000 exemplares, solicitados por V.Sas.
em virtude da particular importância do Relatório.

...2

HOCHTIEF - MONTREAL - DECONSULT
ESTUDOS DO METRÔ DE SÃO PAULO

P - MSP - 0/541

Fl. 2

Aproveitamos o ensejo para transmitir ao seu
muito prezado Sr. Presidente, aos seus Srs. Diretores, bem co-
mo a todos os seus Srs. Técnicos, Especialistas e colaborado-
res, os nossos mais sinceros agradecimentos pela preciosa co-
laboração e significativos préstimos que nos foram concedidos
durante todo o tempo de estudo e que contribuíram sensívelmen-
te para a realização dos extensos trabalhos no curto prazo dis-
ponível.

Com os nossos protestos da mais elevada esti-
ma e consideração, subscrevemo-nos,

Atenciosamente,

Mackel

Dipl. Ing. C. Th. Mackel
Diretor do Projeto

Cyrolino de Oliveira Guimarães Filho
Eng.º Cyrolino de Oliveira Guimarães Filho
1º Vice-Diretor do Projeto

cc.: HT Essen
HT do Brasil
Montreal
Deconsult

**HOCHTIEF
MONTREAL
DECONSULT**

HOCHTIEF
Aktiengesellschaft
für Hoch- und Tiefbauten
vorm. Gebr. Helfmann
Essen/Alemanha

MONTREAL
Empreendimentos S.A.
Rio de Janeiro/Brasil

DECONSULT
Deutsche Eisenbahn
Consulting G.m.b.H.
Frankfurt/Alemanha

Diretor do Projeto

Dipl. Ing. Carl Th. Mäkel
Diretor da Hochtief A.G.

Planejamento gráfico
Arquiteto João Carlos Cauduro
Arquiteto Ludovico Martino

Produção e impressão
Companhia Litográfica Ypiranga
maio 1968/fevereiro 1969

10. Notas preliminares em relação ao estudo técnico

A seleção internacional promovida pela Prefeitura Municipal de São Paulo, em outubro de 1966 para projeto de um sistema de transportes coletivos capaz de resolver os problemas complexos do tráfego urbano da cidade de São Paulo exigiram, a par de estudos técnicos minuciosos das características regionais, pesquisas em profundidade das demandas de tráfego e das condições sócio-econômicas dos seus usuários capazes de conduzir a uma visão global dos problemas específicos e à escolha definitiva do sistema de transportes, entre tantos, o mais adequado, compreendendo uma avaliação objetiva dos custos de implantação, do equipamento, da operação e da conservação.

10.1. Dados básicos de urbanismo e economia de tráfego para o estudo técnico

Na primeira fase do presente trabalho foram, portanto, realizados estudos detalhados de urbanismo, de técnica de transportes urbanos e da viabilidade econômica, tendo em vista a solução dos problemas atuais e futuros da metrópole de São Paulo.

A análise dos dados estatísticos relativos ao tráfego rodoviário e ferroviário, bem como as pesquisas para conhecimento das demandas atuais de transporte e sua evolução, permitiram estabelecer um quadro suficientemente preciso das características do tráfego urbano, não apenas no que respeita aos volumes, direções preferenciais e sentido dos deslocamentos populacionais, senão também dos sistemas e recursos de transporte utilizados. Como consequência das condições urbanísticas peculiares ao desenvolvimento radial da cidade de São Paulo, esses estudos, condensados em gráficos e tabelas ilustrativas, revelam a existência de um tráfego interno mais ou menos constante e difuso — que um astronauta poderia confundir com o movimento browniano das partículas coloidais — ao qual se superpõe um acentuado fluxo periódico e alternativo entre o centro e os bairros periféricos residenciais, agravando de maneira já insuportável, nas horas de maior intensidade, os problemas de transporte urbano.

Em geral, essas correntes concentram-se nas vias radiais de maior capacidade. Sendo estas, entretanto, em número insuficiente, o tráfego distribui-se com frequência

indesejável pelas ruas secundárias ou procura itinerários mais favoráveis através dos caminhos menos freqüentados. Assim, as correntes de tráfego constatadas não obedecem às vias naturais de escoamento, contribuindo para agravar as precárias condições urbanísticas e sanitárias das próprias zonas residenciais da metrópole.

Circunscrevendo o núcleo central da cidade tendem à estabelecer-se, igualmente, correntes prejudiciais de tráfego interno muito pronunciadas, resultantes da necessidade de evitar as zonas mais congestionadas com sacrifício, às vezes sensível, das distâncias percorridas. Esse fenômeno verifica-se, por exemplo, na Avenida Paulista.

A disseminação do tráfego pelas ruas secundárias, geralmente mais estreitas e menos ventiladas, contribui para a poluição mais acentuada da atmosfera, para a difusão do ruído, para o agravamento de tantos dos problemas municipais de conservação e higiene.

Segundo os dados estatísticos analisados com vistas à elaboração do presente trabalho, entretanto, cada habitante de São Paulo desloca-se, dentro do perímetro urbano, apenas 390 vezes em média, por ano, o que corresponde, paradoxalmente, a um limite mínimo quando comparado a qualquer das grandes metrópoles do mundo. Com o crescimento demográfico e melhoria do nível de vida nos próximos anos, essa mobilidade tenderá, naturalmente, a aproximar-se dos níveis normais, agravando a carência dos meios de transporte urbano.

Dentro da área abrangida pela pesquisa, que se considerou necessário estender para além dos limites restritos da cidade, tendo em vista o atendimento das necessidades de tráfego entre a zona periférica e o centro urbano, as projeções estatísticas indicam, para 1986, uma população provável de 12,1 milhões de habitantes com uma demanda de 17,2 milhões de viagens por dia. Este valor corresponde a um índice médio de 1,42 viagens por pessoa e dia.

A análise cuidadosa dos dados estatísticos referentes ao tráfego de passageiros em São Paulo revela, entretanto, algumas curiosas anomalias que demonstram a necessidade imperiosa de remodelação fundamental da estrutura de transportes urbanos. No computo dos passageiros transportados, por exemplo, os ônibus participam com 63%, os automóveis particulares e taxis com 28%, as ferrovias, no perímetro urbano, com

apenas 6,5% e outros meios de transporte com 2,5%. O número de veículos individuais que, segundo dados de 1967 é, apenas, de um automóvel para 14 habitantes em São Paulo, está longe de atingir os índices de dois a quatro habitantes por veículo nos EUA. ou quatro a cinco pessoas por automóvel nas grandes cidades européias.

Paralelamente, contra uma média mundial de 40 ônibus para cada grupo de 100.000 habitantes, São Paulo mantém em tráfego 139 veículos coletivos para cada grupo de 100.000 pessoas, a maioria dos quais com propulsão a óleo e motores velhos ou desregulados, em todo caso responsáveis por uma agressiva e desnecessária poluição da atmosfera.

Com o aumento desses mesmos meios obsoletos de transporte que se tornariam necessários ao atendimento da demanda prevista em 1987, se pode calcular, de acordo com dados da World Health Organisation, que a produção diária de hidrocarburetos altamente nocivos à saúde provenientes em parte da queima incompleta dos combustíveis, deverá atingir cerca de 600 toneladas diárias, ao mesmo tempo que a produção de mono-óxido de carbono descarregado no ar, como produto da própria combustão, será de ordem de 6.000 toneladas.

Nas cidades abertas ou nas cidades litorâneas onde os ventos periódicos contribuem para uma renovação permanente do ar, essas cifras, embora alarmantes, poderiam ser toleradas. Nas aglomerações interiores, entretanto, onde não existem esses mesmos fatores locais de circulação das massas de ar, o exagerado desenvolvimento desses sistemas de transporte é, necessariamente limitado pelas próprias condições de sobrevivência das próprias populações que pretendem servir.

Além dessas considerações, sem dúvida de fundamental importância, principalmente para uma cidade com as condições meteorológicas de São Paulo, cumpre considerar o próprio limite intransponível do número de veículos em relação às áreas e à capacidade de circulação nas ruas.

Os mesmos dados estatísticos que vimos analisando destacam ainda a conclusão, igualmente paradoxal, de que a cidade de S. Paulo, com uma área disponível de vias públicas correspondente a 22,2% da área total urbana, apresenta problemas de tráfego incomparavelmente mais graves que outras grandes cidades e, em particular, Londres e Nova Iorque,

com menos de 20% de área útil viária.

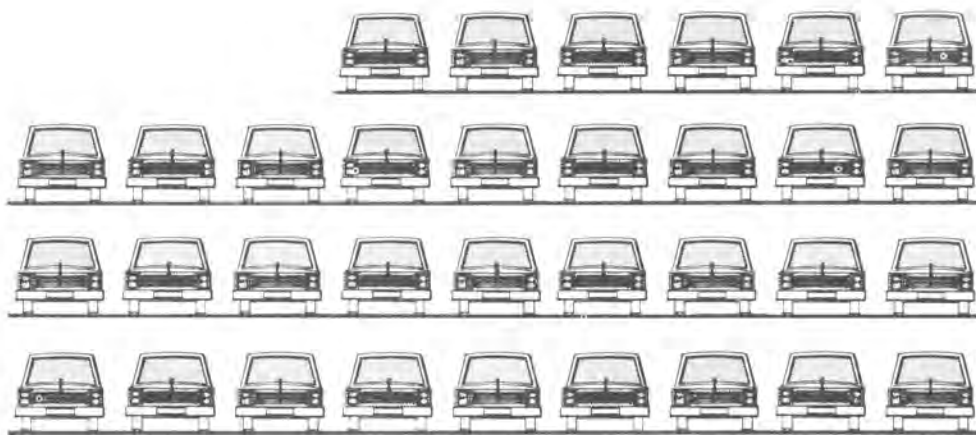
Os prejuízos computáveis em hora-hora de trabalho por dia, ou por ano, decorrentes apenas desses problemas de congestionamento e do tempo perdido em transportes, estão a demonstrar a urgência de solução do problema e a impossibilidade de atendimento das demandas, atuais e aceleradamente crescentes, do tráfego urbano de S. Paulo dentro dos sistemas convencionais até hoje empregados.

Para solucionar os problemas atuais do tráfego interno de S. Paulo, abrindo possibilidades efetivas de previsão das necessidades futuras, outros sistemas, já consagrados pela técnica e pela experiência, deverão ser procurados.

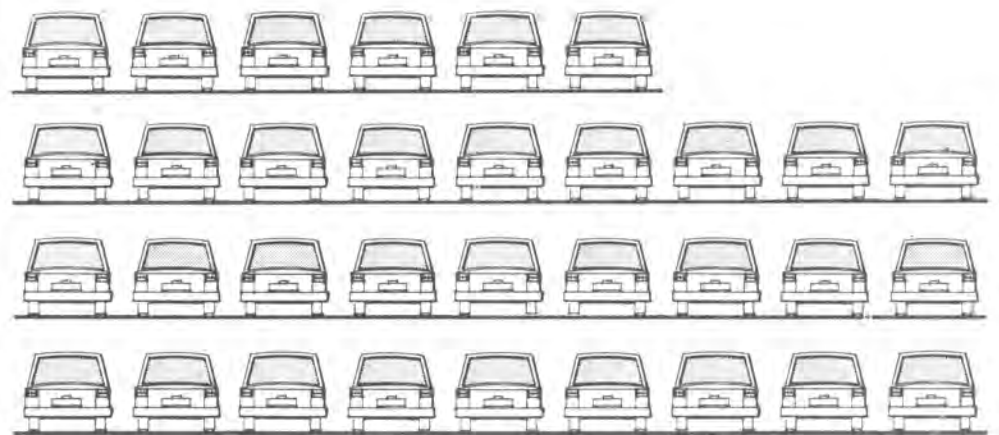
Da análise dos gráficos 10.1, 10.2 e 10.3, conclui-se que, dentre os vários sistemas possíveis de transporte em massa de passageiros nas grandes cidades, as ferrovias especialmente projetadas e operadas, oferecem, principalmente em virtude das áreas relativamente reduzidas que ocupam, uma série de vantagens que impõe esses sistemas, geralmente designados por "Metrô", como solução irrecusavelmente adotada em todas as metrópoles modernas que, como Nova Iorque, Londres, Paris e tantas outras enfrentaram em uma fase do seu desenvolvimento, os mesmos problemas quase insuperáveis com que se debate a cidade de São Paulo. Nessas cidades, em particular, os sistemas de transporte urbano ferroviário, chegam a absorver 60% dos transportes internos de passageiros.

Em São Paulo existem apenas dois trechos ferroviários servindo ao tráfego suburbano: o primeiro na direção Leste-Oeste e o segundo, um trecho diagonal de Sudeste para Nordeste. Não obstante constituírem seções de estradas de ferro de alto gabarito, a organização de tráfego desses trechos, subordinada às mesmas normas e contingências da rede geral a que pertencem, não permite que atendam às demandas das suas respectivas áreas de influência. A rede considerável de linhas de bondes, por sua vez, que constituiu sem dúvida um dos fatores mais efetivos do desenvolvimento da cidade, não obstante os aperfeiçoamentos constantes das linhas e do material rodante, houve de ser abandonada em face das contingências naturais da evolução do tráfego urbano.

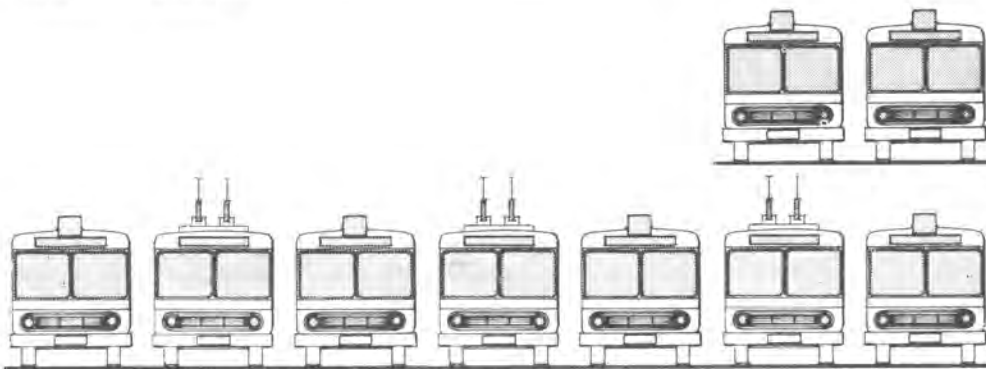
Essas considerações demonstram a necessidade imperiosa e urgente de



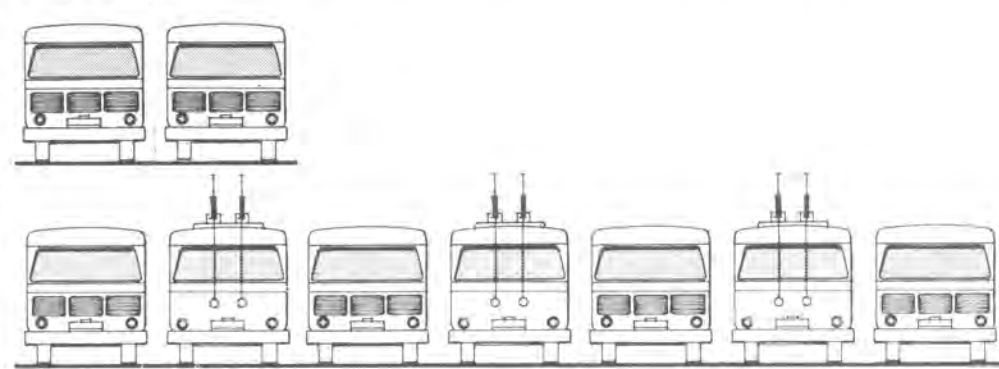
AUTOMÓVEIS : 33 FILAS, CORRESPONDENDO A UMA LARGURA DE 80 M.
VELOCIDADE : 11 KM/H
LOTAÇÃO : 4 PESSOAS



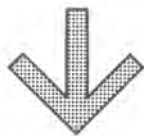
PRIVATE CARS : 33 LANES, CORRESPONDING TO A TOTAL WIDTH OF 80 M.
SPEED : 11 KM/H
LOAD : 4 PERSONS



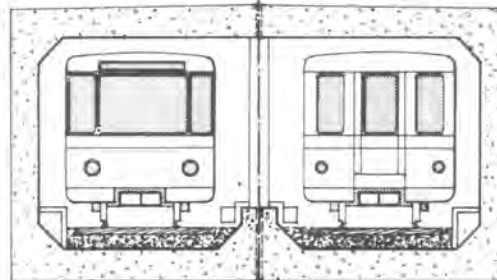
ÔNIBUS E TRÔLEIBUS : 9 LINHAS, CORRESPONDENDO A UMA LARGURA DE 27 M.
VELOCIDADE : 11 KM/H
INTERVALO : 30 SEGUNDOS



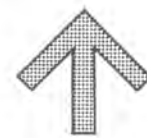
BUSES AND TROLLEYBUSES : 9 LANES, CORRESPONDING TO A TOTAL WIDTH OF 27 M.
SPEED : 11 KM/H
HEADWAY : 30 SECONDS



SISTEMA DE TRÂNSITO RÁPIDO (METRÔ) - 1 LINHA : 5.50 M.
VELOCIDADE : 35 KM/H
INTERVALO : 90 SEGUNDOS



RAPID TRANSIT SYSTEM (METRO) - 1 TRACK : 5.50 M.
SPEED : 35 KM/H
HEADWAY : 90 SECONDS



10.1

implantação de um sistema moderno de transportes urbanos, capaz de atender às exigências atuais e rapidamente crescentes, com o desenvolvimento de São Paulo. Os estudos técnicos e econômicos exaustivamente desenvolvidos no presente trabalho, com base na experiência universal das realizações mais modernas, indicam as diretrizes fundamentais que conduziram, entre tantas variantes possíveis à escolha de um sistema ferroviário como aquele que se evidenciou ser o mais adequado e ao traçado de uma rede inicial que se impôs devido às condições urbanísticas da cidade e das correntes dominantes de tráfego a atender.

Essa rede básica deverá ser desenvolvida de acordo com as plantas e perfis anexos, de maneira a constituir-se em eixo principal de um sistema integrado de transportes

visando a corrigir, de início, as deficiências mais graves do momento, sem embargo da condição precípua de adaptar-se às necessidades futuras de crescimento da cidade, sob todos os aspectos.

O projeto técnico apresentado pretende atender da melhor maneira à necessidade de perfeita articulação com os sistemas de tráfego e regimes tarifários existentes, visando, em particular, à criação de condições favoráveis de baldeação e intercâmbio nos pontos principais de tráfego, bem como de acesso aos terminais das linhas de ônibus que fazem o papel de coletores principais do sistema.

Para estimular o uso cada vez maior do novo sistema de transportes, aliviando ao mesmo tempo a circulação de veículos individuais, foram previstos espaços suficientes e

organização adequada para estacionamento de automóveis nas proximidades imediatas das estações principais e, em particular, nos bairros mais afastados, encorajando o hábito de adoção do sistema "park and ride".

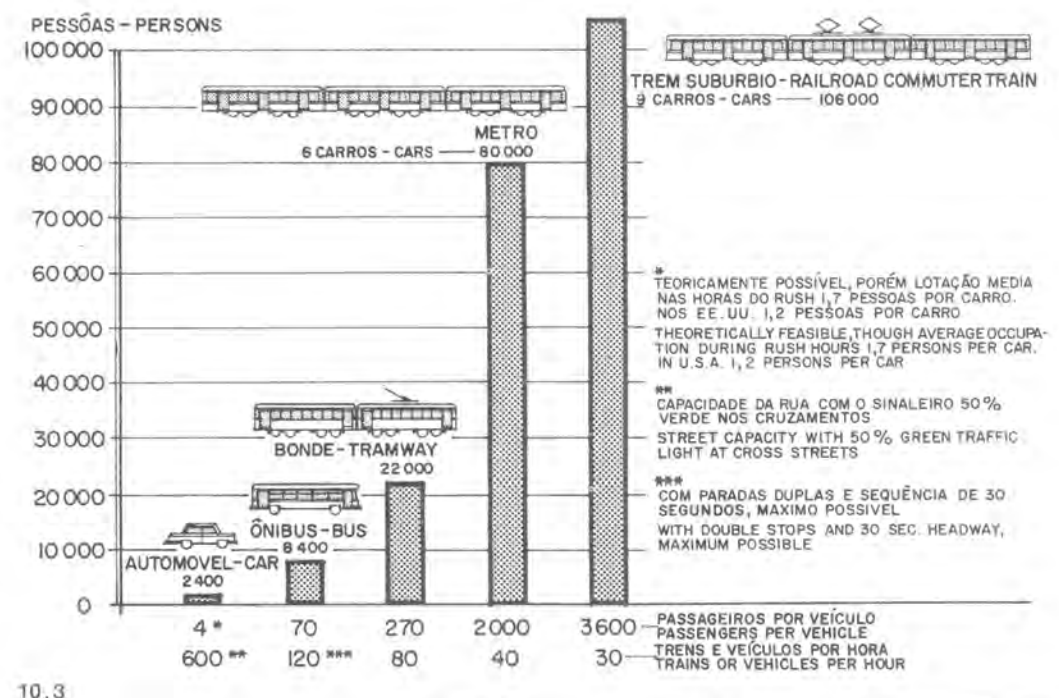
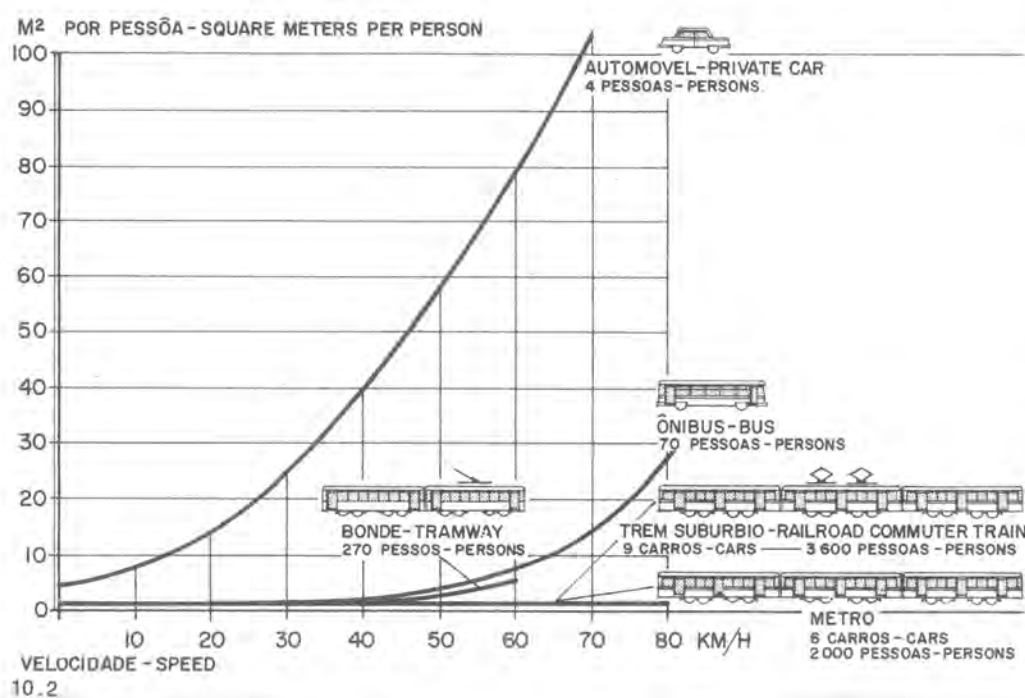
Essas providências, acrescidas das obras magníficas que vêm sendo realizadas pela Prefeitura Municipal de São Paulo no sentido de corrigir defeitos fundamentais de traçado e interferência das vias públicas de uma cidade que atingiu os maiores índices de desenvolvimento do mundo, possibilitarão, certamente, não apenas corrigir as angustiantes deficiências atuais, mas proporcionar à cidade de São Paulo as condições urbanísticas compatíveis com o elevado índice do seu desenvolvimento econômico e cultural.

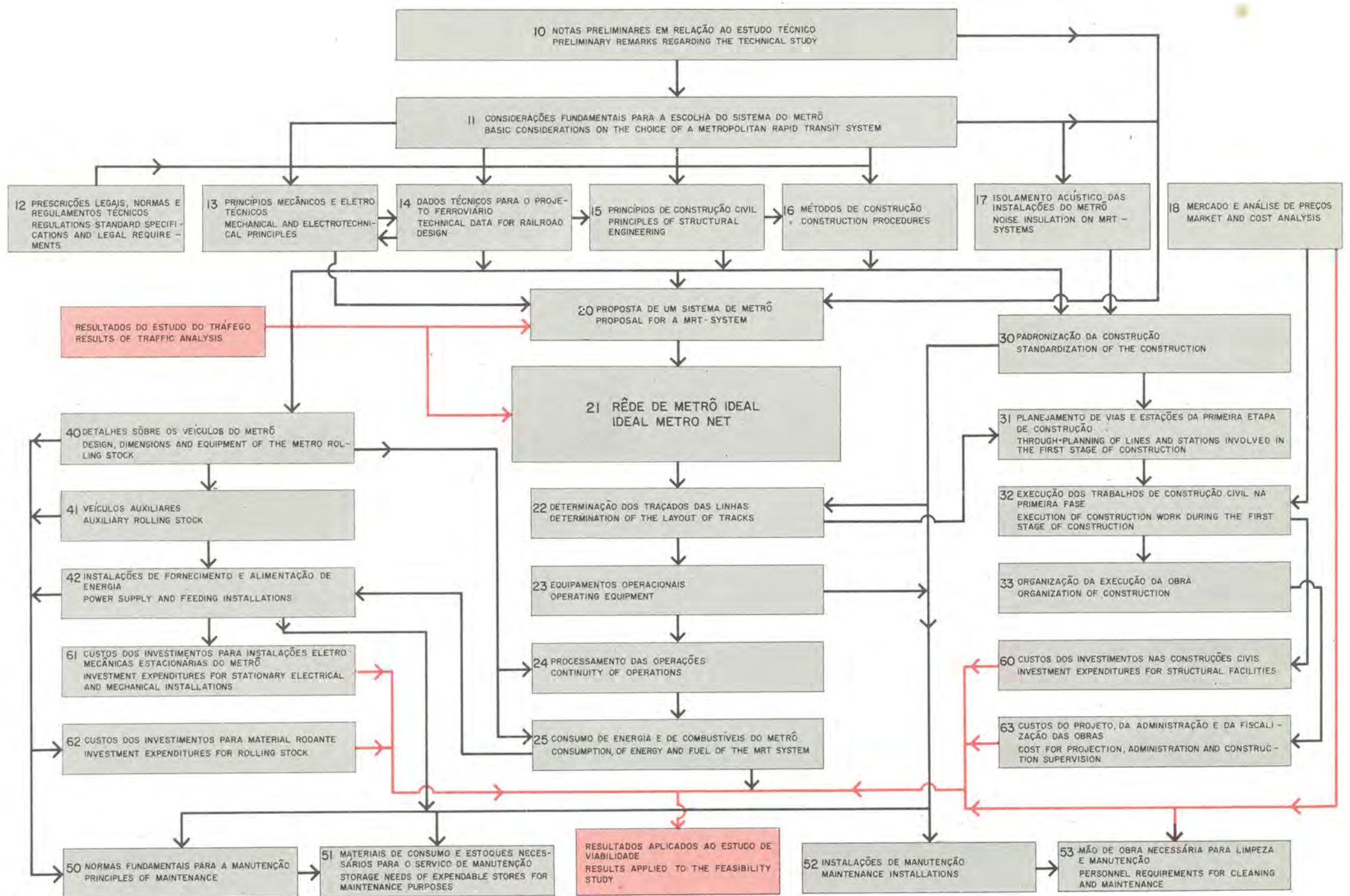
10.2. Metodologia do Estudo Técnico

As decisões técnicas finais, como, por exemplo, o traçado da rede do metrô e a escolha definitiva do tipo e características do material rodante somente poderão ser tomadas dentro de um contexto global, quando todas as condições técnicas e de tráfego estiverem determinadas.

Se bem que os estudos urbanísticos, sócio-econômicos e de tráfego devem ser considerados, em seu conjunto como base para o estudo técnico, algumas idéias e princípios gerais de imediata importância para o mesmo, foram discutidos, de forma resumida, no capítulo 10.1.

Nos capítulos 11 a 18 são efetuados exames comparativos de algumas alternativas e adotadas, em princípio,





10.4

algumas decisões a respeito da escolha do sistema de metrô; as diretrizes e normas a serem empregadas; o dimensionamento do carro, das instalações ferroviárias e edificações, bem como sobre os métodos de execução das obras e da proteção contra ruídos.

Além disso ainda são descritos os resultados de pesquisas de mercado e dos estudos geotécnicos.

Somente nesse estágio do estudo técnico é possível iniciar-se a discussão sobre a formação da rede do metrô. Aqui a demanda de transporte, através de um modo de observação macroscópico, deverá ser atendida com a oferta de uma rede de linhas tecnicamente realizáveis.

A rede assim esboçada e desenvolvida nos capítulos 22 a 25, até certo

detalhamento técnico, é examinada no capítulo 21 em relação a suas possibilidades funcionais relativas ao tráfego. Este exame é efetuado mediante a alocação dos resultados da pesquisa domiciliar sobre a rede total do transporte integrado, com o auxílio de um computador.

Todas as vezes que esses estudos revelam sobrecargas locais da rede do metrô, deverão ser apresentadas soluções para estas zonas, como, por exemplo, através de adaptação da rede.

Após estas correções a rede estará fixada, inclusive as futuras possibilidades de ampliação.

Os capítulos 30 a 33 tratam de todas as questões técnicas isoladas que surgem durante a construção dos trechos de linhas.

Assim, todos os assuntos relativos ao maquinário e ao equipamento eletrotécnico, bem como à construção dos carros, são abordados nos capítulos 40 a 42. Os capítulos 50 a 53 versam sobre questões de manutenção.

Todas as características técnicas exercem influência sobre os custos de investimentos e de execução. Os capítulos 60 a 63 apresentam a repercussão desses estudos técnicos sobre o estudo de viabilidade econômica e financeira, sobre o valor dos investimentos para as edificações, para as instalações elétricas estacionárias do metrô e para o material rodante. Além disso, os custos de projeto, de administração e de fiscalização das obras são apresentados em separado.

Devido a esta estruturação lógica fica

assegurado que todos os assuntos a serem tratados neste estudo técnico preliminar, possam ser elucidados com a suficiente amplitude.

Visto ser difícil dar uma visão completa da metodologia deveras complexa do planejamento de um metrô, o desenvolvimento desta metodologia é apresentado através de um diagrama de seqüência (Fig. 10.4).

Somente assim as influências e dependências recíprocas da coordenação e a seqüência lógica do planejamento tornam-se claramente visíveis.

Fig. 10.1
Capacidade dos transportes urbanos para transportar, num sentido, 80.000 passageiros por hora

Fig. 10.2
Área de rua necessária, por passageiro, nos diferentes tipos de veículos e velocidades

Fig. 10.3
Capacidade dos veículos por hora e faixa

Fig. 10.4
Metodologia do estudo técnico

11. Considerações fundamentais para a escolha do sistema de metrô

11.1. Análises de meios de transportes coletivos urbanos

11.1.1. Generalidades

Quando, pouco antes do início do século, surgiu nas grandes cidades o problema de transportar grande quantidade de pessoas, recorreu-se à estrada de ferro. Já naquela época reconheceu-se acertadamente, que transporte dessa natureza só pode ser eficiente, quando se dispõe de meios de transporte de alta capacidade e rendimento. Os veículos sobre trilhos satisfaziam tais condições. A junção de vários veículos permite formar unidades de transporte com capacidade para grande número de passageiros.

Dêsses requisitos, surgiram os bondes e o metrô. Infelizmente, o desenvolvimento dêsses veículos nem sempre acompanhou o desenvolvimento técnico geral. Em muitas localidades, metrô em deplorável estado de funcionamento, ruidosos e mal cuidados, deixaram no grande público a impressão de que o veículo sobre trilhos tradicional está ultrapassado e irremediavelmente superado. Esta concepção propiciou o desenvolvimento de novos sistemas, já que muitas empresas de metrô hesitaram na modernização de suas instalações e veículos.

Os exemplos mais conhecidos e mais desenvolvidos de novos sistemas de transportes ferroviários são o trem Alweg, como "trem a cavalete", o trem SAFEGE, como trem suspenso, e o trem baseado no sistema convencional sobre rodas pneumáticas, do Metrô de Paris.

De cada um dêsses sistemas existem diferentes alternativas, mas não lograram importância suficiente para ser encaradas com seriedade. Mesmo o trem suspenso de Wuppertal, com mais de 50 anos de serviços prestados, encontra-se entre essas alternativas, pois já está superado do ponto de vista de construção. Também o "Sky-Bus", sobre rodas pneumáticas, de Pittsburgh, deixa de ser examinado de perto, pois não é adequado para o transporte de grandes massas de passageiros, como é o caso em São Paulo.

Além dos já citados sistemas, outros foram propostos, os quais ou não se adaptam às exigências de um metrô, por motivos de construção, ou demorarão ainda vários anos ou mesmo decênios para chegar ao estágio final de aperfeiçoamento. A propósito podem ser citados os veículos sobre almofadas de ar,

totalmente impróprios para operar em túnel, as concepções de transporte por tubos pneumáticos, bem como veículos deslizando sobre campo magnético.

Os trens Alweg e SAFEGE e os veículos sobre pneumáticos do Metrô de Paris, porém, já foram construídos e, em parte, já estão funcionando há algum tempo. São mesmo às vezes citados como os meios de transporte do futuro. Suas vantagens e desvantagens serão por isso descritas a seguir e confrontadas com os veículos convencionais de via férrea.

11.1.2. O trem Alweg

A via de rodagem do trem Alweg é constituída por uma viga ôca de concreto, com uma superfície de rodagem no topo e 2 pistas de cada lado para as rodas de direção e de estabilização. Como as rodas apoiam-se diretamente sobre a superfície externa da viga, é preciso que esta seja construída com acurada precisão e com superfícies muito regulares. Isto não é particularmente difícil de se obter, pois o processo de fabricação é o de concreto protendido pré-moldado. Nela são inseridos também os dispositivos para a aplicação do terceiro trilho e tubulação. A viga de concreto repousa sobre suportes de apoio, situados em geral cerca de 20 m um do outro.

Para mudança de via foi projetado um tipo especial de agulhas, que, em linha reta, podem ser ultrapassadas em velocidade. Distinguem-se agulhas em arco e poligonais. As agulhas em arco são espécies de caixas retangulares flexíveis, feitas de aço ou de metal leve. As manobras de desvio podem ser realizadas a velocidades entre 40 e 45 km/h. Na agulha poligonal a viga de desvio é constituída por numerosas partes retas de viga, articuladas entre si de maneira a formar ângulos acentuadamente obtusos. A viga de rodagem comporta portanto nesses trechos uma superfície de rolamento poligonal de modo que a velocidade só pode ser, no máximo, de 12 a 20 km/h. As agulhas poligonais são contudo consideravelmente menos dispendiosas do que as agulhas em arco. A manobra da chave leva, de acordo com as indicações do fabricante, 10 segundos para ambos os tipos de agulha.

O conjunto de rodas do trem Alweg é constituído de rodas pneumáticas de tração e de direção (fig. 11.1). O peso do veículo é suportado pelas rodas de tração. No princípio eram montadas sobre eixos individuais, mas ultimamente fez-se uma

adaptação para truques, devido à capacidade de carga relativamente reduzida das rodas pneumáticas. As rodas direcionais que abarcam lateralmente a viga de rodagem, têm função dupla: assegurar, de uma parte, a direção do veículo e por outro lado, também, a estabilidade do veículo sobre a viga. Essa estabilização do veículo torna-se necessária para neutralizar a grande força lateral exercida pelos ventos e pela força centrífuga. Para atuar contra possíveis movimentos basculantes produzidos por essa força lateral, as rodas direcionais exercem sobre as faces laterais da viga uma pressão equivalente a 20% do peso.

As bases gerais de construção dos veículos de Alweg são as mesmas que para os veículos de estradas de ferro; sua configuração é, entretanto, consideravelmente dificultada pela disposição, em altura, de seu conjunto de rodagem e reduzida capacidade de sustentação de suas rodas de tração. No intuito de se conseguir o maior número possível de lugares, existe a tendência de se construir um veículo tão comprido quanto possível. O tamanho, contudo, aumenta o peso e, com o peso, o tamanho das rodas de tração. A adoção de grandes rodas traz uma série de dificuldades devido à sua situação sob o piso do compartimento dos passageiros, dado que a altura do veículo e a força de estabilização devem permanecer dentro de limites toleráveis. Procura-se contornar o problema embutindo-se a parte superior das rodas de tração no interior do compartimento e isolando-as por um revestimento em forma de caixa. Isto toma contudo grande espaço no interior do veículo. Nos tipos de veículos sobre truques deve-se levar em conta o ângulo do movimento lateral das rodas que exige a ampliação do tamanho dêsses revestimentos, o que dificulta uma disposição do compartimento de passageiros que por um lado comporte o máximo de passageiros por comprimento do trem, e, por outro lado, possibilite uma fluidez tal que nos casos de grande afluência assegure um fluxo rápido de embarque e desembarque nos pontos de parada.

Assim sendo, cerca de 30% da área do veículo não pode ser aproveitada como recinto de passageiros, o que, no caso de igualdade da capacidade exigida, leva a comprimentos maiores de trens e plataformas. Em consequência do maior número de veículos e dos custos unitários de aquisição, relativamente mais altos, os custos de aquisição de veículos convencionais, calculados sobre a área útil por passageiro, é somente 57% do custo do veículo de Alweg.

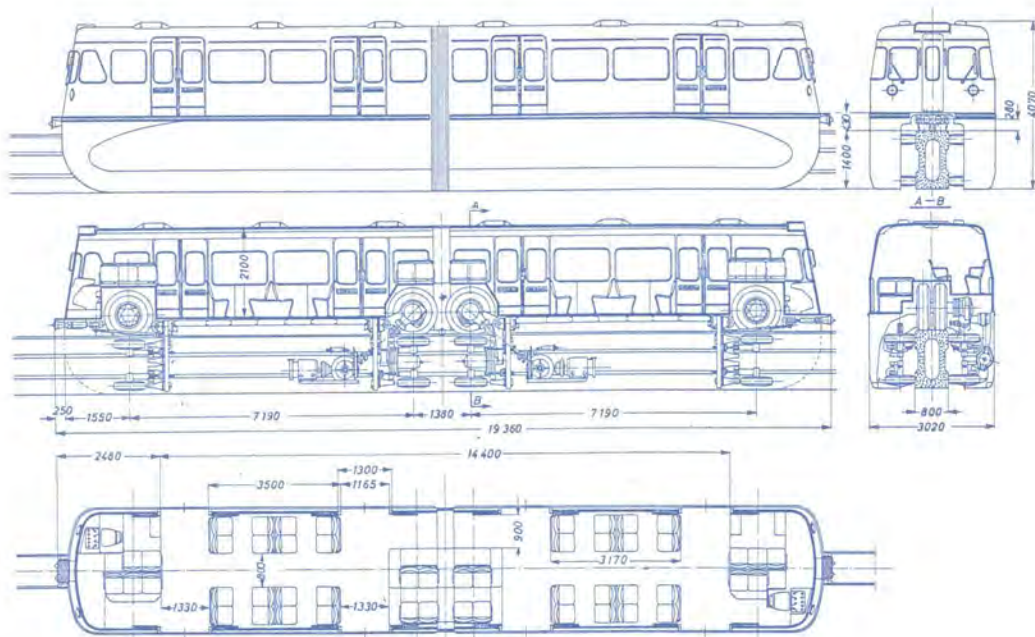
O trem Alweg em sua forma original de via elevada apresenta certas vantagens, pois as vigas de concreto sobre suportes de apoio utilizados para esse fim têm preço consideravelmente baixo. Quando, porém, construído em nível ou em túneis, não apresenta nenhuma vantagem no que se refere ao custo. Sobretudo nos túneis exige maior gabarito livre, e portanto maiores custos.

Em geral, o transporte de grandes massas de passageiros só pode ser obtido com sistemas de transporte cujas unidades se seguem, umas às outras, dentro de curtos intervalos de tempo, isto é, que com a respectiva alta capacidade de cada unidade, oferecem o maior rendimento.

A seqüência de trens mínima de certa maneira também depende do comprimento do trem (Cap. 23). Se este aumenta em 30%, o número possível de veículos por hora também diminui, se bem que não na mesma proporção.

Além disso, o movimento da agulha exige muito maior espaço: enquanto nas vias férreas convencionais o movimento das pontas da agulha precisa deixar livre apenas uma abertura necessária para a passagem do estreito friso da roda, essa abertura na agulha Alweg comporta a metade da largura do veículo, mais a metade da largura da viga, mais um afastamento de segurança. Nas condições de falta de espaço, freqüentes em um metrô, isto também constitui inconveniente, sobretudo nos pátios de estacionamento e nas oficinas. Pátios de estacionamento do tamanho exigido em um metrô seriam então praticamente impossíveis. Só haveria uma solução, que seria a de substituir os desvios por uma plataforma móvel, mas isto teria como consequência um aumento dos custos e certa lentidão nas operações. A configuração das oficinas também é sobremaneira dificultada, pois teriam que ser previstas plataformas de trabalho e vias internas de transporte especiais. Certas dificuldades também são encontradas quando um veículo, por motivos de dano, fica parado em um trecho de via elevada. Nas linhas de metrô convencionais há, em casos semelhantes, uma passarela especial de emergência, pela qual podem os passageiros atingir a estação mais próxima. No sistema Alweg instalado até hoje ou o veículo parado é rebocado por outro até a próxima estação, ou então os passageiros são obrigados a abandoná-lo por uma escada.

Cita-se como vantagem particular do trem Alweg, como aliás de todos os veículos sobre pneumáticos, o fato de



11.1

Fig. 11.1
Alweg — E.M.U.Fig. 11.2
Suspensão da ferrovia elevada de WuppertalFig. 11.3
Ferrovia suspensa "Skyway"Fig. 11.4
Truque do veículo "Safege"

11.1

ser pouco ruidoso e o alto aproveitamento de seu coeficiente de aderência. É muito natural que um pneumático rodando sobre uma superfície plana produza muito menos ruído do que uma roda de aço com menor amortecimento interno de ruídos. Ultimamente tem-se demonstrado que este inconveniente pode ser contornado com medidas apropriadas, obtendo-se o mesmo nível de ruído com rodas de aço ou com veículos sobre pneumáticos. (Fig. 11.1).

O coeficiente de aderência entre um pneumático e uma superfície plana seca é mais alto do que entre rodas de aço e trilhos de aço, de maneira que existe teoricamente possibilidade de uma taxa mais alta de aceleração.

Na prática, essa condição física não pode ser aproveitada ao todo, devido à existência de pessoas em pé nos veículos do metrô. Experiências das companhias de metrô e pesquisas nas escolas superiores demonstraram que o coeficiente de aceleração de metrô situa-se entre 1,35 a 1,40 m/s². O alto coeficiente de aderência só poderá ser aproveitado nos casos de frenagem de emergência.

Uma desvantagem dos pneumáticos em relação às rodas de aço é sua resistência ao rolamento, cerca de 10 vezes maior, proveniente da compressão elástica da borracha.

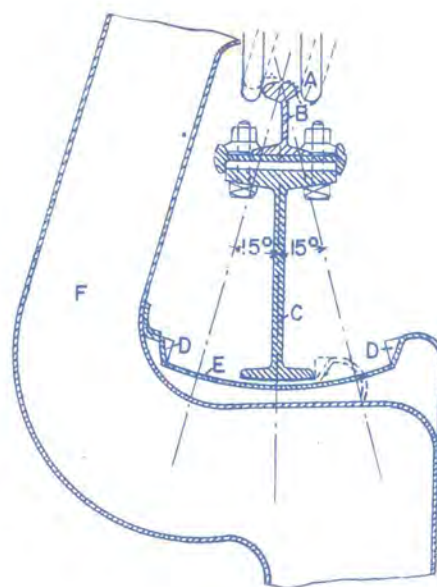
Acrescenta-se ainda a resistência produzida pela cinética da direção.

Aqui as rodas de tração são guiadas pelas rodas direcionais. Nas curvas, as rodas de tração têm que avançar em posição enviesada, concorrendo para o aumento da resistência à marcha. A 70 km/h esta resistência é cerca de 4

vêzes mais alta que a do metrô convencional. Elasticidade e avanço enviesado das rodas significam além disso grande desgaste dos pneus. O peso de veículos Alweg já construídos é de cerca de 1480 kg por metro linear.

O peso do veículo convencional apropriado para o Metrô de São Paulo (Fig. 40.20) será de aproximadamente 675 kg por metro linear. Considerando-se a diferença de capacidade de 30% entre os dois veículos, então o peso por passageiro de um veículo para metrô convencional será somente cerca de 52% do peso por passageiro de um veículo de Alweg. Os custos operacionais dos veículos sobre pneumáticos são consideravelmente superiores aos exigidos por veículos sobre rodas de aço.

As experiências operacionais do trem Alweg são provenientes das linhas experimentais de Colonia-Fühlgen na Alemanha, e de trechos existentes em Turim, Itália; em Seattle, EUA; Inuyama, Yomiuri e Toquio, no Japão. Com seus 13,2 km de linha o trecho Toquio-Haneda é o mais longo. Os veículos são impulsionados por corrente contínua de 750 V e atingem uma velocidade máxima de 100 km/h. As unidades são constituídas por três veículos conjugados perfazendo um comprimento total de 29,40 m. Com uma largura de 3,02 m e 4,31 m de altura, a unidade de 3 carros comporta 240 passageiros. A junção de duas unidades de 3 carros constitui uma composição completa. Relatórios posteriores à instalação dão conta de que os trens Alweg até hoje instalados satisfazem às expectativas neles depositadas. Não há notícia de acidentes que exigissem medidas de segurança suplementares.



11.2

- A — Roda portadora
- B — Trilho de rolamento
- C — Suporte dos trilhos
- D — Limitador
- E — Raio de limitação
- F — Dispositivo de suspensão da caixa do carro



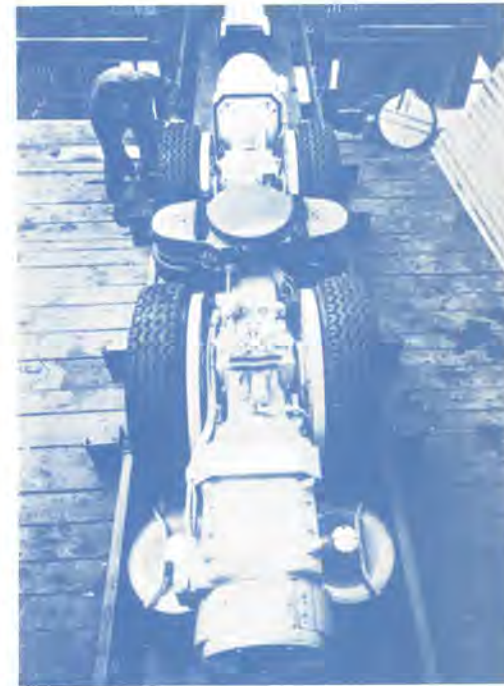
11.3

11.1.3. O trem SAFEGE

São inúmeros os inventores e construtores que se ocuparam com um meio de transporte baseado em trem suspenso. Todos eles partiram da idéia de um trem suspenso a uma linha de via única. O exemplo mais conhecido é, como já mencionado, o trem suspenso de Wuppertal, Alemanha. Uma variante moderna de trem suspenso de monotrilho é o chamado "sky-way", construído unicamente para fins de pesquisas (Fig. 11.3). O dispositivo de tração deste veículo é constituído de 8 rodas com pneumáticos. Dezesesseis outras rodas de borracha servem para a direção lateral do veículo. No caso de estouro de um dos 8 pneumáticos, a sustentação é feita por meio de rodas de aço. Também no Japão foi construído um trem suspenso seguindo o modelo do "sky-way".

Os trens suspensos em trilho único têm a desvantagem de sofrer fortes balanços, particularmente nos casos de fortes ventos laterais, provocando redução no conforto dos passageiros e exigindo vão livre lateral relativamente grande. O sistema SAFEGE (Société Française d'Études et de Gestion d'Entreprises) procurou sanar esses inconvenientes, afastando-se do princípio do monotrilho.

Pode-se dizer, em resumo, que este sistema foi derivado do sistema do trem suspenso monotrilho, aproveitando elementos de construção do Metrô de Paris, de truques com rodas pneumáticas. Os veículos SAFEGE estão suspensos a dois truques montados com pneumáticos. Cada truque possui 4 rodas horizontais movimentando-se sobre a prancha-guia e que se encarregam da



11.4

direção do veículo (Fig. 11.4). Paralelamente às rodas de tração estão dispostos discos de aço que garantem a sustentação do veículo em caso de estouro dos pneumáticos.

O par de trilhos é instalado dentro de uma viga ôca com uma abertura em sua face inferior para permitir a ligação entre os truques e o corpo do carro. A viga portadora dos trilhos pode ser de aço e pesa 800 kg por metro linear. São sustentadas por postes com forma de "L" invertido, nas linhas de via singela e com forma de "T", nas linhas duplas. As forças de torção, em casos de vento lateral ou nas curvas, são transmitidas à viga sem compensação do movimento transversal.

Como no sistema Alweg as instalações de desvios são aqui também complicadas e caras. São acionadas por um dispositivo eletro-hidráulico, e seus movimentos são constituídos por deslocamentos verticais e horizontais. A velocidade das operações de desvio é limitada. O tempo de operação da chave situa-se entre o de uma agulha comum de dois trilhos e o do sistema Alweg.

A tração do veículo é elétrica. O suprimento com energia e seu retorno são efetuados através de 2 trilhos especiais. A captação da corrente é feita por meio de pequenos coletores fixados aos truques. No projeto executado, todos os eixos do veículo são acionados.

A caixa do veículo do sistema SAFEGE é basicamente igual ao de um metrô comum. Como seu espaço interno não é reduzido pela incorporação de nenhuma instalação suplementar, há liberdade completa na projeção do veículo.



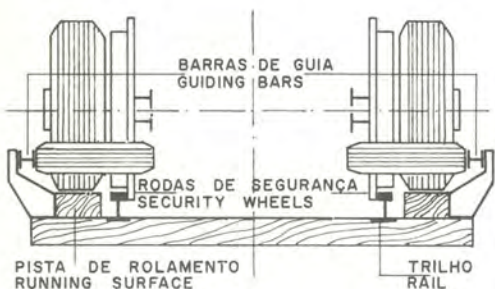
11.5

Fig. 11.5
Veículo "Safege" com saída de emergência
abaixada

Fig. 11.6
Esquema de um truque com rodas pneumáticas

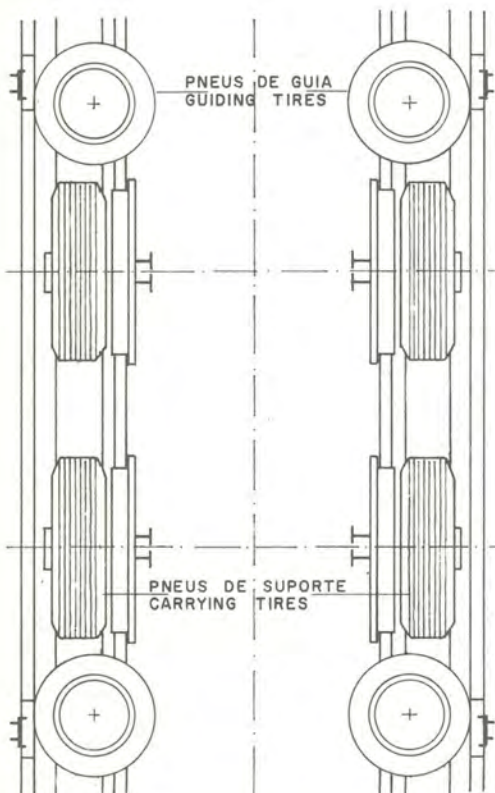
Fig. 11.7
Truque do "Sky-bus"

Fig. 11.8
Comparação de gabaritos



Visto de frente

Visto de cima



11.6

Para o caso de parada entre duas estações o carro SAFEGE é provido de uma escada de emergência escamoteável, que pode ser lançada para assegurar a ligação entre o veículo e o solo (Fig. 11.5). A suspensão do veículo é um tanto complicada devido ao fato de estar pendente e pela falta de espaço no interior das vigas de rolamento.

Os suportes em forma de arco que sustentam as vigas de rodagem, são mais altos do que a altura do veículo, são muito mais caros e destacam-se mais na paisagem urbana, que os do trem Alweg. Também a forma de viga de rodagem é um pouco mais complicada. Em compensação, porém, é necessário menor número de rodas. Como, para a movimentação das agulhas, só é necessário o espaço suficiente para a passagem do braço de sustentação o deslocamento exigido para uma operação de desvio é menor do que no sistema Alweg. E também um pouco melhor a disposição de oficinas de conserto. Pela sua disposição em dois andares a reparação da carroceria do veículo pode ser feita no andar inferior enquanto o sistema de tração recebe assistência no andar de cima. A circulação no interior da oficina será assim um pouco dificultada.

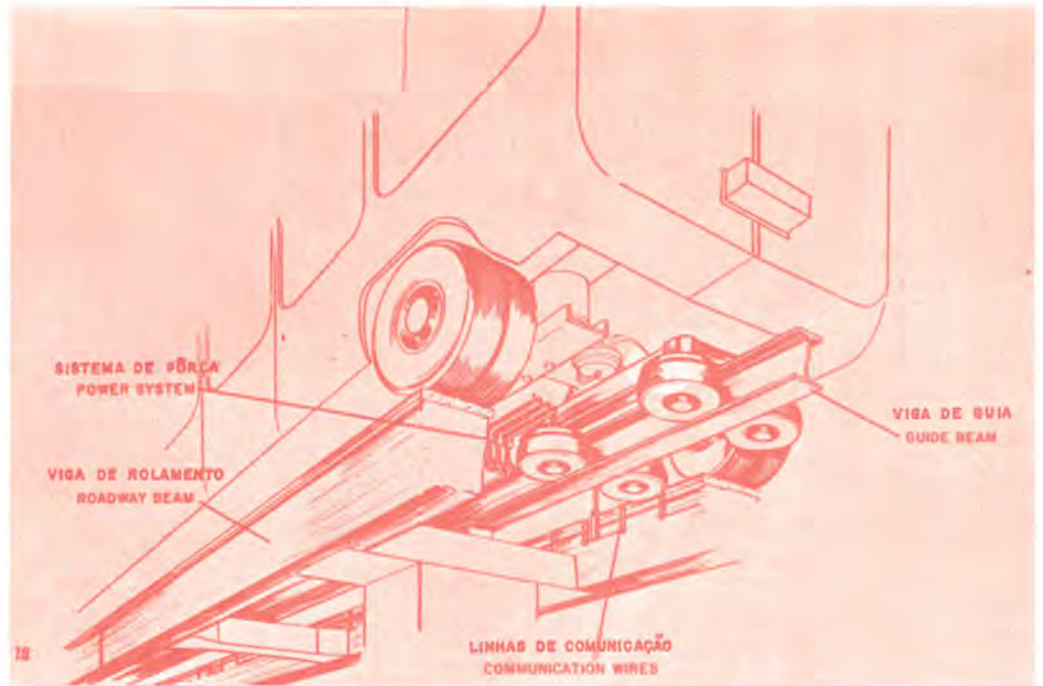
O sistema SAFEGE só teve até hoje uma única aplicação. O trecho experimental de 2 km de comprimento, construído em 1960 em Chateaufort-sur-Loire e que encontrou grande repercussão na literatura. De acordo com os relatórios, a construção foi inteiramente satisfatória.

Propostas no sentido de ampliar o Metrô de Paris em sua periferia utilizando-se deste sistema, foram entretanto indeferidos após profundos estudos das falhas acima citadas.

11.1.4. Os veículos sobre pneumáticos de acordo com o sistema do Metrô de Paris

O rendimento relativamente pequeno do coeficiente de aderência de uma roda de aço sobre trilho do mesmo metal, levou desde cedo engenheiros de estradas de ferro a fazer testes com rodas de borracha.

Tôdas estas experiências falharam, principalmente pelo fato da exagerada pressão entre trilho e roda de borracha, provocando um desgaste muito acentuado. Os veículos sobre pneumáticos desenvolvidos pela R.A.T.P. (Régie



11.7

Autonome des Transports Parisiens) evitam essa falha, não utilizando trilhos ferroviários normais, mas faixas de largura correspondente à espessura das rodas pneumáticas. Essas faixas são colocadas junto aos trilhos, de ambos os lados externos da via. Os trilhos ferroviários normais servem como faixa de rolamento de emergência e como condutores da corrente de retorno.

A fig. 11.6 mostra o princípio básico da pista e dos dispositivos de rodagem. Como acima foi citado, a pista de rodagem é constituída das faixas propriamente ditas, dos trilhos ferroviários normais como pista de emergência, e dos trilhos-guia laterais. As faixas são fabricadas de madeira "azobé" ou concreto e os trilhos-guia, de aço. Os trilhos-guia servem como 3.º trilho para a transmissão da energia.

O dispositivo de rodagem é constituído de um truque com quatro rodas pneumáticas de tração. Quatro rodas-guia pneumáticas semelhantes às rodas de tração asseguram a direção do veículo. Instaladas em posição horizontal, elas são prensadas contra os trilhos-guia laterais a fim de evitar solavancos tanto na marcha em linha reta quanto na entrada em curvas. Paralelamente às de tração, há rodas normais de trem atuando como rodas de emergência. Sua função é dupla: como roda de emergência, caso haja estouro da câmara de uma das rodas pneumáticas de tração, e assegura a direção do veículo nos desvios, pois na área das agulhas, os trilhos-guia não podem ser contínuos. Para que as rodas de emergência possam assegurar a direção, as faixas de rolamento são, nessas áreas, rebaixadas de cerca de 6 mm. Assim, as rodas de emergência atingem os trilhos de segurança e asseguram então a direção normal do veículo. O peso do trem repousa em todo caso sobre as rodas pneumáticas. A carroceria do veículo corresponde à de um metrô comum.

O desenvolvimento técnico deste tipo de veículo, que circula experimentalmente desde 1951 entre Porte de Lilas e Prés Saint Gervais, deve sua criação ao fato de que as linhas 4 e 11 do Metrô de Paris haviam atingido os limites de sua capacidade. Acreditava-se, naquela época, poder aumentar a capacidade de tráfego unicamente por meio da maior aceleração de partida e maior força de frenagem possibilitada pelo alto coeficiente de aderência das rodas pneumáticas. Este fato, originalmente vantajoso, não pôde, contudo, ser aproveitado. Com efeito, como já foi anteriormente citado, a

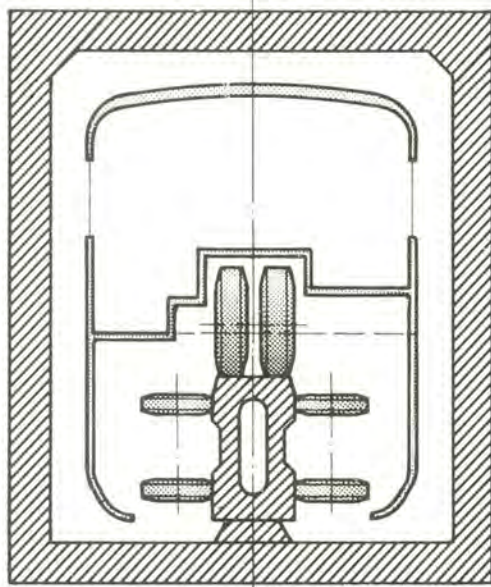
aceleração de partida, deve ser limitada a $1,4 \text{ m/s}^2$, impossibilitando o aproveitamento do alto coeficiente de aderência. Tendo em vista este fato, os engenheiros de R.A.T.P., e mais tarde também os do Metrô de Montreal, equiparam os eixos dos veículos do metrô com motores de tração suficientes apenas para aceleração normal. Estritamente falando, basta este fato para responder aos argumentos a favor do metrô com veículos montados sobre pneumáticos. Mas também a segunda vantagem, ou seja, a menor produção de ruído pelas rodas pneumáticas, perde seu valor, considerando-se que em altas velocidades os pneumáticos produzem vibrações de alta frequência que são desagradáveis aos ouvidos humanos. Além do que, como foi dito acima, é possível, também com rodas convencionais, reduzir o ruído a níveis tão baixos quanto aos obtidos com rodas pneumáticas, respondendo também este argumento.

É sobretudo do ponto de vista de custo da construção e das operações que assumem maior importância as desvantagens dos veículos sobre pneumáticos, em confronto com os carros do metrô convencional. Com efeito seu truque comporta 12 rodas em vez de 4, o que, naturalmente, eleva consideravelmente seu peso. A resistência à marcha é maior, aumentando portanto o consumo de energia. A roda pneumática é mais cara que a roda de ferro. Como a durabilidade da roda pneumática é menor, os custos de manutenção assim como os materiais para isso necessários são também consideravelmente mais caros. O único argumento que restaria, então, a favor do emprêgo desse tipo de roda, seria a existência, no traçado, de rampas irremovíveis, exigindo alto coeficiente de aderência. É o caso do Metrô de Montreal, que tem trechos com rampa de 60 %.

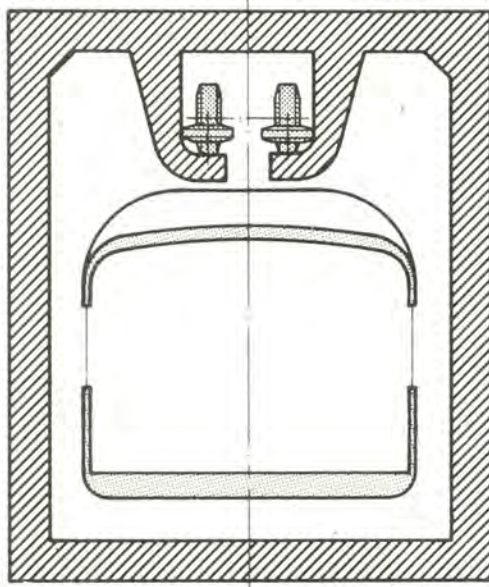
O metrô montado sobre pneumáticos já conta hoje com uma experiência de cerca de 15 anos. Não se conhecem acidentes que afetem a segurança.

O sistema está em funcionamento nas linhas 1, 4 e 11 do Metrô de Paris. O plano da R.A.T.P. de pôr 6 linhas em operação com este sistema até 1969, não foi levado avante. A julgar pelo que se escreve a respeito, não haverá mais transformação de nenhuma outra linha. O sistema foi adotado também na construção do Metrô de Montreal.

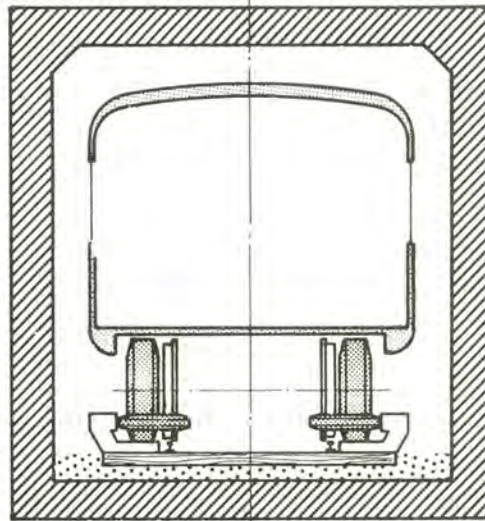
Outro emprêgo de veículos sobre pneumáticos é encontrado no projeto do "Sky-Bus" de Pittsburgh (Estados Unidos). Neste projeto, são utilizados



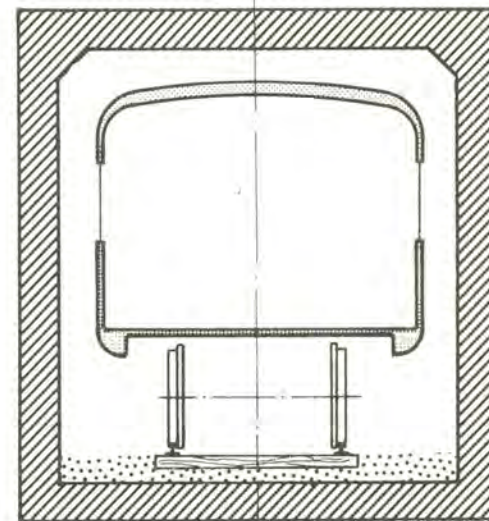
Sistema Alweg



Sistema Safege



Sistema Paris, sobre rodas pneumáticas



Convencional

11.8

carros relativamente pequenos, de maneira que foi possível dispensar os truques. Cada veículo repousa sobre quatro rodas pneumáticas duplas. A direção do veículo é assegurada por meio de rodas em posição horizontal, que abarcam um trilho-guia em forma de duplo "T", situado entre as duas faixas de rolamento. Obtém-se igualmente assim grande segurança contra basculamento do veículo. Não existe apoio de emergência para o caso de estouro de um pneumático. A fig. 11.7 mostra o dispositivo de rodagem com o sistema de roldanas e guia. Este tipo de direção foi desenvolvido pela primeira vez por Kuch em 1929 e tornou-se conhecido na literatura técnica sob o nome de "Processo Kuch de construção de vias com trilhos-guia" (abreviado = LSB-KUCH = Leitschienenbahn-System Bauart Kuch).

O "Sky-Bus" só existe até hoje em estado experimental na cidade de Pittsburgh sob o nome "Experimental Transit Expressway". A linha piloto cobre 2,850 km, está situada em um parque e tem forma de anel. Com seus carros relativamente pequenos foi ela deliberadamente construída para o transporte de número não muito grande de passageiros. Está portanto excluída em casos de condições de tráfego intenso, tal como é exigido para o Metrô de São Paulo.

11.1.5 Confronto dos quatro sistemas

Nos parágrafos anteriores foram descritos os protótipos de trens aéreos do sistema Alweg, trem suspenso SAFEGE e do metrô sobre pneumáticos de Paris e confrontadas suas vantagens e desvantagens em relação ao veículo convencional de dois trilhos.

A seguir serão considerados em conjunto os 4 sistemas, dando-se destaque às características particularmente importantes para um metrô.

a) Adequação dos Sistemas para São Paulo

Trens dos sistemas Alweg e SAFEGE, como autênticas ferrovias em elevado, somente podem manter suas vantagens em redes metroviárias com traçados quase totalmente executados em elevado. Quando os mesmos, porém, por motivos do traçado e em relação às questões urbanísticas não são viáveis, suas vantagens tornam-se desvantagens.

Todos os esforços empregados até hoje para introduzir o trem de Alweg no transporte em massa urbano, fracassaram essencialmente em vista do problema citado acima. Em áreas mais afastadas, com construções baixas e dispersas, ruas largas e extensas, com uma demanda de transporte razoável, como, por exemplo, no caso de serviço de ligação para um aeroporto (Tóquio), os mesmos apresentam suficientes vantagens para ser executados. Sendo possível reduzir os trechos subterrâneos, do traçado, os custos de construção, elevados em vista da maior seção transversal do túnel, ainda não se tornam decisivos (Fig. 11.8).

O centro de São Paulo, com densa construção, não permite que as linhas de metrô sigam os traçados das vias públicas. Além disto, as mesmas, em geral, são muito estreitas para um trem em elevado. Assim sendo, obrigatoriamente devem ser previstos traçados subterrâneos, não devido ao sistema, mas sim condicionado às situações locais.

Sempre onde devam ser previstos desvios em maior quantidade, como por exemplo em estações de retorno, estações de depósito e em pátios de manutenção, os custos crescem substancialmente, em vista das complicadas construções de desvios, isto principalmente no caso de instalações subterrâneas. Por motivos urbanísticos, grandes instalações de estações não são adequadas.

Metrôs com veículos sobre rodas de borracha também são mais dispendiosos que o metrô convencional, pois adicionalmente aos trilhos ferroviários normais ainda é necessária a instalação das vigas de rodagem e de trilhos de direção.

Do ponto de vista da segurança, os quatro sistemas apresentam-se aproximadamente idênticos.

A capacidade de lotação do veículo SAFEGE, do veículo com rodas de borracha e do veículo convencional pode ser considerada como idêntica, ao contrário do veículo de Alweg, cuja capacidade de lotação é menor, em vista dos revestimentos em forma de caixa, necessários para abrigar a parte superior das rodas.

A sequência rápida de trens depende de uma alta aceleração de arranque e alta deceleração para permitir rápida desocupação da estação, bem como de tempos curtos de manobra nas agulhas para rápida formação de rotas. Teoricamente, o tempo de liberação deveria ser menor com veículos de rodas de borracha do

que com veículos sobre trilhos normais. Porém, como já foi mencionado, os coeficientes de aceleração e deceleração, ficam condicionados ao conforto dos passageiros e não podem ultrapassar um determinado limite. Esse coeficiente, contudo, situa-se dentro de limites, que também podem ser atingidos com o veículo convencional, com força de tração em todos os eixos. Assim sendo, com igual comprimento de trens, o tempo de liberação das estações pode ser admitido como sendo igual para os quatro sistemas.

Como o trem Alweg tem que ter um comprimento maior para idênticas condições dinâmicas de tração e igual capacidade de lotação, a densidade da sequência de trens é prejudicada.

b) Custos

No que se refere aos custos de aquisição de veículos com conjuntos de rodagem complicados, estes situam-se até 75% acima do custo por lugar dos veículos convencionais. O veículo previsto para São Paulo custa cerca de US\$ 360 por lugar, contra um veículo de Alweg, na mesma base de custos de US\$ 630. Em relação à área de veículo à disposição dos passageiros, o veículo de Alweg custa cerca de US\$ 3 450 por m², contra cerca de US\$ 2 100 por m² do veículo convencional.

Custos comparativos dos veículos SAFEGE não estão à disposição, pois os mesmos ainda não são produzidos em séries maiores. Como a diferença essencial entre o metrô parisiense sobre rodas de borracha e o sistema convencional, consiste no sistema de rodagem mais dispendioso, os custos destes veículos são maiores na proporção destes valores. Através do aumento do comprimento do trem de Alweg, poderia ser alcançada a capacidade dos outros sistemas, porém somente arcando-se com custos excessivamente altos para plataforma desnecessariamente longas.

Neste sentido, praticamente não há diferenças entre os outros três sistemas.

A longo prazo, os custos operacionais de um sistema são de maior importância que os custos de sua instalação. Em princípio, os custos de pessoal, administração e manutenção de todos os sistemas aqui abordados, são aproximadamente iguais. Os custos de manutenção e de reposição de todos os trens sobre

trilhos com sistemas de rodagem complicados e de difícil acesso, são essencialmente mais altos que nos sistemas convencionais.

A respeito dos custos do material do qual depende o rendimento viário, o Professor Leibbrand averiguou, em 1959, por ocasião de um exame comparativo, que os custos no trem de Alweg são cerca de três vezes mais altos que no metrô convencional. De acordo com os dados dos estudos Alweg, pode-se calcular em US\$ 0.125 a mais para 100 lugar-km nos custos operacionais para qualquer dos sistemas de veículos sobre rodas de borracha.

Com um provável rendimento operacional anual de 18,4 milhões de trem-km, que correspondem a 31,7 bilhões lugar-km pode-se calcular um aumento adicional de custo de cerca de US\$ 4 milhões para qualquer sistema de trens sobre rodas de borracha: em relação aos sistemas convencionais de rodas de aço.

11.1.6. Proposta do sistema para o Metrô de São Paulo

Nas considerações acima foram descritos os sistemas possíveis para o Metrô de São Paulo, comparando-se as vantagens e desvantagens correspondentes. Em síntese ficou demonstrado que para solucionar os problemas de transporte que o Metrô de São Paulo deverá enfrentar, o sistema mais aconselhável é o sistema convencional do trem sobre dois trilhos. Assim sendo, é proposto para o Metrô de São Paulo esse sistema, que emprega veículos com rodas de aço com friso, que correm sobre dois trilhos de aço de perfil normal. Incontestavelmente, trata-se aqui do sistema de maior rendimento, mais econômico e, certamente, aquele que poderá utilizar maior porcentagem de equipamentos de produção nacional.

11.2. Comparação entre os mais importantes metrôs do mundo

Conforme as considerações acima (cap. 11.1.), para solucionar o problema de transporte urbano de pessoas em São Paulo, através de um metrô, a melhor alternativa é a construção do tipo convencional de dois trilhos de aço. Metrôs deste tipo apresentam certas particularidades características. Assim, ao contrário dos bondes, têm seu próprio leito, conforme as



11.9

- Estações terminais
- Estações de baldeação
- Linha de metrô
- - - Linha de ferrovia
- Área urbanizada

Fig. 11.9
Comparação de RTS em algumas cidades

exigências urbanísticas e topográficas em traçado elevado, de superfície ou subterrâneo. Como meio de transporte em massa, os trens em sequência de curtos intervalos, têm grande capacidade. Estações e trens permitem um rápido e cômodo intercâmbio de passageiros, sem atritos, bem como boas facilidades de baldeação para outras linhas. Os acessos e as saídas para os passageiros são construídos de tal forma que atendem ao volume do transporte em massa, evitando assim os congestionamentos. Especial atenção é dedicada à possibilidade de baldeação para outros meios de transporte, tais como ônibus ou para outro tipo de ferrovia. Nas zonas periféricas ultimamente são criados estacionamentos de automóveis perto das estações do metrô, a fim de já aí conseguir-se, na medida do possível, o entrosamento do trânsito individual com o metrô, aliviando assim o trânsito nas ruas das zonas centrais.

Aproveitando-se tôdas essas possibilidades, o metrô oferece um valioso instrumento para amplo atendimento do transporte coletivo nas metrópoles.

Apontam-se, mediante alguns exemplos, quais os caminhos tomados no mundo para o desenvolvimento e a construção de metrô, sendo que serão destacados aqueles que, devido ao seu tamanho e importância político-econômica, podem ser comparados ao de São Paulo, como, por exemplo o Metrô de Londres, de Nova Iorque, de Paris, de Berlim e outros mais.

Metrô de Londres

Em Londres, já há cem anos atrás, o congestionamento das ruas centrais pelos veículos a tração animal constituía um problema de trânsito. Assim sendo, no dia 10 de janeiro de 1863 foi inaugurado o trecho de 6,5 km entre Bishop's Road e Farringdon Street — da Metropolitan Railway Company — o primeiro metrô do mundo, empregando, como meio de tração, locomotivas a vapor. Foi construído no sistema "cut-and-cover", e, em parte, em trincheira. As linhas de metrô que nasciam aos poucos, eram construídas e exploradas em Londres pelas empresas ferroviárias. No ano de 1890 foi inaugurado o primeiro trecho do metrô tubular (tubes), típico de Londres (situado à grande profundidade). Para este trajeto empregaram-se pela primeira vez locomotivas elétricas como meio de tração. Um passo importante na formação do atual sistema londrino de transportes urbanos, foi a concentração no London Passenger Transport Board de todos os trens rápidos citadinos, com exceção dos trens de subúrbio (main line railway), e os meios de transporte de superfície. Depois da guerra de 1939-1945, o serviço suburbano das ferrovias também foi incorporado. Hoje em dia "London Transport" coordena todo o transporte urbano da Grande Londres, seja sobre trilhos ou de rua. A rede do metrô, sem as linhas de irradiação do serviço suburbano eletrificado, principalmente ao sul (antigo Southern Railway) e no nordeste da zona urbana propriamente dita, abrange atualmente 390 km de extensão e 273 estações. Encontra-se em construção a linha "Victoria" com 17 km. Será uma linha diametral pelo centro da cidade, cujas 12 estações com exceção de uma, são pontos de baldeação para outros trens rápidos e trens suburbanos. A inauguração da linha "Victoria" em Londres está prevista para 1968.

Metrô de Nova Iorque

A rede do Metrô de Nova Iorque com sua extensão de 381 km nos bairros de Manhattan, Bronx, Queens e Brooklyn, é a segunda do mundo. Abrange as companhias BMT, IRT e Independent, que antes eram independentes e agora estão integradas. Originou-se de uma linha de trem elevado (1867) e de uma linha de trem subterrâneo no ano de 1904. No entretanto a linha de trem elevado foi desmontada e substituída por um trem subterrâneo. Nova Iorque deve sua posição especial entre os metrô do mundo, ao seu trânsito de trens expressos. Os trens expressos funcionam nas vias internas do traçado de quatro linhas e os trens locais nas vias externas, com plataformas externas nos pontos de parada normais. Nas paradas para trens expressos as plataformas encontram-se entre a linha local e a linha expressa, de tal maneira, que os passageiros têm a possibilidade de baldeação na mesma plataforma. Na rede do metrô acima mencionado, da zona urbana de Nova Iorque, não estão incluídos os metrô ferroviários eletrificados, isto é, vias de trânsito rápido que se desenvolveram a partir das ferrovias. São estas a New York Central, New York Hartford and New Haven e Long Island ao leste do Hudson, da Pennsylvania, Lackawana e Staten Island ao oeste do Hudson, bem como a antiga Hudson and Manhattan Tubes, hoje trens PATH, que, junto com os trens suburbanos do Estado de New Jersey, estão incorporados na Aldene Plan Organization.

O Grand Central Terminal, a Estação Pennsylvania e as estações terminais da PATH no coração de Manhattan são legítimas estações de metrô, no mais autêntico sentido da palavra e contribuem para que na cidade de 8 milhões de habitantes, entre as 8 e 9 horas 90% do trânsito que surge neste horário, isto quer dizer 730.000 passageiros, sejam absorvidos pelos meios públicos do transporte coletivo.

Metrô de Paris

Em Paris, no ano de 1900, por ocasião da Exposição Mundial, foi inaugurada a linha diametral subterrânea de 5,1 km de comprimento, linha esta que se estendia no sentido de sudeste para nordeste. Hoje o centro urbano de Paris possui a rede de metrô mais cerrada do mundo, com 15 linhas separadas, com 189 km de trajeto, porém, ligadas entre si por meio de 119 estações de baldeação. A Régie Autonome des Transports Parisiens (RAPT) reúne a rede de metrô, bem como os ônibus que completam no centro da cidade a rede do metrô e que nos subúrbios são valiosos nos serviços de ligação.

É interessante uma comparação entre os dois metrô europeus de Londres e de Paris. Em Londres também os subúrbios distantes são servidos diretamente por trens que partem de uma linha circular no centro da cidade. Em Paris, todavia, se restringe a rede de metrô ao centro urbano ("Ceinture") enquanto que os bairros suburbanos ("Banlieue") se encontram ligados a citada rede de metrô por intermédio de inúmeras linhas de ônibus. Em complementação da rede do metrô, os subúrbios da Grande Paris, são servidos pelos trens de subúrbio elétricos da Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF).

As estações iniciais para trens de longo percurso, bem como para



11.9

- Estações terminais
- Estações de baldeação
- Linha de metrô
- Linha de ferrovia
- Área urbanizada

Fig. 11.9
Comparação de RTS em algumas cidades

trânsito suburbano encontram-se no centro da cidade, tanto em Paris como em Londres. Hoje em Paris RAPT e SNCF trabalham em estreita colaboração e constroem em conjunto o Réseau Régional.

O Metrô de Berlim

Berlim construiu o seu primeiro trajeto de metrô com 11,2 km de extensão no ano de 1902, com trem elevado em direção leste-oeste. Com a sua estação inicial Warschauer Bruecke e sua penúltima estação Bahnhof Zoo fazia conexão com os trens suburbanos (Stadtbahn) da Administração de Ferrovias. Estas linhas diametrais tinham a sua própria área de atendimento e nunca competiram uma com a outra, embora corresse em direção paralela. A primeira linha de metrô berlinense a princípio foi construída e explorada por uma empresa particular. Entre 1923 e 1930 a municipalidade construiu duas linhas norte-sul e uma linha suburbana em direção ao leste. A partir de 1925 a Administração de Ferrovias eletrificou o seu trânsito suburbano, bem como as linhas "central" e "circular".

Somente a partir de 1929 pôde-se falar de uma cooperação entre o metrô municipal e o metropolitano ferroviário, fato este que teve efeitos principalmente na realização em comum das estações de baldeação. No ano de 1939, tanto as três linhas norte do metrô, como as três linhas sul foram interligadas por um túnel norte-sul de 6 km de extensão que cortava o centro da cidade, fato que, em combinação com a estação de baldeação para a linha central do metrô ferroviário, melhorou sensivelmente a relação de trânsito em direção leste-oeste. Após 1945 Berlim construiu mais três linhas de metrô, uma quarta encontra-se em execução. Também continua a eletrificação dos restantes trajetos suburbanos, que até à guerra funcionavam a vapor.

Metrôs de Boston, Filadelfia, Chicago, Buenos Aires, Hamburgo e outros

O primeiro trem subterrâneo da América foi inaugurado em 1901 em Boston, tendo um percurso de 9,25 km de comprimento: a rede municipal em 1948 tinha extensão de 51,7 km, e recentemente sofreu um aumento com a inclusão de uma linha subterrânea de bondes e de uma linha ferroviária anterior. Boston merece especial atenção pela disposição de suas estações de baldeação. A baldeação dos passageiros dos ônibus de ligação para os trens do metrô, em muitos lugares, realiza-se dentro das próprias estações, de modo que estes passageiros não têm nenhum contato com o trânsito de rua.

Filadelfia e Chicago são caracterizadas pela cooperação entre o serviço de trens rápidos municipais e os ônibus do trânsito de superfície. Além disso as ferrovias eletrificadas da Reading e Pennsylvania em Filadelfia e da Illinois Central e da South Shore and South Bend, bem como das outras ferrovias suburbanas, equipadas com locomotivas diesel, em Chicago, compartilham da prestação de serviços no transporte coletivo urbano. Além disso, Chicago merece especial menção pela solução no Congress Expressway, solução esta que se tornou clássica, isto pela disposição de um metrô como trem de superfície na faixa central de uma autoestrada de várias pistas, sem cruzamento no mesmo nível, com acesso às plataformas pelas pontes que transpõem o trânsito transversal

acima do nível. Expansões desta ordem atualmente estão em preparação, utilizando-se para tanto o Kennedy Expressway (8,3 km), situado a nordeste e o Dan Ryan Expressway (15,2 km), situado ao sul da cidade.

O primeiro metrô da América do Sul já existe desde 1911 em Buenos Aires, complementado por três metrôs ferroviários de tração elétrica. Todas as linhas municipais do metrô têm alimentação de corrente e voltagem de serviço diferente entre si, e os metrôs ferroviários, além disso têm bitolas diferentes.

Hamburgo (1912) e Estocolmo (1950) já desde o princípio têm visado conscientemente uma coordenação do trânsito adequada ao serviço público, apesar da separação entre metrô e ferrovia. As exemplares estações de baldeação em comum de Hamburgo são uma prova eloqüente disso. Após 1945 também Hamburgo construiu três novas linhas de metrô e duas estações de baldeação para o serviço entre trem rápido e ônibus de ligação, nas quais a baldeação do veículo da superfície para o metrô ocorre sem contato com as ruas da cidade.

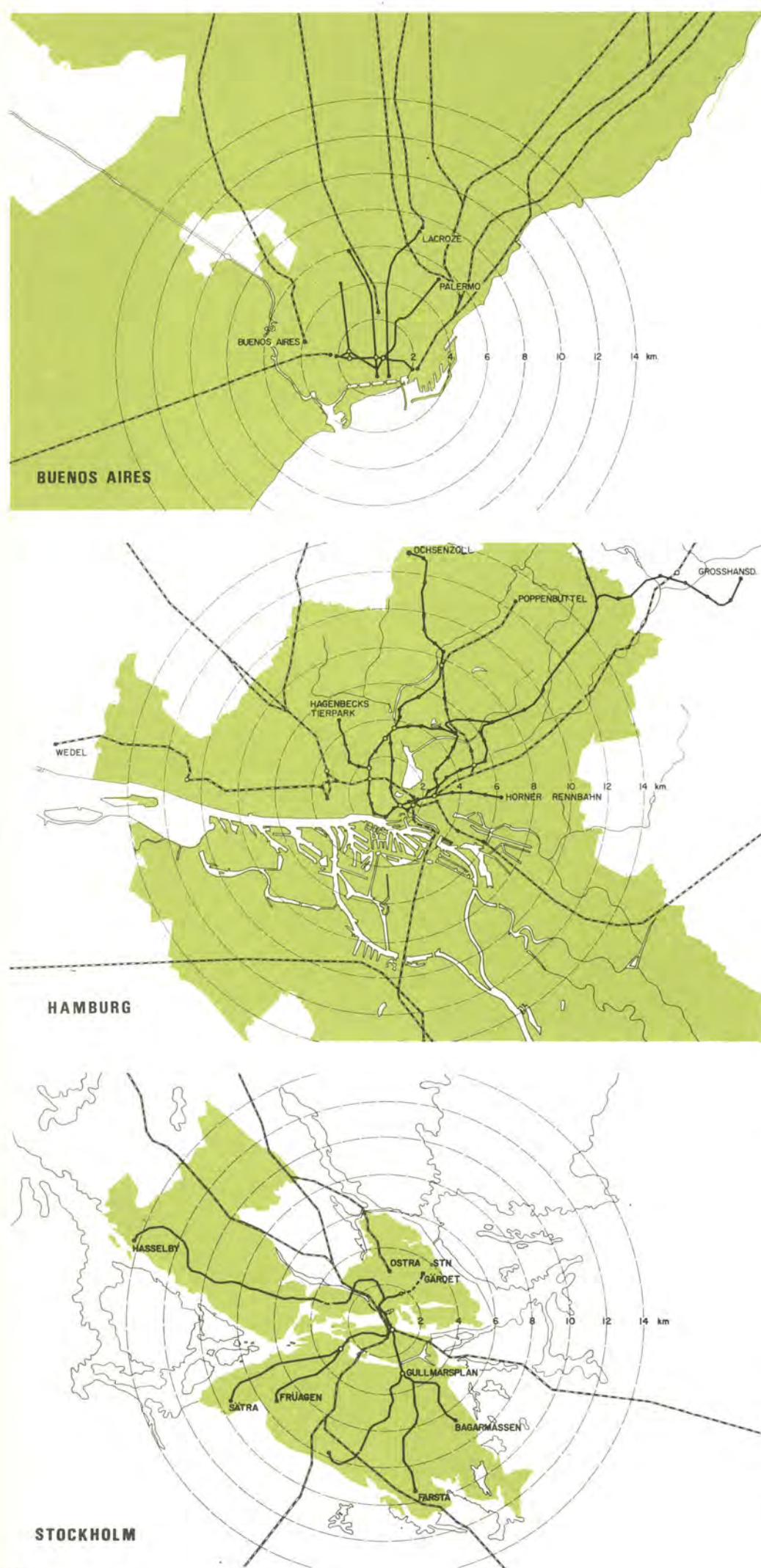
Apesar de terem Tóquio e Moscou somente começado a construção de seus metrôs em 1927 e 1935, respectivamente, suas redes cresceram consideravelmente. Em ambos os casos são eficazmente completados por redes suburbanas das ferrovias e, em Tóquio ainda por ferrovias particulares eletrificadas, com baldeação mútua.

As plantas das redes anexas (Fig. 11.9) — todas na mesma escala — dos metrôs mencionados anteriormente, dão uma visão do tipo de traçado de linhas e da densidade das redes de metrô, apontando assim indicações para a futura configuração da rede do Metrô de São Paulo.

As considerações históricas sobre os metrôs das diversas capitais do mundo, permitem reconhecer o momento em que deveria ser iniciada a construção de um metrô. Da tabela (Fig. 11.10), incluindo os anos da inauguração, o número de habitantes de então e o tamanho das áreas ocupadas pelas cidades, pode-se concluir que, evidentemente, ao atingir-se mais ou menos o número de um milhão de habitantes, não há mais possibilidade de solução dos problemas do trânsito municipal sem o metrô, forçando assim as cidades para esta solução.

O momento para o início da construção de uma rede de metrô, porém, muitas vezes é fortemente influenciado por motivos alheios ao trânsito, como, por exemplo, pelo poder financeiro de uma cidade, o desenvolvimento técnico de um país, bem como situações políticas, urbanísticas ou sócio-econômicas. Há também cidades, onde as ferrovias desenvolveram uma rede parecida à rede de um metrô, assumindo assim no sentido de um metrô, a tarefa do transporte municipal de passageiros, como Copenhague, Varsóvia, Calcutá, Bombaim, Sidney, Melbourne e Rio de Janeiro.

Em outras cidades em crescimento, ferrovias exploram, com trens e horários semelhantes ao metrô, o transporte suburbano em diferentes escalas, como por exemplo em Viena, Bruxelas, Johannsburg, Stuttgart, Munique, Frankfurt, Atenas, Istambul, Gdânia, Cairo e Cidade do Cabo. O grande número de construções e planejamentos dos últimos tempos evidenciam a crescente importância



11.9

- Estações terminais
- Estações de baldeação
- Linha de metrô
- Linha de ferrovia
- Área urbanizada

Fig. 11.9
Comparação de RTS em algumas cidades

dêste meio de transportes para atender ao transporte em massa nas grandes metrópoles do mundo. Assim, após 1945, foram construídas e inauguradas linhas de metrô em Toronto, Cleveland, Glasgow, Lisboa, Madrid, Barcelona, Roma, Milão, Leningrado, Kiev, Oslo, Nagoya e, há pouco tempo, em Montreal. Em outras cidades, como Rotterdam, Frankfurt, Munique, Colônia, Budapest, e São Francisco encontram-se linhas de metrô em obras, havendo sérios planejamentos para Turim, Duesseldorf, Caracas, Helsinque, Cidade do México e Washington.

Ao planejar-se um novo metrô, como para São Paulo, o fato de haver grande número de metrôs, principalmente de construção recente, permite comparação da elaboração técnica e valores de tráfego, capazes de fornecer valiosas sugestões.

Comparações e sugestões somente podem estender-se aos dados técnicos dos veículos, interpretação e concepção técnica das instalações ferroviárias, bem como ao desenrolar funcional em todos os sentidos. É pouco provável que haja no mundo duas cidades com as mesmas condições e características, assim também não é possível haver um metrô que, sem limitações, possa servir como modelo para São Paulo. Há, porém, possibilidades de aproveitamento de um cabedal precioso de experiências de outras cidades, bem como de elementos, que sirvam para o caso específico de São Paulo. Erros cometidos em outros lugares ou concepções já ultrapassadas podem ser evitadas de maneira que o sistema sugerido pode ser elaborado de acordo com os mais recentes conhecimentos técnicos e concepções de trânsito, já experimentados e aprovados. Ao se examinar comparativamente as instalações dos metrôs se devem preferir tôdas as soluções de total confiança, preterindo outras, que, embora teoricamente mais interessantes e atuais, não tenham sido ainda satisfatoriamente comprovadas. Esta posição, consciente das responsabilidades do desempenho funcional e manutenção, de maneira alguma traduz qualquer resistência ao progresso técnico. Tão somente pretende impedir que os defeitos, que quase sempre surgem em construções experimentais, ainda não aprovadas definitivamente, e que aparecem logo no início do funcionamento, levem a críticas indesejáveis, que desacreditem o conjunto do sistema.

A fig. 11.11 permite uma visão das diversas cidades dotadas de metrô, com magnitudes, dados sobre trânsito e sistema de metrô que possuem. O primeiro grupo de dados permite uma visão histórica comparativa do desenvolvimento mundial de instalações de metrô.

Deixando de lado os dois primeiros metrôs de antes de 1870, em Londres e Nova Iorque, que colocaram em serviços trens tracionados por locomotivas a vapor, foi a tração elétrica derivada do bonde, em Budapest, a partir de 1896, que se tornou o modelo clássico de metrô. O desenvolvimento baseado no bonde acarretou a adoção do uso de corrente contínua de 600 V, comum na América do Norte e na Europa, para as instalações de metrô. Há somente dois casos isolados de tração a corrente alternada de bondes: St. Avold e a ferrovia do Vale de Stubai em Innsbruck, que apresenta porém mais as

características de uma ferrovia interurbana. O circuito clássico para bondes, de dois motores de excitação em série, em ligação paralela, em série com resistências, satisfaz da melhor maneira, e o princípio fundamental é mantido até hoje para todos os metrôs.

Enquanto o bonde, para poder adaptar-se ao trânsito em via pública, é alimentado através de um condutor aéreo, no metrô adotou-se em geral o terceiro trilho para a alimentação da corrente a fim de se poder manter reduzida a altura dos túneis. O terceiro trilho é adaptado lateralmente — isolado — aos dormentes e conduzido ao longo das vias permanentes. A fim de aumentar as distâncias entre as subestações, a voltagem do terceiro trilho dos metrôs mais modernos da Europa foi aumentada para 750 V. Também em Montreal, um dos mais novos metrôs da América do Norte, esta voltagem foi adotada.

O desenvolvimento do metrô, parcialmente com base nos bondes, também explica os dados técnicos do traçado de linha dos metrôs mais antigos, com os seus pequenos raios de curva e seus vagões curtos e estreitos. Esta adaptação tão estreita ao modelo de bonde, é o motivo pelo qual a ampliação de instalações desse tipo é, em muitos casos, fortemente dificultada. Dificuldades ocorrem em particular nos casos de trajetos com túneis, pois o alargamento do perfil de um túnel é muito oneroso. Os metrôs que podem apoiar-se em uma linha ferroviária que corte a cidade, como em Copenhague ou os metrôs ferroviários de Berlim e Hamburgo ou a Long Island Railroad em Nova Iorque, não estão sujeitos a tais restrições, visto que as linhas ferroviárias estão previstas para velocidades mais altas, possuindo raios maiores. Igualmente os gabaritos dos veículos já são maiores com vistas ao serviço de carga e permitem o uso de automotrizes de maior capacidade.

No que se refere à bitola, predomina a normal americana e européia de 1.435 mm, quando não, como na Espanha e Rússia, é usual uma bitola mais larga e nesses casos também adotada para o metrô, a fim de poder transportar os veículos do mesmo, sobre seus próprios eixos, da fábrica de vagões aos locais de serviço. Para o metrô de mais recente execução, que é o de São Francisco, escolheu-se uma bitola mais larga, a fim de conseguir-se assim, devido à distância de apoio maior, uma largura dos veículos que ofereça maior conforto. Em geral se pode constatar uma tendência para a bitola mais larga.

O vagão do metrô diverge na sua concepção das formas do vagão ferroviário e do bonde. Pela exigência do transporte em massa desenvolveu-se a forma clássica do vagão do metrô no mundo inteiro. É um carro de grande capacidade, com largas portas em ambos os lados e grandes áreas de acesso e coletoras. Nos vagões predomina a oferta de lugar para viagem em pé; conforme o comprimento do vagão, existem 2, 3 ou 4 portas laterais, com largura livre entre 1.100 e 1.400 mm. Para facilitar a entrada e a saída de passageiros, o piso do vagão e a plataforma estão no mesmo nível, assim não havendo necessidade de degraus. O tamanho dos carros depende da característica do traçado. Os vagões de metrô, que no princípio sofreram grande influência dos bondes, têm larguras entre 2.500 e 2.850 mm, o que limita



11.9

Cidade	Ano da inauguração	Habitantes (em milhões)	Área em km ²
London	1863	2,80	1794
New York	1867	4,05	774
Chicago	1892	1,00	224
Glasgow	1897	0,69	78
Paris	1900	2,66	479
Boston	1901	0,55	283
Berlin	1902	2,71	883
Liverpool	1903	0,74	86
Philadelphia	1907	1,55	332
Buenos Aires	1911	1,21	628
Hamburg	1912	0,95	415
Madrid	1919	0,79	67
Barcelona	1924	0,84	56
Tokyo	1927	2,22	206
Moskva	1935	3,50	246
Stockholm	1950	0,45	143

Fonte: UITP, Dr. Ing. Berger, Metros

11.10

Fig. 11.9
Comparação de RTS em algumas cidades

Fig. 11.10
Ano de inauguração, quantidade de habitantes e área da cidade (no ano da inauguração) de vários Metrô

desfavoravelmente a capacidade dos mesmos. Os metrô influenciados pela ferrovia têm larguras maiores, de 3.000 a 3.200 mm e são mais adequados para o transporte em massa. Os mais recentes metrô, como por exemplo, em Toronto, Oslo e São Francisco, aproveitam este fato e passam a adotar maiores larguras dos vagões. O maior comprimento possível do carro também é vantajoso em relação à capacidade, bem como em relação ao cálculo do preço por lugar. Em parte o comprimento do vagão é determinado pelo raio de curva escolhido. Os metrô influenciados pelo bonde, com seus pequenos raios de curva estão em desvantagem, e, além da menor largura, também os comprimentos são de somente 13-15 m, enquanto os metrô mais modernos possuem vagões com, no mínimo, 18 m de comprimento. Os carros mais novos de Toronto e Nova Iorque ultrapassam os 22 m.

A altura dos vagões tem influência sobre o custo dos túneis, não podendo compensar estes com uma capacidade maior. Em vista disso, a altura é mantida a menor possível, considerando-se o volume de ar indispensável para os passageiros, oscilando a mesma entre 3.350 e 3.750 mm. Uma exceção são os típicos metrô tubulares londrinos, cujas medidas têm que ajustar-se ao perfil redondo dos túneis, havendo até necessidade de serem as portas chanfradas na parte superior.

Em vista das diferentes medidas, o peso dos vagões diverge consideravelmente, tanto absoluta como relativamente. O moderno desenvolvimento exige construção leve, onde aços inoxidáveis e de alta resistência, bem como ligas de metal leve e soldável, encontram emprego com sucesso. Grande comprimento e largura de carros de construção idêntica influenciam favoravelmente os pesos relativos dos vagões. O peso total e os dados funcionais determinam as potências do trem a serem instaladas e estas, em conjunto com a frequência de trens, a potência das subestações e a capacidade total da rede.

Os dados técnicos do trajeto são determinados pelo traçado da linha, pelas dimensões dos carros e pela composição dos comboios. Como futuras ampliações correspondentes ao aumento de tráfego muitas vezes tornar-se-ão necessárias e onerosas, é aconselhável adotar interpretação generosa ao construir-se uma instalação nova. Merece destaque aqui a solução de Chicago, anteriormente já mencionada, onde o leito do metrô foi estendido na parte central de uma rodovia.

O tamanho das plataformas construídas em instalações de metrô, situa-se geralmente na faixa dos 90 a 160 m; em Nova Iorque, para composição de 10 vagões, o comprimento é de 185 m. Em instalações antigas os menores raios de curva são de 100 a 200 m; nos metrô modernos estes, na medida do possível, não ficam abaixo de 300 m. As rampas máximas situam-se ao redor dos 30% no máximo 50%. O peso do trilho adotado é de 50 kg/m.

A composição dos trens é determinada pela disposição das instalações do metrô. Como veículo para transporte em massa o carro singular fica eliminado como meio de transporte. Trens rebocados por locomotivas só existiam nos dias primitivos do metrô, nos primeiros trens de Londres e Nova Iorque. Hoje o trem automatizado

é a forma usual de tração. Todo metrô, funcionalmente, é organizado para as horas de maior movimento — o "rush". Durante o dia a operação adapta-se às oscilações da demanda, modificando a sucessão e o tamanho dos trens. A menor composição varia, conforme as condições locais, entre 2 e 5 carros. O aumento do tamanho dos trens efetua-se mediante junção de vagões individuais ou composições parciais, conforme as disponibilidades da frota local, formando composições de 4, 6, 8 e às vezes de 9 a 10 unidades.

Para conseguir-se uma alta aceleração, resultando num rápido desimpedimento das estações, é aconselhável, acionar o maior número possível de eixos; nos modernos metrô, a proporção do peso aderente para o peso total do trem varia de 1:3 até o valor ótimo de 1:1. Comando múltiplo por meio de transmissão eletro-magnética ou eletro-pneumática ou combinadores de chaves de cames, acionadas por eletro-motores, são hoje padrão em todos os metrô. A evolução passou da marcha de comando manual através do comando semi-automático por relé limitador de corrente ao comando inteiramente automático.

Marcos decisivos com relação ao funcionamento seguro do metrô com uma sequência de trens de 90s, ou seja, de 40 composições por hora, são o equipamento de homem morto, bloqueio por sinais na via e, mais recentemente, o controle da velocidade durante todo o percurso. Estes aperfeiçoamentos somente foram possibilitados pelo desenvolvimento técnico da sinalização que, a partir do sinal semafórico, chegou ao sinal luminoso, ao bloqueio automático em seções, à sinalização para as cabines de condução dos trens e ao controle automático da sucessão das composições sem sinais geograficamente fixos.

A formação das redes em cidades comparáveis a São Paulo, tanto no que diz respeito ao tamanho como política e economicamente, tiveram evoluções diferentes entre si, de acordo com as condições locais. O desenvolvimento de uma cidade situada ao longo do vale de um rio ou na orla marítima é diferente do desenvolvimento concêntrico de uma cidade localizada numa planície. A situação das zonas residenciais em relação aos locais de trabalho diverge muito, conforme a estruturação geográfica e sócio-econômica das cidades. Cidades com grandes repartições administrativas, portos ou cidades especificamente industriais, com indústria pesada maciça, sempre têm seu próprio caráter urbanístico. E em muitos lugares há interferências entre todas estas influências.

Trajeto radiais ou diametrais em direção ao centro administrativo, portuário ou de compras da cidade, quase sempre são as primeiras linhas para a formação da rede do metrô.

No caso de uma área municipal muito dilatada, são acrescentadas linhas circulares fechadas ou abertas, que assumem a função de distribuição através de baldeação para as respectivas linhas radiais. Sobre a extensão das linhas radiais e diametrais decide a densidade populacional e os hábitos de viagem da respectiva zona de influência. Para dominar o serviço de baldeação na área central da cidade, somente devem ser conjugados no máximo 3 linhas no mesmo ponto.

No que se refere à administração, as

primeiras linhas do metrô, eram construídas e administradas sem qualquer articulação com os outros meios de transporte. Em algumas cidades havia mesmo duas redes, mais ou menos independentes entre si e pertencentes a proprietários diferentes e que faziam concorrência entre si.

Sòmente após o término da primeira guerra mundial é que gradativamente se foi impondo o reconhecimento de que as empresas de transporte coletivo rápido devem se unir, tanto do ponto de vista do tráfego, como da administração, sem porém, cogitar-se de uma fusão completa, apesar de bitolas iguais. Uma exceção, neste sentido, é representada por Hamburgo, onde já desde 1907, com ampla previsão, existia uma certa colaboração entre o metrô ferroviário e o metropolitano. Graças a esta circunstância houve uma delimitação sensata sobre as zonas de influência das duas empresas de transporte e criaram-se estações em comum, possibilitando baldeação confortável de um sistema para o outro. Porém, também aqui não houve uma fusão de empresas com passagens recíprocas dos trens. Por outro lado, após 1920, a união dos meios de transporte municipais estendeu-se aos bondes e ônibus.

Em vista da necessidade de coordenação dos serviços municipais, de transporte, também em outras cidades do mundo, gradativamente iniciou-se uma evolução neste sentido. Assim, surgiu o London Passenger Transport Board, o RATP em Paris, a BVG em Berlim e as Authorities nas cidades norte-americanas. A partir de 1945, impôs-se cada vez mais o reconhecimento de que todos os

meios de transporte de passageiros a curta distância, principalmente nas metrópoles, têm que ser coordenados para melhor resolver os problemas de trânsito das zonas centrais. Formaram-se, recentemente o London Transport, o Réseau Régional em Paris, a Tri-State Commission and Port Authority em Nova Iorque e em Hamburgo o Hamburger Verkehrsverbund, até hoje a organização mais perfeita nesse campo particularmente complexo dos transportes urbanos.

Se as comparações entre os dados técnicos e as formas de administração dos diversos sistemas de metrô apontam os rumos a serem tomados para a organização e construção de uma nova rede de metrô, da mesma forma certos valores experimentais podem ser aproveitados na elaboração dos projetos.

Assim, por exemplo, o número de usuários do metrô em relação ao número de habitantes demonstra que, na maioria dos metrô do mundo, cerca de 20-30% dos habitantes diariamente se servem do metrô e que no caso de uma rede extensa, como por exemplo em Paris, o número de usuários pode chegar até 50%.

A extensão específica da rede em quilômetros, por milhão de habitantes aponta, que, evidentemente para a primeira etapa da rede de um metrô, se deve aspirar ao valor de 10-15 km para cada milhão de habitantes. Metrô mais antigos, com linhas para as periferias, como Londres e Nova Iorque, situam-se com valores de 28,9-27,1 km respectivamente para cada milhão de habitantes, acima deste valor médio.

É evidente, porém, que justamente nesses metrô o aproveitamento do espaço útil diário nos trens é desfavorável. Assim, enquanto Londres apresenta um aproveitamento de sòmente 2,8 e Nova Iorque de 3,2 passageiros, por lugar/dia, Moscou, com 12,0 km e Montreal com 11,6 km para cada milhão de habitantes, apresentam um aproveitamento 16,7 vezes, e, respectivamente, 8,8 vezes maior.

Esses valores relativos podem servir de orientação para o dimensionamento da rede e do parque de veículos. Resumindo e analisando os dados relativos aos sistemas de metrô de todo o mundo, muitas indicações podem ser obtidas, não obstante a influência de uma série de fatores diretamente ligados à estrutura específica de cada cidade e às características peculiares de cada população.

Assim, por exemplo, como meio de tração, a sugestão deve ser uma automotriz elétrica, de corrente contínua. As automotrizes, de acordo com os valores de comparação, deverão ter uma largura de 3.000-3.200 mm, um comprimento de 18-22 m, uma altura de 3.350-3.750 mm e a largura das portas de 1.100-1.450 mm.

O comprimento das composições, resultantes da junção de várias automotrizes, reboques, etc. deve ser de 100 a 140 m, correspondente à extensão das plataformas.

A bitola a ser escolhida deve ser a maior possível, ajustada à bitola ferroviária, que no caso de São Paulo é de 1.600 mm.

A velocidade deve estar na faixa dos

80-100 km/h e o menor raio de curva de cerca de 300 m.

A aceleração e a deceleração não devem ultrapassar 1,35 m/s² e a frequência de trens nas horas de tráfego mais intenso deve ser de, aproximadamente, 40 trens/h.

Na primeira etapa, a rede deve ser baseada em 10-15 km por milhão de habitantes. A quantidade de veículos em número suficiente para conseguir-se um aproveitamento de lugares de 10 a 15 vezes por dia.

Os dados comparativos e as especificações analisadas devem, no seu conjunto, contribuir para conseguir-se os elementos técnicos e de organização para a construção de um dos metrô mais modernos, capaz de cooperar na solução efetiva dos problemas atuais e futuros do transporte coletivo urbano na cidade de São Paulo.

1	PAIS		ESTADOS UNIDOS					CANADA		ARGENTINA		INGLATERRA			HUNGRIA		FRANÇA		ALEMANHA		ESPANHA		PORTUGAL		ITALIA		SUECIA		NORUEGA		DINAMARCA		HOLANDA		U.S.S.R.		JAPAO	
	2	Cidade	New York	Chicago	Boston	Philadelphia	Cleveland	Toronto	Montreal	Buenos Aires	London	Glasgow	Liverpool	Budapest	Paris	Berlin	Hamburg	München	Madrid	Barcelona	Lisboa	Roma	Milano	Stockholm	Oslo	København	Rotterdam	Moskva	Leningrad	Kiew	Tokyo	Osaka	Nagoya					
CARACTERÍSTICAS GERAIS	3	Ano do início da operação	Unidade	1867 1904	1892 1943	1901	1907	1955	1954	1966	1911	1883 1890	1897	1903	1896	1900	1902	1907 Metro RRT 1912 subterrâneo	1968	1919	1924	1959	1955	1966	1950	1966	1934	1967	1935	1955	1960	1927	1933	1957				
	4	População metropolitana	No ano do início	x10 ⁴	4,05	0,55	1,55	1,46	1,12	2,26	1,21	2,80	0,89	0,74	0,60	2,66	2,71	0,95	1,23	0,79	0,84	0,82	1,65	2,56	0,45	0,50	1,00	3,50	2,82	1,10	2,22	2,45	1,42					
	5		Hoje	x10 ⁴	14,10	7,00	3,17	4,63	1,99	1,99	2,26	7,17	13,50	1,89	1,39	2,15	7,75	3,27	1,85	1,23	2,60	2,70	1,35	2,46	2,56	1,90	0,52	1,20	1,00	8,48	3,70	1,40	16,40	3,15	2,00			
	6	Área da cidade no ano do início		km²	774	283	332					628	1.794	78	86	207	479	882	415	310	67	56				143			246			206	202					
	7	Área da região metropolitana hoje		km²	650	600	250	450	273	600		180	5.900	130		207	1.000	882	747	310	270	100	84	250		180	453		350	320		2.027	202	260				
	8	Extensão da rede das linhas		km	381	272	60	47	24	24	26,2	33	390	10,5	19	3,7	169	101,5	81,8	13,6	39,5	26,1	10	11	14,5	62,9	27	66	6	132	24,3	13	86,7	32,3	14,8			
	9		Túnel	km	216	29	17,3	20		20,4	26,2	33	141	10,5	8	3,2	160	73,6	25,0	9,4	34,5	16,9	10	5,9	14,5	22,6	8,6		3	89	24,3	9,4	80,6	32,3	14,8			
	10	Linhas			28	6	4	4	1	2	3	5	7	1	2	1	15	9	3	1	5	3	3	1	1	5	4	4	1	8	2	1	6	4				
	11	Estações			483	136	54	55	14	36	26	54	273	15	21	11	363	116	71	19	63	33	12	11	24	67	33	36	7	66	19	10	92	23	11			
	12	Distância média entre as estações		m	800	850	1.000	780	1.700	670	1.000	530	1.400	700		370	590	770	849	800	550	560	780	1.000	600	940	820		850	1.400	1.400	1.400	950	1.400	1340			
	13	Passageiros por dia útil		x10 ⁴	4.700	400	580	510	60	580	530	1.750	2.250	90			4.000	720	540		1.520	650		600	470				4.000	1.000	100	2.350	840	100				
	14	Passageiros transportados por ano	Total	x10 ⁸	1.370	114	~ 90	130	17,4	66		317	668	27			1.200	281	170		455	245	20	14	132		25		1.500	80	45	460	277,4					
	15	Carro-quilômetros anuais		x10 ⁴	490	70,7	~ 20	26,5	7,2	14,1		26	338	4,7			171,3	38,2		32	9	1,8	2,7		33,8									36,8	16,97			
	CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS	16	Velocidade	Máximo	km/h	80	85	88	88		80	80	70				70	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	100	75	90	75	75	100					
		17		Comercial	km/h	29-36	38	41,8	29	45	27,4	32,2	25	32	22		27	24,2	28,8	27,5	35	23	26,7	29,5	37,3	30,4	31			39,2	40	30	32,6	39	37			
18		Quantidade de trens por hora			36	30	26	34	24	26	40	30	30	20		60	34	40	40	40	24	26	24	20	40	36	30		20	40	30	20	30	26	20			
19		Intervalo mínimo entre os trens		min	1,6	2	2,3	1,75	2,5	2,3	1,5	2	2	3		1	1,75	1,5	1,5	1,5	2,5	2,25	2,5	3	1,5	1,75	2		3	1,5	2	3	2	2,25	3			
20		Composição de trens	o menor grupo		2	2	2	2	2	2	3		4	2		1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
21			trem máximo		10-12	8	6	6-10	6	8	9		5	8	2		1	5-6	8	8	6	4	3-4	4	3	6	8	6	8	8	6	3	6	7	6			
22		Lotação máxima por trem			2.200	1.400	1.060	1.000	1.000	1.800	1.500	1.000	1.500	200		42	900	1.176	1.024	670		700	800	500	1.250	1.250	1.000		1.100	2.000	1.000	750	900	800	700			
23		Capacidade por hora e linha			78.000	42.000	27.000	34.000	24.000	47.000	60.000	30.000	45.000	4.000	10.000	2.400	30.000	47.000	41.000	34.000		18.000	20.000	10.000	50.000	45.000	30.000		22.000	80.000	30.000	22.500	27.000	20.000	14.000			
24		Quantidade de carros	motorizado		6.298	1.157	453	539	88	334	246		2.849	26		19	1.636	600	471		234	86	36	40		650	165		54					290	60			
25			Total		6.700	1.234	453	539	88	334	369		308	4.261	50		19	3.070	1.097	471		380	225	36	48	84	650	165		391	54	1.697		1.063	290	60		
26		Lugares disponíveis do material rodante			1.470.000	215.000	95.000	85.000	17.000	100.000	60.000	62.000	800.000	4.500		800	480.000	180.000	100.000		57.000	43.000	7.200	12.000	17.500	95.000	27.500		80.000	7.400	190.000		250.000	65.000	7.000			
27		Aceleração máxima		m/s²	1,25	1,43	1,12	1,35		1,10	1,35		1,1			1,35	1,2	0,9	1,3			0,9	1,25	1,5		1,1	1,0		0,82	1,00		0,98		0,84				
28		Frenagem	média normal		1,35	1,35	1,35	1,35		1,35	1,35		1,08			1,43	1,2	1,0	1,0			1,2	0,84	1,5	1,1	1,3			0,95	1,20		0,98		1,12				
29			emergência		1,5		1,55	1,38			2,15						1,2		1,4						2,5		1,35			1,2					1,13			
CARACTERÍSTICAS DA VIA PERMANENTE		30	Bitola	mm	1.435	1.435	1.435	1.435/1.581	1.435	1.495	Pneu/1.435	1.435	1.435	1.219			Pneu/1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.674/1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.435	1.524	1.524	1.524	1.067/1.435	1.435	1.435		
	31	Piso do trilho	kg/m	50	50	50	50		50	Pneu	50	47	40			75	41	37		45	50	50	46,5	50	43,2	35,7			50	50	50	50	50	50	50			
	32	Rampa máxima	‰		30	50	50					33	62,5			40	40	50	24	50	43	40	35	30	40	50			40					35	33			
	33	Raio mínimo de curva	m		105	120	50					400	200			75	74	180	250	50	90	120	100	200	200	200			400				150		125			
	34	Comprimento de plataformas	m	185	152	105		90	152	152		108	110/135	36			90	120	125	120	90	90	70	105	145	110			120	155	160	100	120	100				
	35	Alimentação	3,3° trilho	V	600	600	600	600	600	750		600	630	600			600/750	750	750	750		1.500	750		750	650	750		750	625	820	750	600	750	600			
	36		fio trolei	V				600			1.100/1.500				550						600	1.300		1.500					1.650				1.500					
	37	Comprimento do carro	m	16,35	16,36	21,20	16,87	14,78	22,67	17,20		16,70	16,10	12,45		11,0	14,39	15,50	2x 13,39	18,00	14,30	16,50	16,0	19,10	17,03	17,40	17,50	19,66	2x14,5	19,166	19,166	19,166	20,0	16,0	15,0			
	38	Largura do carro	m	3,05	2,84	3,11	2,77	3,15	3,15	2,51		3,13	2,94	2,34		2,25	2,40	2,65	2,50	2,90	2,20	3,32	2,70	3,04	2,80	2,80	3,20	3,12	2,68	2,70	2,70	2,70	2,80	2,89	2,50			
	39	Altura do carro	m	3,63	3,61	3,80	3,90	3,58	3,66	3,66		3,70	3,65	2,69		2,25	3,49	3,42	3,35	3,55	3,49	3,83	3,45	3,61	3,72	3,72	3,65	3,70	3,65	3,70	3,70	3,70	3,65	3,75	3,60			
	40	Altura do soalho	m	1,18	1,15	1,24	1,18		1,10	1,25		1,15				1,18	1,05	1,08	1,25		1,18		1,15	1,11	1,16				1,05	1,036	1,036	1,036	1,15		0,95			
	41	Área do soalho	m²	54	43,5	62	43,5		71,9	39,2		43,3	29,4			36	37,5	2x 34,1	50,27	34,3	46,2	44,5	59	47,8	48	56			2x34,5	52	52	52	50,5	52,2	37,5			
	42	Volume do carro	m³																																			
	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL RODANTE	43	Quantidade de portas por carro		4	2	4	3	2	4	4		2x2	2			4	3	2x 2	3	4		4	3	4	4	3	3		2x4	4	4	4	4	3	3		
		44	Largura das portas	m			1,28			1,14	1,30		0,68+1,36				1,30	0,965	1,215	1,30		1,20		1,25	1,28	1,20	1,25			0,65+1,30	1,50	1,30	1,30	1,30	1,30	1,10		
45		Quantidade de lugares por carro	assentos	60	48	74	56	52	84	45		47	58	42		28	24	37	2x41	49	36	33	44	56	26	50	63	65	2x40	40	40	40	52	48	46			
46			Total	220	175	210	176	195	300	170		214	189	93		42	160	147	2x128	145	150	193	200	256	213	150	170		2x138	220	220	220	250	230	115			
47		Material predominante do carro	Aço LAHT	Aço LAHT	Aço inox	Aço LAHT	Alum.	Aço									Aço	Aço	Aço	Alum.																		
48		Distância entre pivôs do truque	m	13,425		15,6	11,579	16,4	16,459	11,12		18,84				10,00	9,500	10,200	12,000				11,00	11,10	11,00	11,00												

12. Prescrições legais, normas e regulamentos técnicos

Na construção de instalações de metrô deve-se obedecer a certos regulamentos e normas técnicas. No Brasil não existem ainda, além das normas ferroviárias, quaisquer regulamentos específicos referentes à construção de metrô. Em vista disso, devem tomar-se por base tanto os regulamentos ferroviários existentes, como normas internacionalmente aplicadas.

12.1. Normas e regulamentos técnicos ferroviários

12.1.1. Normas para construção e operação de ferrovias

Para a construção de ferrovias no Brasil, servem de base as "Normas Técnicas para as Estradas de Ferro Brasileiras", elaboradas pelo Conselho Ferroviário Nacional e publicadas pelo Ministério da Viação e Obras Públicas. Essas normas contêm além dos elementos de construção para o traçado das bitolas de 1.600, 1.435 e 1.000 mm, usadas no Brasil, também os princípios gerais para os trabalhos preliminares necessários, bem como indicações para a execução de obras de arte, eletrificação e instalações de sinalização e comunicação. Sua complementação é o "Regulamento para Segurança, Tráfego e Polícia das Estradas de Ferro", no qual se acha estabelecido o essencial sobre as medidas de segurança a serem tomadas na construção e manutenção das ferrovias. Além disso, acham-se ali incluídas normas operacionais para o material rodante e para a composição dos trens.

Para a sinalização utilizada nas ferrovias é seguido o "Código Brasileiro de Sinais Ferroviários", publicado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (A.B.N.T.)-P-NB-7B.

Além dessas normas, válidas para todas as estradas de ferro, muitas vezes também são consultadas as recomendações do Instituto Ferroviário de Pesquisas Técnico-Econômicas (I.F.P.T.E.) e da American Railway Engineering Association (A.R.E.A.). Demais detalhes e normas para acabamento estão estabelecidos nos regulamentos internos das companhias ferroviárias.

Já existem normas nacionais para uma parte dos elementos de construção. Como em todas as

ferrovias do mundo, os princípios básicos para a construção e manutenção de estradas de ferro devem continuar a ser uniformizadas e padronizadas. A Rede Ferroviária Federal S/A. (R.F.F.S.A.) ocupa-se atualmente em completar essas normas, adaptando-as ao que há de mais moderno no campo ferroviário.

12.1.2. Regulamentos para metrô

Ainda não existem regulamentos para esse tipo de ferrovias no Brasil. Devido às condições parcialmente diferentes para essas ferrovias, os princípios básicos para o Metrô de São Paulo deverão ser estabelecidos e elaborados (Cap. 14.1.)

12.2. Normas e regulamentos técnicos para mecânica e eletricidade

12.2.1. Normas existentes e aplicadas no Brasil

Para projeto e construção de veículos ferroviários e respectivas instalações são aplicadas, em princípio, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (A.B.N.T.). Todavia, essas normas não abrangem todo o campo da técnica ferroviária. Por isso, conforme surgia a necessidade, foram utilizadas as normas e regulamentos de outras administrações e associações ferroviárias.

Para tanto, são aplicados, principalmente, os seguintes regulamentos, além das normas da A.B.N.T.:

a) Para questões técnicas especificamente ferroviárias
AAR-Standards (Association of American Railroads)
UIC-Folhêtos (Union International des Chemins de Fer)
Normas de administrações ferroviárias estrangeiras.

b) Para questões de mecânica:
AISI-Normas (American Iron and Steel Institute)
ASTM-Normas (American Society for Testing Materials)
ASME-Normas (American Society of Mechanical Engineers)
DIN-Normas (Deutsche Industrie-Normen)

c) Para questões de eletrotécnica:
AIEE (American Institute of Electrical Engineering)

NEMA (National Electrical Manufacturers Association)
NEC (National Electrical Code)
IPCEA (Insulated Power Cable Engineers Association)
IEC (International Electrotechnical Commission)
VDE (Verein Deutscher Elektrotechniker)

d) Para questões gerais:
ASA (American Standards Association)
ISO (International Standards Organization)
DIN (Deutsche Industrie-Normen)

12.2.2. Normas aplicadas no projeto do metrô

No Brasil quase sempre foi aplicado o sistema métrico; o Decreto 52423, de 1963, criou o sistema legal de unidades de medidas no Brasil. Assim sendo, o projeto do metrô foi elaborado, tendo por base o sistema métrico.

Em virtude de estarem previstos veículos ferroviários para o Metro de São Paulo, serão aplicados — na medida em que se adequarem ao metrô — os regulamentos e as normas técnicas das estradas de ferro para os elementos de construção. Sempre que as normas técnicas ferroviárias não forem aplicáveis, deverão ser empregadas normas técnicas gerais ou especiais.

Para a **parte mecânica** servirão:

a) Premissas de carga e segurança:

Baseado num trabalho elaborado pelo grupo de estudos "Construção leve de veículos", publicado como suplemento do "Órgão do Grupo de Estudos", ano 7, 1963, Frankfurt (Main).

b) Questões de material e estabilidade:

Normas da A.B.N.T., quando contiverem determinações correspondentes; em caso contrário normas DIN.

c) Questões técnicas ferroviárias:

Normas A.B.N.T.
Folhêtos UIC

d) Questões gerais:

Normas A.B.N.T.
Normas ISO e, se necessário, Normas DIN

Para a parte elétrica servirão:
Normas A.B.N.T.

Normas IEC
Folhêtos da UIC e, se necessário, Normas VDE

12.3. Normas técnicas de construção civil

12.3.1. Normas brasileiras para projeto, cálculo e execução de obras de construção civil

Para projeto e construção das obras do metrô para a cidade de São Paulo devem ser aplicadas, em princípio, as normas da "Associação Brasileira de Normas Técnicas" — A.B.N.T. — e as do "Código de Obras Municipal".

Essa determinação baseia-se na Lei Federal n.º 4150, de 21 de novembro de 1962, a qual é aplicável para todas as obras públicas do Governo Federal, bem como para obras estaduais e municipais, financiadas pelo Governo Federal.

Com a Lei Municipal n.º 4615, de 13 de janeiro de 1955, ficou estabelecida como obrigatória a aplicação das especificações e normas da A.B.N.T., relativamente à qualidade e utilização de materiais de construção.

Outrossim, essa lei estabelece áreas e dimensionamentos mínimos para locais de utilidades diversas, os quais devem ser obedecidos na medida em que surgirem, em tais instalações de transporte.

12.3.1.1. Diretrizes sobre dimensões e esquema das obras do metrô

Para tanto, no Brasil não existem normas aplicáveis.

12.3.1.2. Cargas típicas

São aplicadas as seguintes normas da A.B.N.T.:
NB-2 — "Cálculo e execução de pontes de concreto armado"
NB-6 — "Carga móvel em pontes rodoviárias"
NB-7 — "Carga móvel em pontes ferroviárias"
(Para completar por dados p/trens do tipo "metrô")
P-NB-5 — "Cargas para o cálculo de estrutura de edifícios"

As normas acima necessitam de complementação para obras especiais de transporte.

12.3.1.3. Diretrizes para cálculo e construção de obras em concreto armado

Para cálculo e execução de obras em concreto armado em geral, devem ser aplicadas as seguintes normas:

NB-1 — "Cálculo e execução de obras em concreto armado"
NB-2 — "Cálculo e execução de pontes em concreto armado"
Anexo-EB-3/67 — "Condições de emprêgo das barras de aço destinadas à armadura de peças de concreto armado"

12.3.1.4. Diretrizes para cálculo e execução de peças de concreto protendido

Como base para cálculo e execução de elementos de concreto protendido devem ser seguidas as seguintes normas brasileiras, as quais, porém, ainda necessitam de complementações:

P-NB-116 — "Cálculo e execução de obras de concreto protendido"
P-EB-233 — "Barras, fios, cordões e cordas de aço destinados a armadura de protensão".

12.3.1.5. Diretrizes para materiais de construção civil destinados à fabricação de concreto

Como normas de qualidade e métodos de controle dos materiais necessários à fabricação de concreto devem ser seguidos as seguintes normas e métodos.

Cimento:

EB-1 — Cimento Portland comum
EB-2 — Cimento Portland comum de alta resistência inicial
P-EB-208 — Cimento Portland de alto forno
MB-1 — "Ensaio de cimento Portland"
MB-11 — "Análise química de cimento Portland"

Agregados:

EB-4 — "Agregados para concreto"
MB-6 — "Amostragem de agregados"
MB-7 — "Determinação da composição granulométrica dos agregados"
MB-8 — "Determinação do teor de argila em torrões nos agregados"
MB-10 — "Avaliação das impurezas orgânicas das areias para concreto"

Aços para armadura:

EB-3/1967 — "Barras e fios de aço destinados a armadura de concreto armado"
MB-4 — "Ensaio de tração de materiais metálicos"
MB-5 — "Ensaio de dobramento de materiais metálicos"

12.3.1.6. Diretrizes para ensaios de concreto

Para os ensaios de resistência do concreto devem ser seguidos obrigatoriamente os seguintes métodos da A.B.N.T.:

MB-2 — "Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos de concreto"
MB-3 — "Ensaio à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto"
MB-212 — "Resistência à tração simples de argamassas e concreto por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos"

12.3.1.7. Recomendação da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos para projeto e execução de fundações

Essas recomendações — publicadas na revista ESTRUTURA n.º 25 — poderão fornecer os dados básicos para questões de fundações, após uma competente reelaboração e complementação.

12.3.2. Normas complementares necessárias

Além das normas brasileiras sobre a construção civil em geral já existentes e a serem empregadas, tornam-se necessárias para este projeto de metrô normas técnicas complementares, que deverão ser empregadas como base nos planejamentos (projeto de execução), nos cálculos, na construção e execução das obras de engenharia. Estas normas deverão ser encaradas como determinação obrigatória. Como alternativas deverão ser propostas adicionalmente sugestões e formas de execução já aprovadas.

Estas normas e sugestões abrangem os seguintes setores:

12.3.2.1. Diretrizes para o planejamento das obras (Projeto da execução)

Para o planejamento das obras do metrô foram fixadas bases de caráter obrigatório sobre gabaritos, tamanho de áreas de circulação e de plataformas, dimensionamentos de escadarias, acessos e saídas, instalações de guichês etc., dependendo dos valores sobre o tráfego. As bases foram elaboradas e fixadas nos capítulos 14.1., 14.2. e 14.3. O gabarito é apresentado na fig. 14.1.

Para as obras mais importantes do metrô foram elaborados desenhos com cortes transversais típicos, padronizados, que estão apresentados nas figs. 16.30, 30.6, 30.7, 30.8 e 30.11.

12.3.2.2. Diretrizes para o dimensionamento e a construção das obras (dimensionamento estático)

Em complementação às diretrizes e normas brasileiras mencionadas no capítulo 12.3.1., as normas complementares necessárias foram resumidas em diretrizes, que são válidas para os cálculos, o dimensionamento e a construção das obras do metrô. Estas "Normas de Coordenação" e "Normas Técnicas Complementares", foram aprovadas pelas entidades competentes sob a designação NC-03. Por motivos de integridade, as normas brasileiras e as determinações legais também foram incluídas nas normas NC-03.

Estas normas serão adicionadas posteriormente ao Relatório Final como anexo. A fim de permitir uma visão completa do assunto, os índices dos diversos capítulos serão enumerados a seguir:

Mecânica dos Solos (Vide cap. 2 das normas NC-03)

1. Generalidades
2. Características do solo
3. Cálculos de mecânica dos solos
 - 3.1. Métodos de cálculos de mecânica de solos
 - 3.2. Deformação admissível nos solos
 - 3.3. Estabilidade

- 3.3.1. Coeficiente de segurança
- 3.3.2. Resistências ao cisalhamento
- 3.3.3. Ruptura do solo
- 3.3.4. Verificações da estabilidade para um círculo de escorregamento pelo método das lamelas
- 3.3.5. Estabilidade em superfícies de escorregamento pré-determinadas, mais prováveis e compostas
- 3.4. Cálculo de recalques
4. Indicações especiais

Premissas de carga para construções de túneis (vide cap. 3 das normas NC-03)

1. Cargas permanentes
 - 1.1. Definição
 - 1.2. Carga de atêrro
 - 1.3. Empuxo da terra
 - 1.4. Pressão hidrostática
2. Cargas móveis
 - 2.1. Cargas móveis no teto A
 - 2.1.1. Veículos pesados de 60 t
 - 2.1.2. Cargas provenientes de construções sobre o metrô
 - 2.2. Cargas móveis nos tetos B e C
 - 2.2.1. Generalidades
 - 2.2.2. Cargas dos veículos do metrô
 - 2.3. Cargas da Estrada de Ferro Santos a Jundiá
 - 2.4. Cargas móveis laterais
 - 2.4.1. Empuxo hidrostático
 - 2.4.2. Empuxo lateral proveniente de cargas de edificações
 - 2.4.3. Pressão lateral proveniente de tráfego ao lado do túnel
 - 2.5. Cargas especiais
 - 2.5.1. Cargas de colisão
 - 2.5.2. Cargas durante a construção
3. Casos de carregamento
 - 3.1. Estudos preliminares
 - 3.1.1. Segurança contra flutuação
 - 3.1.2. Segurança contra deslizamento
 - 3.1.3. Estabilidade contra tombamento
 - 3.2. Critérios para a distribuição das pressões sob as sapatas
 - 3.2.1. Construções acima do nível da água subterrânea
 - 3.3. Casos efetivos de carga

Premissas de carga no escoramento da escavação (vide cap. 3 das normas NC-03)

São tratados em separado:

- Cargas no escoramento da escavação
1. Tipos de paredes de escoramento
 - 1.1. Taludes de corte a céu aberto
 - 1.2. Paredes de estacas metálicas, com pranchões de madeira e escoramento comum
 - 1.3. Paredes rígidas com escoramento comum
 - 1.4. Parede de estacas metálicas, com pranchões de madeira com escoras comprimidas
 - 1.5. Paredes rígidas com escoras comprimidas
 2. Estágios de construção
 - 2.1. Paredes de estacas metálicas com pranchões de madeira e escoramento comum
 - 2.2. Paredes rígidas com escoramento comum
 - 2.3. Paredes de estacas metálicas com pranchões de madeira com escoras comprimidas
 - 2.4. Paredes de estacas metálicas com pranchões de madeira, com escoras comprimidas

Cargas móveis

1. Carga útil na zona de influência da vala
2. Cargas móveis de pontes auxiliares

Premissas de carga para construção semi-enterrada, em forma de "U" (Vide cap. 3 das normas NC-03)

Premissas de carga para construção semi-enterrada, em forma de "U"

1. Definição e campo de aplicação

2. Bases para o cálculo

Índice dos anexos

8 anexos.

Escoramento de escavações (vide cap. 4 das normas NC-03)

Este capítulo contém uma descrição dos diversos métodos de escoramento.

1. Paredes da vala
 - 1.1. Generalidades
 - 1.2. Taludes
 - 1.3. Paredes de estacas metálicas cravadas e pranchões de madeira
 - 1.3.1. Estacas metálicas
 - 1.3.2. Pranchões de madeira
 - 1.4. Paredes de estacas-pranchas de aço
 - 1.5. Parede diafragma
 - 1.5.1. Comprimento dos painéis das paredes diafragma
 - 1.5.2. Lama tixotrópica
 - 1.5.3. Profundidade das paredes de guia
 - 1.5.4. Espessura das paredes-diafragma
 - 1.5.5. Juntas
 - 1.5.6. Armadura
 - 1.5.7. Concreto
 - 1.5.8. Dimensionamento como parede da vala.
- 1.6. Paredes de estacas justapostas
2. Escoras
3. Estacas-suporte no meio da escavação
4. Ancoragem
5. Vigas longitudinais
6. Contraventamento
 - 6.1. Contraventamento horizontal
 - 6.2. Contraventamento vertical
7. Conexões
8. Pontes auxiliares para o tráfego e cobertura da via

Drenagem (vide cap. 5 das normas NC-03)

São descritos os diferentes métodos de drenagem, propriedades da mecânica dos solos nas drenagens e medidas de precaução.

1. Diferentes possibilidades de drenagem das valas de fundação
 - 1.1. Drenagem a céu aberto
 - 1.2. Rebaixamento do lençol freático
 - 1.2.1. Poços gravitacionais
 - 1.2.2. Processos a vácuo
 - 1.2.3. Processo eletro-osmótico
 - 1.3. Uso de ar comprimido
2. Propriedades mecânicas dos solos que deverão ser observadas nas drenagens
3. Medidas de segurança
 - 3.1. Fornecimento de energia elétrica
 - 3.2. Controle das águas bombeadas
 - 3.3. Proteção contra águas superficiais
 - 3.4. Medidas e observações dos resultados obtidos
4. Valores provisórios de K para as diversas camadas de solo de São Paulo
5. Resumo.

Projeto e cálculo das construções (vide cap. 6 das normas NC-03)

1. Estruturas de túneis e estruturas semi-enterradas em forma de "U"
 - 1.1. Generalidades
 - 1.2. Bases de cálculo
 - 1.3. Coeficiente de segurança e tensões admissíveis
 - 1.4. Detalhes construtivos
2. Estruturas em trechos elevados do metrô
 - 2.1. Generalidades
 - 2.2. Bases de cálculo
 - 2.3. Coeficiente de segurança e tensões admissíveis
 - 2.4. Detalhes construtivos
3. Edifícios especiais
 - 3.1. Tipos de edifícios especiais
 - 3.2. Bases de cálculo

Setores especializados

1. Telas de aço para concreto
2. Fundações estakeadas

Os anexos contém:

Cortes transversais padronizados para "cut-and-cover", para construções semi-enterradas em forma "U" e para trechos elevados, bem como:

dimensionamento e construção de pilares de concreto armado sujeitos a colisões; cobertura de concreto, forma dos pilares e proteção contra correntes de fuga.

Materiais de construção (vide cap. 7 das normas NC-03)

Neste capítulo são apresentados dados sobre os materiais de construção, válidos para todas as construções auxiliares necessárias para o metrô e

para toda a construção em bruto, com exceção dos materiais de impermeabilização, para o acabamento arquitetônico e para os equipamentos necessários das instalações ferroviárias.

São descritos:

1. Área de influência
2. Concreto
 - 2.1. Componentes
 - 2.1.1. Agregados
 - 2.1.2. Cimento
 - 2.1.3. Água para amassamento
 - 2.2. Tipos de concreto
 - 2.2.1. Concreto local — concreto pré-misturado
 - 2.2.2. Diversos tipos de concreto utilizados
 - 2.3. Testes de concreto
3. Aço para concreto
4. Paredes de alvenaria
5. Perfis de aço
6. Madeira para construção

Impermeabilização (vide cap. 8 das normas NC-03)

Os métodos de impermeabilização são descritos com todas as instalações auxiliares e medidas de segurança. O capítulo contém as seguintes descrições:

2. Métodos de impermeabilização
3. Impermeabilização betuminosa
 - 3.1. Generalidades
 - 3.2. Execução
 - 3.2.1. Número de camadas
 - 3.2.2. Impermeabilização da parte inferior
 - 3.2.3. Reforço das arestas
 - 3.2.4. Camadas de proteção
 - 3.2.5. Juntas
 - 3.2.6. Impermeabilização adicional nos limites dos trechos
 - 3.2.7. Superfícies inclinadas
 - 3.2.8. "Impermeabilização suspensa"
 - 3.2.9. Estacas suporte no meio da escavação

- 3.2.10. Poços de bombas
- 3.2.11. Aberturas na impermeabilização
 - 3.2.11.1. Fechamento de poços de bombas
 - 3.2.11.2. Fixação final da impermeabilização
- 3.3. Materiais
 - 3.3.1. Pintura de base
 - 3.3.2. Pasta adesiva
 - 3.3.3. Demão de acabamento
 - 3.3.4. Guarnições de filtro
 - 3.3.5. Chapa de cobre corrugada
 - 3.3.6. Massa para enchimento das juntas
 - 3.3.7. Concreto de proteção
 - 3.3.8. Parede de proteção

13. Princípios mecânicos e eletro-técnicos

Ao serem estabelecidos os princípios mecânicos e eletro-técnicos, na implantação das instalações de um novo metrô, devem ser levadas em consideração a experiência obtida com a operação dos metrô existentes e, outrossim, as leis, prescrições e normas impostas pelas condições de tráfego local.

13.1. Proposta para a construção do material rodante

13.1.1. Dados básicos

Os dados básicos para a determinação da capacidade de um trem e com isto para o projeto construtivo dos carros são: a capacidade máxima de transporte requerida em uma linha e a capacidade máxima operacional da mesma.

A previsão que abrange um espaço de 20 anos, até 1987, (capítulo 10.), mostra que no ano de 1987 será necessária uma capacidade máxima de transporte por linha, de cerca de 80.000 pessoas/h.

A capacidade operacional de uma linha depende do número de trens que pode trafegar durante uma hora na linha, mantendo uma seqüência de maior intensidade. A seqüência de trens, por sua vez, depende em primeiro plano da capacidade do sistema de sinalização escolhido. Metrô com a maior incidência de passageiros no mundo são equipados com sistemas de sinalização que permitem um tempo de seqüência de 90 s. Somente com o controle automático dos trens poderá ser atingido um valor ainda inferior. (Cap. 23.). Como, todavia, a experiência operacional com tempos de seqüência inferiores a 90 s é muito limitada, se propõe para o Metrô de São Paulo um tempo de seqüência máximo de 90 s. Desde que no decorrer do tempo fique comprovado que as operações em São Paulo oferecem a segurança imprescindível para uma eventual redução do tempo de seqüência estabelecido, pode estudar-se a necessidade da adoção de medidas correspondentes.

Para o dimensionamento dos carros, isto significa que um trem de metrô deverá acolher no mínimo

$$\frac{80.000 \text{ pessoas/h}}{40 \text{ trens/h}} = 2.000 \text{ pessoas/trem}$$

13.1.2. Princípios para o esquema

É característica essencial de um metrô, transportar grande número de passageiros por trechos relativamente curtos e distâncias relativamente pequenas entre paradas. Para se obter as maiores velocidades possíveis nessas condições, o embarque e desembarque de passageiros nas estações deverá se dar da maneira mais rápida possível. Para tanto, o esquema dos veículos do metrô deverá prever, junto às portas, grandes áreas, nas quais os passageiros possam aguardar a ocasião de desembarque dos trens e pelas quais os passageiros que embarcam possam ser acolhidos rapidamente.

A acomodação dentro do carro poderá ser feita durante o trajeto.

Nas condições que se seguem, o espaço formado pela porta, área de admissão e assentos dispostos em ambos os lados, será chamado de "unidade básica". Desta forma, várias unidades básicas compõem a planta da caixa do carro, estando cada porta reservada para determinado número de passageiros. As figuras 13.1/1, 13.1/2 e 13.1/3 mostram três diferentes disposições dessas unidades básicas, conforme se desenvolveram no decorrer do último decênio nos metrô do mundo: as figuras 13.1/4 e 13.1/5 mostram disposições dos trens suburbanos de São Paulo.

Na figura 13.1/1 as repartições transversais de assentos estão dispostas em ambos os lados da área de admissão.

Essa distribuição, usada nos metrô de Londres, Paris, Estocolmo, Hamburgo e Munique, têm a vantagem de que os lugares sentados estão separados, de forma que os passageiros em pé não estorvam os sentados. A fileira de assentos não começa logo junto à porta, mas fica recuada, formando um nicho na área de admissão, onde há lugar folgado para um passageiro em pé. Essa disposição baseia-se no fato de que sempre há passageiros querendo permanecer junto à porta ao se aproximar o ponto de desembarque. Se faltar esse nicho na área de admissão, a entrada e saída de passageiros fica prejudicada. Outra vantagem decisiva dos assentos transversais é que nas fortes acelerações e decelerações dos veículos, os passageiros sentados, bem como uma parte dos passageiros em pé, terão um bom apoio no encosto dos bancos.

Uma pequena desvantagem dos bancos transversais em comparação à

disposição longitudinal dos assentos é o menor aproveitamento da área para passageiros em pé.

Os metrô de Nova Iorque e Berlim têm a disposição representada pela fig. 13.1/2, na qual os assentos estão dispostos ao longo das paredes do carro. Com esta disposição, para se obter o mesmo número de lugares sentados na unidade básica, os assentos precisam começar logo junto à porta, ocupando todo o comprimento. Assim é preciso desistir do mencionado nicho, a não ser que se queira perder um lugar sentado. Igualmente, essa disposição é de grande desvantagem em comparação com os assentos transversais quanto às condições por ocasião de arranque e frenagem do carro. Os passageiros sentados não encontram apoio contra as forças de inércia, a não ser que se apoiem uns contra os outros, o que certamente não aumentará o conforto. Com assentos longitudinais não haverá separação entre passageiros sentados e passageiros em pé. Assim, havendo superlotação, os passageiros em pé empurrarão os passageiros sentados, ocasionando grande desconforto.

A única vantagem no caso é o aproveitamento máximo do espaço para os passageiros em pé.

A figura 13.1/3 mostra uma combinação das duas disposições descritas até agora. Esta distribuição é também usada nos Metrô de Toronto e Montreal. Os assentos longitudinais estão junto às portas, os assentos transversais formam o final da unidade básica. Através dessa disposição parece haver à primeira vista, um espaço para passageiros em pé relativamente grande. Considerando, todavia, também, o espaço ocupado pelos pés dos passageiros sentados, então a área para os passageiros em pé fica do mesmo tamanho que na disposição com apenas assentos transversais. Essa solução não oferece também separação entre os passageiros em pé e os sentados.

As disposições que aparecem nas figuras 13.1/4 e 13.1/5 foram especialmente idealizadas para as condições dos trens suburbanos de São Paulo e Rio de Janeiro. Nessas disposições de lugares dispõe-se de áreas de admissão menores e, além disso, as mesmas desvantagens que as do esquema 13.1/3.

Pelo acima exposto, conclui-se que entre as disposições descritas, aquela só com assentos transversais oferece maior conforto aos passageiros. A rigorosa separação entre passageiros sentados e em pé, bem como o apoio

seguro dos passageiros sentados frente às forças de inércia provenientes do arranque e da frenagem do carro, aumentam o conforto de forma tão decisiva, que compensa o menor aproveitamento do espaço em confronto com a distribuição com assentos longitudinais. É de interesse mencionar aqui, que na construção do metrô em Estocolmo a primeira série de veículos foi construída pela metade com assentos transversais, e a outra metade com uma disposição combinada, conforme consta da fig. 13.1/3. Ao experimentar esses veículos, e fazendo uma pesquisa entre os usuários, verificou-se que o esquema com assentos transversais é muito mais confortável, tendo sido o preferido pelos passageiros. Desde então o Metrô de Estocolmo só tem sido provido de assentos transversais.

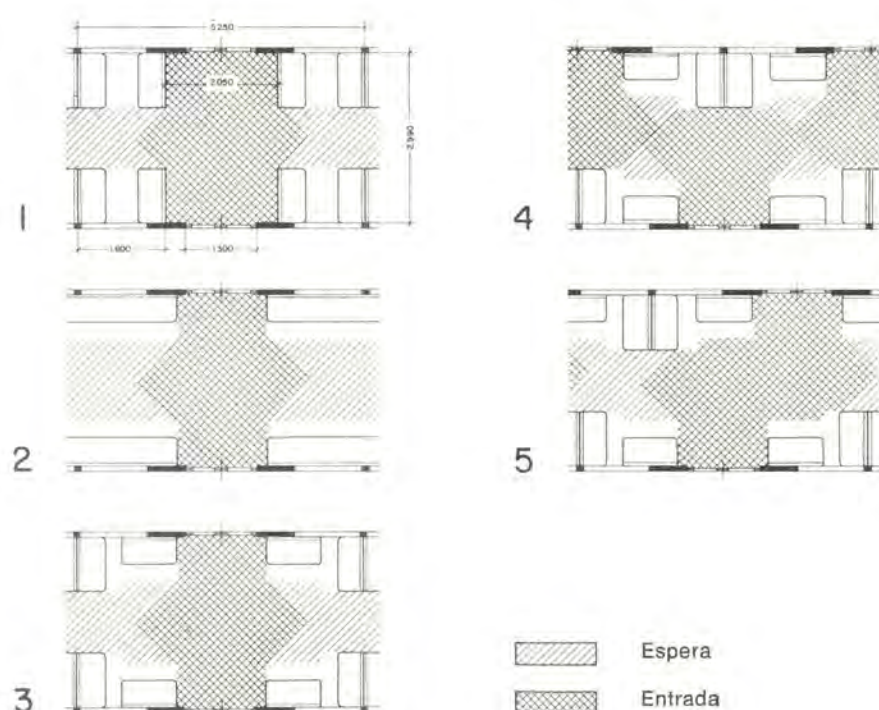
Assim sendo, recomenda-se para o Metrô de São Paulo **uma unidade básica com assentos dispostos transversalmente ao rumo da direção**, de acordo com a fig. 13.1/1.

Muitos veículos de metrô têm portas frontais nas suas extremidades. Estas portas são necessárias, quando as dimensões dos túneis não permitem a saída pelas portas laterais em casos de paradas de emergência. Para os veículos do Metrô de São Paulo esta exigência não existe, pois estão previstas passagens de emergência nos túneis, que permitirão a saída pelas laterais. Devido às distâncias relativamente curtas entre os pontos de parada, também não serão necessárias portas frontais para melhor distribuição dos passageiros dentro das composições.

13.1.3. Dimensões do carro

13.1.3.1. Largura do carro

As dimensões do carro dependem da unidade básica escolhida. A largura da unidade é a soma da largura dos bancos e a do corredor. Propõe-se uma largura do banco de 920 mm, que permite uma acomodação folgada de 2 pessoas. Não se recomenda a construção do banco para 3 pessoas, devido às constantes entradas e saídas de passageiros no metrô. O corredor entre as repartições dos bancos deverá possibilitar a rápida distribuição dos passageiros no veículo e proporcionar o maior espaço possível aos passageiros em pé. Se o corredor for suficientemente largo, ambas as exigências podem ser satisfeitas, pois a largura do veículo influi pouco no preço e no peso do carro. Portanto, o corredor foi



13.1

Fig. 13.1
Possibilidades no arranjo dos assentos em trens do MetrôFig. 13.2
Comparação de veículos de alguns Metrôs

projetado com 1.150 mm de largura, permitindo que entre duas pessoas em pé possa passar uma terceira sem estorvo.

Isto pôsto, tem-se uma largura interna do carro de 2.990 mm. As construções modernas de veículos ferroviários e de metrô tendo em vista o espaço das portas de correr, prevêm uma largura da parede de 110 mm, com o que se obtém a largura total do carro, medida exteriormente, de 3.210 mm. Essa largura corresponde às larguras de carros mais modernos, como por exemplo, os de Toronto e São Francisco.

13.1.3.2. Comprimento do carro

O comprimento de uma unidade básica compõe-se de duas vezes o comprimento das repartições dos assentos e do comprimento do espaço das portas e da área de admissão. A tabela da figura 13.2 mostra essas medidas para veículos de alguns metrôs que igualmente possuem a disposição transversal dos assentos.

Com base nessas medidas, bem como nas comparações com veículos das ferrovias brasileiras, foram escolhidas as seguintes dimensões: comprimento das repartições dos assentos 1.600 mm, comprimento do espaço das portas e da área de admissão 2.000 mm, vão livre da porta 1.300 mm. Com essas dimensões, a unidade básica admite 16 passageiros sentados. A área para passageiros em pé de uma unidade é de 9,68 m², sendo 5,95 m² do espaço da porta e da área de admissão.

O metrô não tem uma demanda distribuída por igual durante o dia; períodos de tráfego de pico (de rush)

de curta duração revezam-se com movimentos fraco e médio. Para não conferir dimensões exageradas, tanto para os veículos como para a frota, tendo em vista o curto tempo da demanda de pico (de rush), em geral calcula-se para os metrôs nas horas de pico (rush) 7 pessoas em pé/m². Como em casos de exceção poderá haver uma lotação de até 8 pessoas em pé por m², esta será a carga básica a ser calculada como o peso dos passageiros para o projeto técnico dos veículos. Aplicando-se essa cifra para a unidade básica, isto significa que nela acham lugar 68 pessoas em pé. Somados aos 16 lugares sentados, a unidade básica acolherá, portanto, 84 passageiros.

Segundo as considerações do cap. 13.1.1., a capacidade de admissão de um trem deverá ser de 2.000 pessoas. Isto significa que um trem deverá ter no mínimo 23,8 ou seja, 24 unidades básicas. Conforme está explicado mais adiante (Cap. 40.1.), em virtude do comando elétrico, sempre dois carros formarão uma unidade elétrica. Isto significa que o número de carros de um trem deverá ser divisível por dois. Assim, um trem poderá ser composto de 4 carros com 6 unidades básicas cada um, (caso A), de 6 carros com 4 unidades básicas cada um, (caso B), e de 8 carros com 3 unidades básicas cada um, (caso C) — (Fig. 13.3) a fim de se obter o mínimo necessário de 24 unidades básicas.

O carro formado de 6 unidades básicas, com 32.250 mm de comprimento, não poderá ser utilizado para metrô. Além das dificuldades técnicas da construção de um veículo de tal comprimento, os aumentos necessários no gabarito teriam que ser tão grandes, que seus custos não mais se justificariam.

O carro composto de 4 unidades básicas (caso B) tem um comprimento, medido entre engates, de 21.750 mm. Não há dificuldades na construção de um carro dessas dimensões. Como esse comprimento coincide aproximadamente com o comprimento dos carros das estradas de ferro brasileiras, não surgirão dificuldades referentes ao gabarito no transporte do local de fabricação para o local de operação. Funcionam carros similares no metrô de Toronto, tendo sido propostos também para a BART de São Francisco.

Finalmente, o carro da última alternativa, compõe-se de 3 unidades básicas e tem 16.500 mm de comprimento. Tanto em relação aos custos como relativamente ao peso, esse comprimento não é tão favorável quanto o de 21.750 mm. Sendo

equivalentes tanto o peso como o custo dos truques para carros de 21.750 mm e de 16.500 mm de comprimento, aumentam os custos e o peso no mesmo comprimento de trem com o número de truques utilizados. O trem composto por 6 carros de 21.750 mm de comprimento cada um, tem quatro truques menos do que o de 8 carros de 16.500 mm de comprimento cada um, o que resulta em favor do primeiro. Sendo o peso próprio de um truque no mínimo de 5-6 t, deve-se calcular uma economia de peso de 20 t por trem. Apresentam-se condições semelhantes quanto ao equipamento elétrico, apesar das diferenças de peso aqui não serem tão grandes, devido à necessidade de se instalar capacidade maior num veículo comprido, se pode calcular uma redução de peso de 2,0 t por trem. Além disso, o trem com 6 carros tem quatro engates centrais a menos do que o de 8 carros, incluindo os elementos do molejo, o que representa uma economia adicional de peso de cerca de 1 t. Assim sendo, um trem com 6 carros será 23 t mais leve do que um com 8 carros. Isto significa grandes economias nos custos operacionais, considerando-se as fortes acelerações e decelerações requeridas de um veículo de metrô.

Quanto aos custos em si, a situação é quase igual. Assim, os custos para um truque são de cerca de US\$ 20.000. O equipamento elétrico para uma unidade dupla custa cerca de US\$ 150.000, quatro engates centrais completos cerca de US\$ 8.000. Os custos para seis caixas de carros de 21.750 mm de comprimento são menores do que os de oito caixas de carro de 16.500 mm de comprimento, sendo portanto, a construção da caixa do carro também mais econômica. Mesmo não considerando, entretanto, o preço mais baixo da caixa do carro, a diferença de custos de um trem de seis carros em relação a um outro de oito carros, é aproximadamente US\$ 120.000. Em relação ao orçamento global de instalação de um metrô, isto significaria uma redução dos custos de investimento de, no mínimo, US\$ 18.000.000.

O trem com 6 carros é vantajoso também quanto aos custos de construção. Conforme está demonstrado na tabela da fig. 13.3, esse trem é 1,50 m mais curto do que o trem com 8 carros. Levando-se em conta que a maior parte dos traçados do Metrô de São Paulo ocorrerão subterraneamente, a redução de 1,50 m nas plataformas influirá consideravelmente nos custos da construção.

Em conclusão, recomenda-se para o Metrô de São Paulo um trem, composto de 6 carros com um comprimento entre engates centrais de 21.750 mm.

13.1.3.3. Altura do carro

A altura do carro é determinada pela altura do piso acima do topo do boleto, e pela altura do espaço para os passageiros. A altura do piso depende do tipo de construção dos truques, do tamanho dos motores e da necessidade de se instalar o equipamento elétrico sob a caixa do carro. Como a altura do piso influi diretamente sobre a altura do gabarito e, portanto, sobre as dimensões do túnel, a mesma deverá ser a mais reduzida possível. Por outro lado, não deverá ser tão baixa que obrigue a restrições na escolha dos truques, do tipo de motores ou na instalação do equipamento elétrico. Por essas considerações, bem como pelas comparações feitas com veículos de outros metrôs (vide fig. 13.4) estabeleceu-se uma altura de piso de 1.100 mm.

A altura do espaço destinado aos passageiros foi determinada, considerando-se o conforto dos usuários. Em razão do espaço requerido pelos usuários e equipamentos, e pelas comparações feitas com veículos de outros metrôs, foi determinada a altura de 2.300 mm.

Na fig. 13.4 estão discriminadas as medidas de interesse de alguns veículos de metrôs, pelas quais se deduziu o volume de ar por passageiro, necessário para o seu conforto.

Cabe mencionar aqui, que os citados números de passageiros estão baseados em indicações oficiais, que normalmente não valem para as demandas de pico, mas sim, para as demandas normais. Por isso, a título de complementação, indica-se para o veículo do Metrô de São Paulo também o número de passageiros numa lotação normal, a saber, 6 pessoas em pé/m² da área correspondente. Os valores são com 8 pessoas em pé/m² — 0,411 m³/pessoa, com 6 pessoas em pé/m² — 0,514 m³/pessoa. Este valor é superior aos de outros veículos de metrô comparáveis.

A altura de construção do teto do carro, considerando-se a instalação dos ventiladores ou de um equipamento de desumidificação, importa em 155 mm, com o que a altura total do carro acima do topo do boleto é de 3.550 mm.

13.2



13.3

13.1.4. O veículo para o Metrô de São Paulo

O resultado das verificações e das determinações anteriores, pode ser resumido como segue:

A menor unidade para o Metrô de São Paulo consiste em 2 carros. O comprimento de cada carro, medido entre engates centrais, é de 21.750 mm; a largura é de 3.210 mm e a altura acima do topo do boleto é de 3.550 mm.

Três dessas unidades podem formar um trem com 6 carros, com um comprimento total de 130.500 mm. Usa-se instalar uma cabina de comando em ambos os extremos de cada unidade. Isto é necessário, quando uma unidade opera sôzinha no tráfego. Os planos não prevêm encurtar ou dividir o trem para melhor adaptação às necessidades do tráfego. Outrossim, essa adaptação deverá ser feita através da variação na freqüência de trens. Desta forma, não se justifica a instalação de duas cabinas de comando em cada unidade. Teòricamente, poderia ser instalada apenas uma cabina de comando em cada extremidade do trem.

Todavia, para manter a unidade apta para manobras independentes, bem como para eventualmente poder efetuar com ela viagens de serviço, sem atendimento ao público, deverá ser prevista uma cabina de comando por unidade. Desta forma, será possível compor o trem também com 4 carros. Assim, em confronto com a convencional distribuição de duas cabinas de comando por unidade, serão economizadas três cabinas de comando por trem. Isto não significa apenas uma economia nos custos e

uma simplificação da instalação, como também o ganho de 12 assentos por trem.

A cabina de comando está por isso prevista para apenas uma das extremidades da unidade. Ocupará a metade da largura do carro na fileira de assentos mais externa. Para que o condutor tenha uma visão livre para ambos os lados, a cabina de comando ocupada deverá ser separada do espaço reservado aos passageiros por uma porta dobradiça. Essa porta deverá ser projetada de forma que, estando a cabina desocupada, ela possa ser recolhida liberando a metade da largura do carro para 5 lugares sentados.

Com essa distribuição, o trem com 6 carros apresenta as seguintes características:

- número de assentos: 397
- área para passageiros em pé: 230,0 m²

Poderá acolher o seguinte número de passageiros:

- com 8 pessoas em pé/m² área em pé: 2.237 passageiros/trem
- com 7 pessoas em pé/m² área em pé: 2.007 passageiros/trem
- com 6 pessoas em pé/m² área em pé: 1.777 passageiros/trem
- com 4 pessoas em pé/m² área em pé: 1.317 passageiros/trem.

Conforme foi explicado no cap. 13.1.1., para poder atender a uma demanda máxima de 80.000 pessoas por hora, e tendo em vista o intervalo possível entre trens de 90 s, o que corresponde a 40 trens/h, o trem

deveria poder acolher 2.000 passageiros. Pelas medidas estabelecidas isto significaria que nas horas de pico (do rush) haveria 7,00 pessoas/m² na área dos passageiros em pé. Esta cifra ainda é inferior à dos veículos do Metrô de Toronto.

13.1.5. Intensidade do arranque, da deceleração e da velocidade máxima.

A freqüência dos trens do metrô foi prevista para, no máximo, 40 trens por hora, em virtude da alta capacidade de transporte requerida. Todavia, essa freqüência de trens só pode ser mantida com segurança, se o tempo das saídas das estações e da passagem pelo trecho de segurança for o menor possível. Por outro lado, isto significa que a aceleração de partida deverá ser a maior possível, sem entretanto, ultrapassar um certo valor, em consideração ao conforto dos passageiros. As experiências de outros metrôs e pesquisas em universidades mostraram que a aceleração de partida poderá atingir 1,35 m/s², e que a mudança da aceleração por unidade de tempo (solavanco) não deverá ultrapassar 0,7 m/s³.

Também o trecho da frenagem tem influência sobre a freqüência de trens, pois, quanto mais curto tanto menor o intervalo entre os trens e tanto maior o número de trens que podem circular por hora. Todavia, um curto trecho de frenagem só pode ser obtido através de uma alta deceleração. E esta, por sua vez, está sujeita às leis físicas. A deceleração está limitada pelo

Fig. 13.3
Escolha do vagão do Metrô

Fig. 13.4
Dados especiais de carros de Metrô quanto ao conforto

coeficiente do atrito entre a roda e o trilho. Inúmeras pesquisas das estradas de ferro demonstraram que o perigo do bloqueio das rodas só estará excluído, quando esse coeficiente de atrito não ultrapassar $\mu = 0,15$. Como cada freio precisa de um certo tempo de reação para um efeito completo, não podendo também em consideração ao conforto (solavanco = 0,7 m/s³) reagir abruptamente, recomenda-se para o freio operacional — no caso para a frenagem eletro-dinâmica — uma deceleração média de 1,2 m/s². No caso da frenagem de emergência, não será preciso considerar o conforto, podendo a deceleração máxima atingir 1,5 m/s². Como as distâncias entre paradas de um metrô são curtas, só se poderá atingir uma alta velocidade no percurso se o veículo possuir uma alta aceleração de partida.

	Metrô de		São Paulo	Berlin (seção transv. grande)	Berlin (seção transv. pequena)	Hamburg	London	Muen-chen	New York	Paris (com pneus)	Phila-delphia	Stock-holm	Toronto	
Dimensões do carro	Altura acima do tópo do boleto	(m)	3,55	3,425	3,180	3,55	3,682	3,55	3,700	3,49	3,55	3,72	3,64	
	Largura total da caixa do carro	(m)	3,21	2,650	2,30	2,508	2,946	2,90	2,99	2,4	2,74	2,80	3,14	
	Comprimento entre engates	(m)	21,75	15,85	12,83	14,22	16,57	18,575	18,34	14,59	16,76	17,4	22,70	
	Altura do piso do carro acima do tópo do boleto	(m)	1,10	1,06	0,989	1,06	1,15	1,10	1,178	1,18	1,184	1,175	1,105	
Dimensões do espaço para passageiros	Altura interna acima do piso	(m)	2,3	2,3	2,11	2,18	2,3	2,3	2,17	2,2	2,17	2,35	2,1	
	Largura	(m)	3,1	2,422	2,05	2,4	2,65	2,796	2,78	2,4	2,591	2,68	2,9	
	Comprimento	(m)	21,0	14,0	11,03	12,27	14,9	16,5	16,4	14,3	15,1	15,55	20,9	
Número de passageiros por carro			292 (365)**	199	130	128	189	194 (242)	220	166	176	156	310	
Volume do espaço para passageiros			(m³)	150	78	47,7	64,1	90,7	106	99	75,5	85	98	134
Área do espaço para passageiros			(m²)	65	33,9	22,6	29,4	39,5	46,1	45,6	34,3	39,1	41,7	63,8
Volume de ar por passageiro (m³/passageiro)				0,514 (0,411)	0,392	0,367	0,5	0,48	0,546 (0,438)	0,45	0,455	0,483	0,628	0,432
Número de passageiros por área do espaço para passageiros (passageiros/m²)				4,5 (5,62)	5,87	5,75	4,35	4,79	4,21 (5,25)	4,82	4,83	4,5	3,74	4,86
Ventilação				motor	estático	estático	estático	estático	estático	motor	estático	motor	estático	estático

* Referente a um espaço cúbico equivalente

** Sem () com 6 pessoas em pé por m²
Com () com 8 pessoas em pé por m²

13.4

Essa aceleração, porém, não deverá além disso decrescer rapidamente em função da velocidade, devido à capacidade dos motores. Por isso, acrescenta-se a exigência de que o veículo atinja, no plano, a velocidade de 80 km/h em 30 segundos.

A rede do metrô em questão tem uma distância média entre paradas de aproximadamente 870 m. Como ficou antes estabelecido, uma velocidade de 80 km/h ainda será suficiente.

No desenvolvimento da rede do Metrô de São Paulo, porém, as distâncias entre paradas tornar-se-ão maiores, principalmente nos bairros mais afastados. Tendo em vista o desenvolvimento futuro, foi estabelecida uma velocidade máxima de 100 km/h para que se possa atingir a maior velocidade de percurso possível.

Portanto, os dados propostos para o programa de tração são os seguintes:

Velocidade máxima 100 km/h

Aceleração máxima de partida 1,35 m/s²

Máxima variação permitida para aceleração 0,7 m/s²

Tempo p/atingir a velocidade de 80 km/h 30 s

Deceleração média da frenagem operacional 1,2 m/s²

Deceleração da frenagem de emergência a partir de 100 km/h 1,5 m/s²

Capacidade de aceleração a 100 km/h $b \geq 0,13 \text{ m/s}^2$.

13.2. Sistemas de tração elétrica — seleção da corrente e da tensão

A melhor escolha do sistema de tração elétrica para o acionamento dos carros do metrô, em termos de corrente e tensão, requer uma investigação pertinente aos diversos sistemas em utilização, salientando-se as vantagens e desvantagens, em cada caso.

13.2.1. O sistema de corrente

De acordo com o tipo de corrente utilizada, distinguem-se, entre ferrovias, as de corrente contínua, as de corrente alternativa monofásica ou trifásica.

A escolha do sistema mais adequado de corrente depende de três condições fundamentais: forma de produção, transmissão e consumo de energia, isto é, fonte geradora, subestações e veículos (automotrizes), respectivamente.

13.2.1.1. O metrô com corrente alternativa monofásica, frequência industrial.

Nos veículos convencionais de corrente alternativa, à frequência industrial, com transformador de entrada, motor de comutação por pontos e motor de tração a coletor e excitação em série, torna-se difícil fazer a comutação devido à frequência relativamente alta da rede (60 kc).

Para enfrentar essas dificuldades, os chamados veículos-retificadores foram equipados com transformador de entrada, motor de comutação por

pontos, retificadores de silício, bobina niveladora e motor de corrente ondulatória, que apresentam construção um pouco mais complicada, porém uma boa solução para a operação.

Para a regulação dos motores de tração será utilizado o motor convencional de comutação por pontos. Igualmente podem ser considerados os motores de tração com controle de corte de corrente, cuja utilização já foi comprovada nas locomotivas elétricas de corrente alternativa. Todavia, esse sistema apresenta a desvantagem que o controle de corte prejudica o rendimento, aumentando, com isto, as perdas de transmissão.

Para um metrô utilizando corrente alternativa, no atual estado de desenvolvimento desta técnica, seriam levados em consideração somente veículos retificadores com motor de comutação por pontos.

Vantagens de um metrô utilizando corrente alternativa, monofásica com veículos-retificadores:

a) Utilização de um motor de corrente alternativa que corresponde a um motor de corrente contínua com excitação em série, que é, indubitavelmente, o mais adequado para serviços de tração.

b) Regulagem da tensão do motor através do transformador de entrada, quase sem perda.

c) Tensão relativamente alta na alimentação e, com isso, pequenas seções dos condutores da linha de contato.

d) Baixa queda relativa de tensão

na linha de contato e pequenas perdas ôhmicas nos condutores.

e) Tipo de construção simples das sub-estações.

f) A distância entre as sub-estações pode ser relativamente grande, dependendo do valor da tensão escolhida.

Desvantagens do metrô utilizando corrente alternativa, monofásica:

a) Pêso mais elevado nas instalações elétricas — cerca de 40% — do veículo retificador em relação ao veículo de corrente contínua.

b) O óleo do transformador constitui perigo potencial em veículos ocupados por passageiros.

c) O nivelamento da corrente ondulatória exige pesadas bobinas niveladoras.

d) A necessidade de espaço para a instalação elétrica no veículo é bem maior do que na solução de corrente contínua. Somente o transformador com resfriamento a óleo, bomba de circulação e recipiente de compensação, já toma bastante espaço no carro.

e) O relativamente complicado veículo-retificador está mais sujeito a avarias do que o veículo mais simples de corrente contínua.

f) A ligação da linha monofásica no sistema local de corrente trifásica desequilibra eletricamente a rede. Por esse motivo, e pela necessária separação das ligações à terra, fica excluído o suprimento direto através da rede pública de fornecimento de energia.

g) As perdas de transformação se dão tanto na sub-estação como no veículo.

h) Os veículos-retificadores são mais caros do que os veículos mais simples de corrente contínua, devido ao equipamento adicional, como transformador, retificador, bobina niveladora, etc.

Assim, ainda não foram feitas experiências em número suficiente para um metrô empregando corrente alternativa monofásica. Até esta data não pode ser adotada como alternativa de solução, devido às condições de peso no veículo. O desenvolvimento da recente técnica de corrente alternativa, ainda demorará diversos anos. A construção de um metrô em corrente alternada significa um risco de ordem técnica.

13.2.1.2. O metrô utilizando corrente alternativa trifásica

Veículos de corrente alternativa trifásica, de técnica convencional com máquinas assíncronas, com induzido de anéis coletores, estão excluídos devido às dificuldades que apresentam na regulação de velocidade para uma operação de metrô com freqüentes partidas. Motores de indução tem praticamente rotação constante, que é modificável em poucos estágios, por exemplo, mediante comutação de polos ou comutação em cascata. A comutação de estágio para estágio, bem como o arranque deverá ser feita por meio de resistências. Também apresenta desvantagem a grande queda no conjugado do motor com apenas pequena queda na tensão da linha de alimentação.

a) Emprêgo de uma máquina assíncrona com induzido em curto circuito (chamado motor de tração com induzido de gaiola ou sem coletor), dentro do seguinte esquema:

Redução da tensão em um transformador trifásico, retificação em um retificador de dois sentidos com ondulado acoplado. A regulação do conjugado do motor é feita variando freqüência e tensão. Com esta conexão a máquina assíncrona poderá ter comportamento que se assemelhe ao do motor de corrente contínua com excitação em série. Esse acionamento, todavia, ainda não foi suficientemente experimentado e é bastante dispendioso.

b) Emprêgo de motor de corrente ondulatoria dentro do seguinte esquema:

Redução da tensão em um transformador trifásico, retificação da corrente trifásica com tiristôres, controle de corte. Não há necessidade de bobinas de nivelamento. O controle deste sistema é fácil.

Ambos os sistemas foram examinados nos veículos de teste da São Francisco BARTD. Visto que ambas as soluções não foram satisfatórias, decidiu-se pela utilização de corrente contínua.

As vantagens de um metrô utilizando corrente trifásica com veículos com controle de corte da corrente.

a) O motor de tração sem coletor com o correspondente controle eletrônico é bastante adequado para fins de tração. Ele não carece de cuidados especiais, e, presumivelmente, tem alto rendimento de trabalho.

b) Os motores e o transformador do veículo têm um peso reduzido por unidade de potência.

c) Os serviços auxiliares do veículo podem ser alimentados diretamente com corrente trifásica.

d) A queda de tensão nas instalações de alimentação de corrente e as perdas ôhmicas nos condutores são relativamente baixas. A distância entre os pontos de alimentação é grande.

e) A transformação trifásica de energia permite uma carga equilibrada na rede, sem conexões difíceis.

f) A necessidade de corrente para a tração pode ser atendida por alimentação direta da rede local existente.

As desvantagens do metrô utilizando corrente trifásica

A desvantagem principal da solução de corrente trifásica é a necessidade de alimentação bi-polar de corrente (linha de contato bi-polar ou dois trilhos de contato) que é de construção e manutenção caras e que permite apenas tensões até cerca de 4 kV. Uma outra desvantagem é o transformador instalado no veículo tal como nos veículos de corrente monofásica, o qual aumenta o "peso-morto" dos veículos e representa uma fonte de graves perigos para os passageiros. O emprêgo de veículos de corrente trifásica exige, ainda, um longo período de experiências, a fim de que sejam desenvolvidos novos aperfeiçoamentos e comprovada a sua segurança operacional.

13.2.1.3. O metrô utilizando corrente contínua

Os veículos empregando corrente contínua, como são geralmente colocados em funcionamento num sistema de metrô, são de construção simples. A seleção de velocidades se dá por meio de resistências de aceleração, conexão de motores em série ou em paralelo e pela redução do campo magnético. As manobras de comando necessárias são executadas por contadores. Como motor de corrente contínua é usado o motor com excitação em série, que é o mais indicado para o caso. Uma inovação no campo de acionamento dos veículos de corrente contínua, é o chamado controle de corte por tiristôres. Com este pode ser alcançado um controle contínuo e sem perdas através de mudanças nos impulsos de ignição dos tiristôres. Entretanto, apresentam grandes dificuldades as ondas harmônicas geradas na rede de corrente contínua, por esse sistema de comutação. Por esse motivo, recomenda-se equipar os veículos de corrente contínua, dentro da técnica já comprovada de comando por contadores.

As vantagens do metrô utilizando corrente contínua com veículos convencionais:

a) No motor de corrente contínua, a excitação em série é simples, resistente e de elevada capacidade de sobrecarga. Igualmente, apresenta boa adequação à frenagem elétrica.

b) Os veículos de corrente contínua são bem mais leves do que, por exemplo, os veículos-retificadores, visto que se exclui o peso do transformador, resfriador a óleo, retificadores e bobina niveladora.

550 — 650 Volt		750 — 825 Volt		1000 — 1500 Volt	
Athinai	T	Berlin	T	Buenos Aires (A)	C
Budapest	C	Hamburg	T	Barcelona II	C
Boston	T	Kiev	T	Barcelona I	T
Buenos Aires	T	Leningrad	T	Buenos Aires (CDE)	C
Chicago	T	Lisboa	T	Roma	C
Cleveland	C	Milano	T	San Francisco	T
Glasgow	T	Montreal	T	Tokyo II	C
London	T	Moskwa	T		
Madrid	C	Muenchen	T		
Nagoya	T	Osaka	T	Legenda	
New York	T	Oslo	T		
Paris	T	Rotterdam	T	T = com 3.º trilho	
Philadelphia	T	Wien	C		
Stockholm	T			C = com linha de contacto	
Tokyo	T				
Toronto	T				
44%		36%		20%	
dos metrô relacionados					

Fig. 13.5
Tensões operacionais do Metrô com corrente contínua

c) Os trilhos de contato para alimentação de um polo da corrente podem ser interligados; isto significa apreciável vantagem no caso de avarias no sistema alimentador.

d) O rendimento dos modernos retificadores de silício é bastante alto (até 99,6%). O rendimento do transformador só deve ser levado em consideração nas sub-estações.

e) As três fases do sistema trifásico de alimentação são solicitadas por igual.

f) A técnica da corrente contínua na operação de metrô já se baseia em grande experiência e é comprovada. A segurança operacional é elevada.

As desvantagens do metrô utilizando corrente contínua:

a) O arranque dos veículos é realizado através de resistências estando, por este motivo, sujeito a perdas.

b) O valor da tensão de alimentação de corrente é estabelecido sobretudo em função das limitações do motor. Portanto, as distâncias entre pontos de alimentação tornam-se relativamente pequenas e as perdas ôhmicas nos condutores são grandes. A intensidade de corrente nas instalações de alimentação são elevadas.

c) O sistema de corrente máxima exige medidas especiais de construção contra correntes de fuga e conseqüentes riscos de corrosão.

13.2.1.4. Conclusões resumidas

O principal argumento a favor da solução de **corrente trifásica** é a solicitação equilibrada da rede; o contra-argumento principal, por sua vez, é a necessidade de uma alimentação de corrente bi-polar bastante complexa.

As vantagens da solução de **corrente alternativa monofásica**, situam-se principalmente no setor de transformação, portanto nas instalações fixas de abastecimento.

O tipo das sub-estações é mais simples. A desvantagem principal consiste nas instalações elétricas dos próprios veículos, que são pesadas e volumosas.

A vantagem principal do emprêgo de **corrente contínua** situa-se no setor dos veículos, isto é, proporcionando carros automotrizes leves, simples e seguros, no tráfego.

A decisão sobre que sistema de corrente seria o mais adequado, tendo-se em vista as condições existentes, é uma questão relativa às exigências operacionais e à rentabilidade. A elevada freqüência de trens planejada de 90 s exige na operação, altos valores de aceleração e deceleração, os quais tecnicamente exigem um veículo mais leve possível. Do ponto de vista econômico, o baixo peso do veículo significa economia de energia no transporte do "peso morto" do veículo.

O metrô utilizando corrente contínua tem, em confronto com o de corrente alternativa, a grande vantagem dos veículos mais leves. Em comparação ao sistema de corrente contínua, os veículos do metrô utilizando corrente alternativa integram serviços e equipamentos que, no primeiro caso concentram-se nas sub-estações, o que torna esses veículos mais pesados.

Quanto a essas características fundamentais dos sistemas de corrente pode-se portanto, concluir:

Corrente alternativa — é vantajosa quanto à alimentação de corrente em ferrovias que têm seus investimentos principais compreendidos nas instalações fixas concentradas, isto é, com relativamente poucos veículos por quilômetro de percurso, o que é característico para trens de longa distância.

Corrente contínua — é preferível na alimentação de corrente quando é utilizado um número relativamente grande de veículo por quilômetro de percurso. Assim sendo, **para o programa operacional de um metrô, a solução de corrente contínua é a mais adequada.**

13.2.2. Tensão

13.2.2.1. Generalidades

Na escolha da tensão para a operação de um metrô, as considerações técnicas deverão ser determinadas pelas exigências requeridas para um bom serviço, quanto à segurança e à precisão dos meios operacionais utilizados.

Em atenção a essas exigências, deverá ser escolhida uma tensão já amplamente utilizada em instalações de metrô existentes. Desta forma estará assegurada a utilização de elementos comprovados há muitos anos, permitindo prever um

funcionamento essencialmente livre de interrupções.

Um exame das tensões utilizadas em todos os metrô do mundo (fig. 13.5) mostra que cerca de 80% dos metrô funcionam com tensões abaixo de 1 000 V; sendo que dessas, as tensões de serviços mais difundidas são as de 600 V e 750 V (41% e 38%, respectivamente). Segundo o acima exposto, deverá ser escolhida uma dessas duas tensões, cabendo a decisão final às considerações de ordem técnica.

13.2.2.2. Tensões padronizadas para ferrovias com corrente contínua

De acordo com as "Normas UIC 610 V", as tensões nominais de alimentação de redes ferroviárias com corrente contínua, limitam-se aos valores padronizados indicados a seguir, adotados para fins de uniformização, pela "Comissão Mista Internacional para Equipamentos Elétricos Ferroviários (CMT)": 600 V, 750 V, 1 200 V, 1 500 V, 2 400 V e 3 000 V. Todavia, recomendou-se expressamente que nas novas instalações de ferrovias sejam utilizadas somente as tensões nominais de 750 V, 1 500 V e 3 000 V.

As normas para tensão indicadas pela UIC, foram totalmente aceitas pela IEC (International Electrotechnical Commission) e publicadas em seu boletim N.º 48.

13.2.2.3. Vantagens e desvantagens básicas dos sistemas normalizados de tensões nominais

a) Geral

Três possibilidades de diferentes sistemas de tensão são oferecidas:

1. Baixa tensão (600 V; 750 V), com alimentação de corrente através de terceiro trilho.

2. Média tensão (1 200 V; 1 500 V), sendo 1 500 V a tensão limite para alimentação de corrente através de terceiro trilho.

3. Alta tensão (2 400 V; 3 000 V), com alimentação de corrente exclusivamente através de linha aérea de contato, sendo 3 000 V e a tensão limite para eletrificação de uma ferrovia de longo percurso com corrente contínua.

b) Baixa tensão de alimentação (600 V; 750 V)

As vantagens particulares das tensões relativamente baixas relacionam-se ao veículo. Essas tensões proporcionam condições de isolamento simples e favoráveis quanto ao peso. Dentro desses limites o peso unitário dos motores elétricos de tração é pequeno e o peso total do equipamento elétrico do veículo motor poderá ser relativamente baixo.

A isto se acrescentará a vantagem da distribuição por meio de terceiro trilho quanto à parte fixa da alimentação de corrente. Essa instalação é mais robusta e segura do que a da linha aérea de contato. Além disso, os custos de manutenção são mais baixos. Em confronto com a linha aérea de contato, o terceiro trilho necessita de menor seção transversal do túnel.

As desvantagens da tensão baixa relacionam-se às instalações fixas. Para limitar a queda da tensão e as perdas na distribuição, precisa ser diminuída a distância entre

sub-estações, o que resulta num maior número das mesmas.

Além dos aspectos válidos para ambos os tipos de baixa tensão tanto a de 600 V como a de 750 V, a seguir serão detalhadas as diferenças existentes entre essas duas tensões operacionais, muito freqüentemente utilizadas para sistemas de metrô.

A aplicação de 600 V deve-se principalmente à tensão usualmente adotada para bondes, tanto no passado como presentemente, sendo geralmente utilizada nos metrô antigos (Londres, Chicago, Paris, Nova Iorque). Todavia, logo ficou patente que as exigências feitas a um metrô aumentam com o crescimento da cidade, ficando, pois, estabelecido que nos metrô construídos posteriormente, a tensão fosse aumentada para 750 V (Moscou, Milão, Oslo, Montreal, Munique).

Com isto conseguiu-se uma redução de intensidade da corrente de 25% podendo, com os mesmos custos de implantação, aumentar-se consideravelmente a capacidade de linha, sem causar problemas adicionais relativos à tensão.

Cabe aqui mencionar também o Metrô de Montreal onde, contrariamente ao Metrô de Toronto, tendo em vista as vantagens já citadas da tensão mais alta, em 1962, foi escolhida a tensão de 750 V. As mesmas considerações decidiram a alteração do nível de tensão em Paris, onde as linhas mais recentes foram instaladas com 750 V.

Por outro lado, a distância entre sub-estações somente tem um significado teórico no confronto de 600 V e 750 V. Em virtude dos aspectos da construção e da operação, geralmente as sub-estações retificadoras são situadas perto das estações. Tendo em vista as distâncias entre paradas usualmente estabelecidas em sistemas de metrô, forçosamente em cada segunda estação será instalada uma sub-estação. Este aspecto permanece o mesmo para ambas as tensões.

c) Média tensão de alimentação (1 200 V; 1 500 V)

As vantagens desses sistemas de tensão relacionam-se à parte fixa da distribuição, pois as desvantagens da baixa tensão de alimentação que ali se verificam, são reduzidas com uma tensão mais alta.

Do ponto de vista puramente técnico, a alimentação de corrente ainda poderá ser feita através da instalação de um terceiro trilho. Todavia, a tensão mais alta tem efeito negativo sobre o isolamento, pois ela requer um equipamento elétrico mais pesado no veículo em virtude das classes de isolamento mais elevadas e, além disso, o isolamento e a proteção dos contatos no túnel serão mais difíceis e mais dispendiosos.

d) Alta tensão de alimentação (2 400 V; 3 000 V)

Aqui as vantagens consistem numa transmissão mais econômica de energia e na redução do número necessário de subestações retificadoras.

Todavia, em face dessas vantagens encontram-se grandes desvantagens: por exemplo, em comparação com o sistema de 750 V, os veículos tornam-se cerca de 6% mais pesados, relativamente ao peso vazio (tara) do carro. O aumento necessário

do isolamento requer mais espaço para a instalação dos equipamentos no veículo. A alimentação de corrente precisa ser feita através da instalação de linha aérea de contato. As despesas de manutenção são maiores do que para a instalação do terceiro trilho, sendo a segurança operacional menor.

A linha aérea de contato como alimentação de corrente requer, em comparação com a instalação do terceiro trilho, um gabarito de passagem livre 1 150 mm mais alto, sendo que os custos adicionais por quilômetro de túnel importam em 10 até 15%. Uma subestação de 3 000 V, por exemplo, devido à classe de tensão mais alta, necessita de um espaço 20% maior por unidade, do que uma subestação para baixa tensão.

13.2.2.4. Conclusões finais

Pelo exposto se pode concluir que, em geral, aumentando a tensão de alimentação de corrente, as despesas com o equipamento elétrico passam do lado econômico (parte fixa da distribuição de energia) para o lado mais dispendioso, qual seja os veículos.

Segundo estudo do Prof. Eng.º Patrassi,^{*)} porém, a tensão de serviço econômica de um metrô depende muito de sua capacidade de transporte por hora. Portanto, em metrô com elevada freqüência de tráfego, de acordo com a elevação da tensão, os custos de investimento, para o material rodante são mais altos do que a economia obtida nas instalações fixas de distribuição. Segundo o citado estudo do Prof. A. Patrassi, para uma capacidade de transporte de 45 000 passageiros por hora, o emprêgo de uma tensão de 1 500 V conduziria a um acréscimo de cerca de 15% nos investimentos para o equipamento elétrico das instalações fixas e dos veículos, bem como de 18% nos custos anuais da operação, quando comparada com uma alimentação à tensão de 750 V. Para o Metrô de São Paulo, para o qual se calculam capacidades similares, ou mesmo mais elevadas, a escolha de uma tensão de serviço elevada, traria consideráveis custos adicionais, tanto na construção como durante a operação.

Apesar das mencionadas vantagens na parte fixa da distribuição, vê-se pois, que a média tensão de alimentação, considerando-se o sistema no seu conjunto, é economicamente inferior ao sistema de baixa tensão, não sendo portanto, recomendável para o Metrô de São Paulo. Cabe aqui lembrar também as comparações estatísticas feitas entre Paris (600/750 V) e Barcelona (1 500 V); as mesmas demonstraram que os tempos de paralisação dos veículos de Barcelona, em virtude de falhas no equipamento elétrico, importam em quase o dobro dos verificados em Paris.

Até hoje ainda não foram usadas altas tensões de alimentação para um metrô. A tensão contínua relativamente alta traz vantagens quando maiores áreas de alimentação precisam ser supridas por poucas subestações, como acontece em ferrovias de longo percurso com trajetos extensos ou em instalações de metrô com capacidades menores.

Para o programa operacional de um metrô com capacidade tão grande como o de São Paulo, as mesmas não seriam apropriadas.

Como as altas e médias tensões acham-se excluídas, e como, de acordo com o que mostra a estatística, as tensões de alimentação abaixo de 1 000 V são as mais usadas para metrô, deverá ser escolhida entre estas a tensão de serviço.

Pelas considerações expostas, a proposta para o Metrô de São Paulo é de uma tensão de serviço de 750 V.

Esta proposta é corroborada também pelas normas da IEC, as quais, conforme já foi observado, também recomendam especialmente a tensão nominal de 750 V.

As pesquisas efetuadas no mercado nacional da indústria elétrica demonstraram, que para as instalações fixas é tecnicamente irrelevante a escolha da tensão de 600 V ou de 750 V. Para ambas as tensões, todos os equipamentos podem ser fornecidos sem dificuldades.

Com relação ao equipamento elétrico do veículo, tanto para os 600 V como para os 750 V são oferecidas boas possibilidades para a fabricação nacional de pelo menos 60% do equipamento do veículo. A indústria elétrica poderá adaptar-se, sem dificuldades técnicas a ambas as tensões.

(*) Prof. Ing. Patrassi, A.: "La scelta della tensione di elettrificazione per le ferrovie urbane e suburbane a forte traffico", Ingegneria Ferroviaria, 1964, Aprile.

14. Bases do planejamento técnico de ferrovias

14.1. Instruções ferroviárias

A construção e operação das ferrovias especializadas de um metrô exigem o estabelecimento de normas e especificações técnicas adequadas, que se aproximam daquelas necessárias à implantação das estradas de ferro convencionais.

No entanto, falta ao país, até hoje, qualquer experiência sobre sistemas de metrô ou trens metropolitanos que permita fixar normas nacionais sobre esse tipo de transporte.

Assim, para a elaboração das diretrizes e princípios técnicos que serviram de base para o presente estudo e que são recomendados para a implantação do Metrô de São Paulo, se utilizaram as normas da UIC e brasileiras sobre construções ferroviárias e na adaptação da experiência das estradas de ferro nacionais mas, principalmente, aquelas adotadas pelos mais modernos sistemas de metrô em operações. Estas diretrizes e princípios submetidos à apreciação do Departamento Nacional de Estradas de Ferro (DNEF), foram devidamente aprovadas.

Uma das características que distinguem um projeto de um metrô, é o traçado da linha em faixa autônoma, sem cruzamento de nível com qualquer outro meio de transporte.

Quanto à bitola foi escolhida a máxima usual nas ferrovias brasileiras, ou seja, 1.600 mm (vide recomendação do IFPTE (*). Tendo em vista as medidas do carro, determinadas no capítulo 13.1., esta bitola proporciona uma base de apoio muito favorável para a estabilidade do carro, reduzindo a amplitude das oscilações transversais do veículo. Quanto mais reduzido puder ser o ângulo dessas oscilações, tanto menores serão os gabaritos necessários nos túneis. Por esse motivo, a bitola de 1,00 m não é adequada à largura fixada para os carros.

Além disso, cumpre ressaltar que a indústria brasileira de veículos e desvios está aparelhada para produção de material destinado às linhas dessa bitola.

Com base nas dimensões do veículo foi determinado o gabarito de passagem livre. Os cálculos poderão ser deduzidos do anexo A 14.2.

O comprimento da plataforma resulta do comprimento de uma composição completa de 130,50 m, acrescidos de uma determinada folga. Com a

precisão da frenagem do trem, de cerca de 2 m e uma distância de aproximadamente de 2,10 m entre os cantos externos das primeiras portas e as cabeceiras dos carros, se pode considerar o comprimento da plataforma de 136,00 m como suficiente. Para a caixa do carro está prevista uma suspensão pneumática, com o que a altura do piso do carro pode ser mantida praticamente constante. Assim sendo, poderá ser fixada para as plataformas a altura de 1,05 m sobre o boleto dos trilhos (Cap. 13.1.3.3.).

De acordo com a conformação topográfica de São Paulo, haverá necessidade de longos trechos de linha em rampa até 40‰.

Só assim será possível estabelecer o nível da plataforma das estações a profundidades convenientes. Por outro lado, com rampas maiores, a capacidade instalada nos veículos alcançará níveis anti-econômicos. Nas estações previstas para estacionamento dos trens, a rampa máxima não deverá ultrapassar os 2,5‰.

Admitindo-se pequenas variações de velocidade, o raio mínimo nos trechos de linha será de 300 m. Este raio permite uma velocidade apenas 15% abaixo da velocidade máxima, o que corresponde ainda às exigências operacionais. Outro motivo para a determinação de um raio mínimo de 300 m é o alto desgaste do material produzido pela passagem pelos trechos de curvatura mais acentuada, desgaste que para o raio de 300 m se mantém dentro de limites razoáveis.

Para as estações serão fixados raios mínimos de 400 m, a fim de limitar o espaço livre entre a aresta da plataforma e a soleira do veículo dentro de um máximo razoável.

Somente em casos muito especiais devem ser permitidos valores abaixo dos limites acima citados. O raio mínimo, em vias secundárias, será de 150 m, devido à construção do veículo.

A super-elevação padrão foi calculada para compensação total da força centrífuga, de acordo com os dados experimentais em metrô empregando carros e velocidade semelhantes. Nos casos em que esse equilíbrio não pode ser alcançado pelo emprêgo da super-elevação máxima, será admitida uma aceleração centrífuga, não equilibrada, até 0,85 m/s².

A carga por eixo determinada para a super-estrutura e para as instalações,

de 14 t é calculada com peso próprio do veículo mais a sua carga útil.

Os demais valores, para os raios de concordância e para as curvas de transição encontram-se tabulados juntamente com os outros elementos de construção das instalações ferroviárias (Figs. 14.1 e 14.2).

14.2. Operação e instalações de sinalização

Como principal responsável pelo transporte urbano de passageiros, o metrô deverá atender a todo o tráfego à curta distância dentro de sua área de influência. Para poder cumprir essa tarefa, deverá possuir o máximo de capacidade e facilidades compatíveis com este sistema de transporte.

Para poder oferecer aos usuários dos meios de transportes públicos tempos de viagens semelhantes aos tempos gastos no transporte individual e para integrar a área econômica de São Paulo o máximo possível, no que se refere ao transporte, se deve aspirar para o metrô uma velocidade comercial de, no mínimo, 30 km/h.

Em virtude da solicitação mais intensa no centro urbano, distâncias de 500 m até 600 m entre as paradas ainda são aceitáveis. Nos bairros mais afastados e nos subúrbios, recomenda-se o aumento dessas distâncias para 1.000 m até 1.200 m, a fim de que possam ser atingidas altas velocidades médias no percurso. Trajetos a pé de 6 a 8 minutos, que eventualmente serão necessários para alcançar as estações, ainda são aceitáveis.

A permanência dos trens nas estações é determinada, em primeiro lugar, pelo número de passageiros que embarca ou desembarca. Com adequada formação das composições e respectivas dimensões das plataformas, bem como dos acessos e saídas, o tempo de permanência deverá ser sempre inferior a 30 s que é o limite máximo para a manutenção da alta intensidade de seqüência dos trens. Paradas mais demoradas no caso de seqüência curta de 90 s exigirão a construção de uma segunda via de chegada e saída em cada plataforma. Economias de tempo, produzidas por eventuais partidas antecipadas, deverão ser aproveitadas em um tráfego funcional ou para compensar atrasos.

A oferta de lugares e o expediente

operacional deverão ser adaptados à variação da demanda de transporte nos dias úteis, domingos e feriados.

Para manter a fluência operacional no caso de interrupções, de reparos ou manutenção da via, deverá ser considerada, para marcha em sentido contrário ou manobra, a possibilidade de mudança de via a cada 3 ou 4 estações. Além disso, um número suficiente de vias de estacionamento deverá ser previsto.

Assim sendo, caberá às instalações de sinalização prover o comando operacional de tais meios técnicos auxiliares, a fim de que o serviço possa desenrolar-se conforme a programação, com a maior segurança possível contra lapsos humanos, possibilitando, em caso de falhas operacionais, uma rápida normalização.

Como nas estradas de ferro, poderá ser alcançado, também para o metrô, um alto grau de segurança através da técnica de sinalização.

As condições básicas para um serviço de metrô seguro, são:

1. Garantia do percurso, isto é, controle referente à disposição correta dos desvios e verificação de que a via está livre.
2. Garantia do tráfego dos trens no sentido regular e em sentido oposto, contra tráfego lateral, isto é, eliminação de cruzamentos ou tráfego simultâneo adverso.
3. Garantia do espaçamento, isto é, que seja mantida uma distância entre trens ou até um outro ponto crítico determinável, que corresponda, no mínimo ao trecho requerido para frenagem de emergência.

(*) Boletim do IFPTE "Instituto Ferroviário de Pesquisas Tecnológicas" n.º 13/16 — 1957 — pg. 89

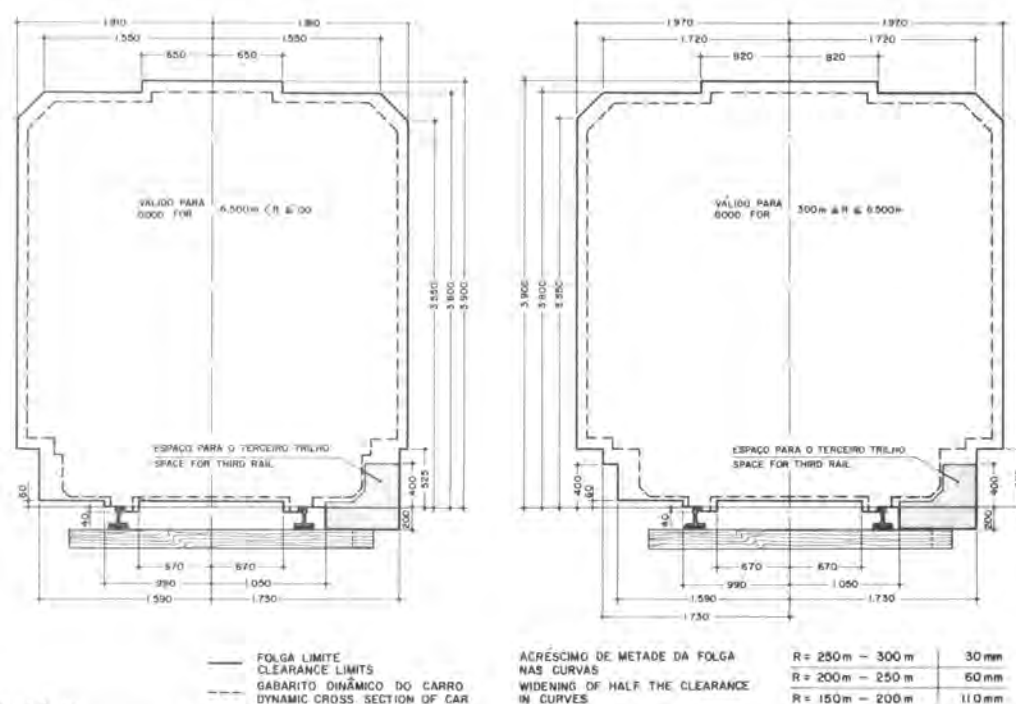


Fig. 14.2
Gabarito dinâmico e folga limite do carro

4. Garantia de que sejam mantidas as limitações de velocidade condicionadas às características locais do percurso (desvios, curvas, trechos de marcha lenta).

5. Proteção contra ameaças operacionais causadas por falhas técnicas na sinalização.

6. No caso de falhas, deverá ser possível uma marcha permissível com velocidade máxima assegurada de 20 km/h.

Além dessas exigências a que devem satisfazer as instalações de sinalização, deverão ser assegurados os seguintes requisitos de serviço para um metrô convenientemente atualizado:

Contrôle operacional centralizado e comando automático das operações, conforme a programação das viagens, com correção automática no caso de discrepâncias de horário dentro de limites fixados.

Condução automática de trem, considerando todas as características peculiares das linhas e do material rodante.

Funcionamento com economia de energia, dependendo dos tempos efetivos de parada nas estações. Possibilidade de comando local, do posto de manobra, dos aparelhos de mudança de via, e possibilidade de comando manual convencional do veículo, isto é, atuação oportuna dos serviços de um maquinista.

Com base nessas condições operacionais e considerando os princípios técnicos de construção, foram estabelecidos os dados para projeto das instalações de sinalização constantes da fig. 14.3.

Outrossim, instalações adequadas de comunicação representam meios técnicos auxiliares de grande valor para o serviço operacional. Nisto acham-se incluídos: uma rede geral telefônica, microfones, alto-falantes e relógios, indicadores do destino dos trens, bem como instalações de televisão e rádio-telefonia no trem.

Cabe ressaltar principalmente a rádio-telefonia no trem, a qual seria o único meio de comunicação entre o posto central e as composições, no caso de falhas do sistema de sinalização.

14.3.1. Normas para a orientação de passageiros em estações e pontos de baldeação

A fiscalização fácil e rápida de passageiros depende, essencialmente, de uma separação perfeita das duas correntes formadas pelos mesmos, que devem ser, claramente orientadas desde o acesso às estações, subterrâneas ou elevadas, até a saída e dispersão nas vias superficiais. As duas correntes contrárias de usuários que entram e saem do metrô devem, sempre que possível, ser separadas, desde o início, evitando cruzamento e o entrelaçamento desagradável dos passageiros, que gera confusões e diminui a capacidade de escoamento nos saguões e plataformas de embarque.

As entradas do metrô devem ser planejadas de tal forma que sua utilização por grande número de passageiros possa ser realizada sem atritos ou qualquer espécie de embaraço para os demais sistemas de transportes de superfície.

Nesse sentido, é necessário que as escadarias junto às entradas sejam construídas de maneira suficientemente ampla para que não provoquem, normalmente, aglomerações indesejáveis.

A sinalização das entradas do metrô deve ser clara e bem visível para que o passageiro possa orientar-se antecipadamente sobre a direção a escolher, sendo "conduzido" à respectiva entrada.

Em geral, os guichês e borboletas estão situados em uma área de distribuição. A disposição de guichês e borboletas de acesso às plataformas deve permitir um movimento contínuo e fluente do trânsito sem interferir com o fluxo de saída.

O número de guichês e borboletas a ser instalado em cada estação deve ser calculado em função da afluência nas horas de pico (do rush). Deve ser previsto um espaço suficiente de espera em frente às borboletas (cap. 14.3.3.).

O passageiro deve ser guiado à plataforma certa por meio de cartazes adequados (luminosos, flechas e sinalizações a cores, etc.). As vias de acesso deverão ser tão curtas quanto possível. Nas estações terminais onde houver mudança de vias, como em Santana, por exemplo, indicações especiais devem existir, mostrando de que plataforma parte o trem seguinte. Os meios indicadores mais adequados serão determinados de acordo com a disposição dos acessos às plataformas.

14.3. Orientação de fluxos de passageiros

1) Bitola	$b = 1600 \text{ mm}$ ($b = 1620 \text{ mm}$) max ($b = 1597 \text{ mm}$) min
2) Raio de curva	
a) linha	$R \geq 300 \text{ m}$
b) plataformas	$R \geq 400 \text{ m}$
c) vias secundárias	$R \geq 150 \text{ m}$
3) Entrevia (eixo a eixo)	
a) Elevado e em nível $300 \leq R \leq \infty$	3,94 m
b) Trecho em túnel (céu aberto) $6500 < R \leq \infty$	4,08 m
c) Trecho em túnel (céu aberto) $300 \leq R \leq 6500$	4,71 m
4) Comprimento da plataforma	136 m
5) Altura da plataforma	1,05 m
6) Rampa (max)	
a) linha	40‰
b) estações (no estacionamento de trens)	2,5‰
7) Concordância vertical	$R_v = \frac{V^2}{4}$
a) padrão	R_v em m V em km/h
b) mínima	$R_v = 500 \text{ m}$ $R_v = 1000 \text{ m}$ $R_v = 1000 \text{ m}$ $R_v = 5000 \text{ m}$
8) Superelevação	(x)
a) regra geral	(xx)
b) máxima	
em plataformas	$S = 170 \text{ mm}$ max
c) mínima	(xxx)
(x) em TR 57	
(xx) Superelevações inferiores a 20 mm não serão executadas	
(xxx) Aceleração lateral não equilibrada admissível $\zeta = 0,85 \text{ m/s}^2$	
9) Rampas de superelevação (x)	
a) declive regular	$1 : m = 1 : 10 \text{ V}$ $\leq 1 : 300$
b) declive máximo	$1 : m = 1 : 6 \text{ V}$ $1 : 300$
(x) Entre duas rampas de superelevação deverá existir um trecho sem superelevação ou com superelevação igual, de $L \geq V/10$ (V em km/h); havendo curvas de sentido oposto, não será necessário.	
10) Curvas de transição	
As curvas de transição (parábola cúbica ou clotóide), deverão em princípio, coincidir com as rampas de superelevação (comprimento das curvas de transição igual ao comprimento da rampa.)	
Transition curves	
Curvas de transição deverão ser adotadas	
a) entre uma reta e uma curva circular quando	$V > 3,3 \sqrt{R}$ V em km/h R em m
b) entre curvas circulares no mesmo sentido quando	$V > 3,3 \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2}}$ ($R_1 > R_2$)
c) entre curvas de sentido oposto quando	$V > 3,3 \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$
11) Gabarito dinâmico e folga limite do carro vide Fig. 14.2	

Fig. 14.1
Padrões para o projeto das instalações
várias do Metrô de São Paulo

1) Densidade máxima de trens de acordo com o horário	40 trens/hora/linha/sentido
2) Sequência mínima	$t_{c, \min} = 90 \text{ s}$
3) Tempo de parada nas estações	$t_{st} = 30 \text{ s}$
4) Velocidade referida à linha a) normal b) referente à superelevação S	$V_{\max} = 100 \text{ km/h}$ $V_{\max} = \sqrt{\frac{S \cdot R}{13,1}}$ V em km/h S em mm R em m
c) referente a S_{\min}	(x) $V_{\max} = \sqrt{\frac{(S+145) \cdot R}{13,1}}$
d) referente a $S_{\max} = 170 \text{ mm}$	(x) $V_{\max} = 4,9 \sqrt{R}$
e) referente a $S = 0$	(x) $V_{\max} = 3,3 \sqrt{R}$
f) em curva reversa (sem superelevação)	(x) $V_{\max} = 3,3 \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$
g) em rampas	$V_{\max} = \frac{m}{6}$
h) em curvas de concordância	$V_{\max} = 2 \sqrt{R_a}$
(x) Para uma aceleração lateral admissível não equilibrada $\varphi = 0,85 \text{ m/s}^2$	
5) Velocidade referente à operação a) passagem pelas estações b) circulação com recuperação de energia c) manobras d) operação em trecho sinalizado e) trens de serviço e socorro	$V_{\max} = 50 \text{ km/h}$ $V > 50 \text{ km/h}$ em etapas $V_{\max} = 30 \text{ km/h}$ $V_{\max} = 15 \text{ km/h}$ $V_{\max} = 50 \text{ km/h}$
6) Aceleração em nível a) aceleração na partida b) tempo de arranque em $V = 0$ até 80 km/h c) máxima reserva de aceleração com $V = 100 \text{ km/h}$	$b_{a, \max} = 1,35 \text{ m/s}^2$ $t = 30 \text{ s}$ $b_{a, 100} = 0,13 \text{ m/s}^2$
7) Deceleração em nível a) deceleração média em $V = 100$ até 0 km/h b) deceleração média de emergência $V = 100$ até 0 km/h c) deceleração máxima de emergência	$b_s = 1,2 \text{ m/s}^2$ $b_a = 1,35 \text{ m/s}^2$ $b_{s, \max} = 1,5 \text{ m/s}^2$
8) Aceleração em função da rampa ‰ a) arranque com $+40‰ \geq I \geq -5‰$ b) arranque com $-5‰ > I \geq -40‰$	$b'_a = 1,35 - 0,01 \cdot I$ m/s ² $b'_a = 1,0 - 0,1 \cdot I$ m/s ²
9) Deceleração de frenagem em função da rampa a) $+20‰ \geq I \geq -40‰$ b) $+40‰ \geq I > +20‰$ c) deceleração de emergência	$b'_s = 1,2 + 0,01 \cdot I$ m/s ² $b'_s = 1,0 + 0,01 \cdot I$ m/s ² $b'_e = 1,5 + 0,01 \cdot I$ m/s ²
10) Aceleração e deceleração máximas admissíveis em atenção ao conforto dos passageiros (exceto deceleração de emergência)	$b_{\max} = 1,4 \text{ m/s}^2$

Últimamente se tem procurado orientar e acelerar o fluxo de passageiros, por meio de faixas coloridas nas paredes.

As faixas correspondem às linhas no mapa da rede que, para informação dos usuários, deve ser exposto de maneira bem visível em todas as estações.

Especial atenção deve ser dedicada à elaboração de um indicador visual, facilmente legível — sempre que necessário também mecânico — para orientação dos passageiros nas estações de baldeação. A baldeação de uma linha de metrô para outra e de uma linha de metrô para a ferrovia, no caso de adoção de um sistema integrado de tarifas e transportes, deve ser possível sem a exigência de nova fiscalização. Os passageiros, que depois do metrô devem tomar o ônibus não poderão, porém, passar diretamente de um sistema para o outro, sem fiscalização.

Para orientação dos passageiros haverá nas plataformas indicadores de sequência dos trens, sem indicação de horário, dando apenas o destino, ou seja, o nome da estação terminal do trem seguinte. Em princípio cada plataforma deve comportar dois desses indicadores, cada um dos quais situado na terça parte do seu comprimento. Essa disposição dos indicadores de direção dos trens para orientação dos passageiros é suficiente, mesmo para estações em curva.

Para comunicações importantes ou fora da rotina, todas as plataformas e saguões disporão de instalações de alto-falantes, que poderão ser utilizadas individualmente por estação ou em conjunto com o posto central.

A desejada separação dos fluxos de passageiros, via de regra, começará e findará, respectivamente, na plataforma, pois o embarque e desembarque nos trens se processa de um mesmo lado do trem e ao mesmo tempo. Somente nos locais, onde, por causa do número muito grande de passageiros, o tempo de 30 s previsto para a parada dos trens do Metrô de São Paulo não é suficiente para a troca de passageiros, duas correntes contrárias de embarque e desembarque serão separadas, desde o veículo, por meio de uma segunda plataforma adicional. As portas de saída, nesse caso, abrem-se 3 a 5 s antes do que as portas de entrada, no intuito de conduzir os que desembarcam para o lado certo.

Com base na experiência geral das estradas de ferro e nas de contagens comparativas nas estradas de ferro de São Paulo, foi calculado para o Metrô de São Paulo um movimento médio embarque-desembarque de 1,4 pessoas/s e por porta. Esta média inclui todas as perdas de tempo provocadas pelas obstruções recíprocas, assim como uma margem adequada de segurança. Com esse dado, uma instalação de duas plataformas independentes, para embarque e desembarque junto à linha, permite, portanto, quando for necessário, receber $40 \times 24 \times 30 \times 1,4 = 40.400$ pessoas/h. O cálculo foi feito para 40 trens/h, 24 portas por trem e 30s de parada.

A construção, nos trechos de duas linhas, com duas plataformas externas e uma plataforma central entre as vias, permite manter sempre o acesso aos dois lados do trem. As plataformas externas servem para desembarque e a central para o embarque. Este recurso de separação foi preferido no intuito de conservar a regra geral de fluxo de tráfego, isto é,

saída pela direita, além de conseguir, em geral um caminho mais curto para a saída a partir da plataforma externa, do que a partir da plataforma central.

As indicações para os passageiros que desembarcam deverão ser feitas com clareza. Os luminosos com os nomes das estações, que vêm sendo utilizados até hoje, tendem a ser substituídos, nas instalações mais modernas por faixas inscritas nas próprias paredes das estações. Estas faixas se formam pela repetição contínua do nome da estação trazendo o passageiro, assim, permanentemente informado ao longo da plataforma. Esta é também uma razão pela qual, em geral, as plataformas externas são reservadas para o desembarque.

Para orientação dos passageiros que desembarcam, exige-se, antes de tudo, uma indicação clara da direção da saída. Os últimos estudos indicam que as sinalizações que melhor efeito produzem são as faixas coloridas, intermitentes, que se vão estreitando. Os passageiros deixam as estações através de borboletas de saída, com bloqueio automático na direção contrária, ou então, nas horas de pico (do rush) muito intensas, através de grandes portões de saída fiscalizados, a exemplo do que acontece nos trens de São Paulo.

14.3.2. Dispositivos de fiscalização e de segurança

Para a fiscalização de passageiros servem em primeiro lugar as borboletas de entrada. Também nas borboletas de saída é possível efetuar uma fiscalização, sempre que seja necessária.

Após o aviso prévio da partida eminente do trem por meio de sinal sonoro — é preciso que o maquinista do carro motor esteja em condições de se assegurar da possibilidade da partida sem perigo para os passageiros.

Os constantes progressos na técnica de transmissão permitem utilizar hoje, e cada vez mais, a televisão. Possibilita-se desta maneira ao maquinista, através de um receptor estacionário ou montado no próprio carro, uma visão completa de toda a plataforma.

Ao lado das escadas rolantes, através das quais se processa, normalmente todo o movimento, será prevista, como medida de segurança, ao menos uma escada fixa por plataforma.

Além disso, haverá entre cada duas estações e de acordo com a distância entre elas, uma ou mais saídas de emergência, assim como, ao longo do próprio túnel correrá uma passagem de evasão indo de uma estação até a outra, começando e terminando nos extremos das plataformas.

14.3.3. Esquema e dimensões dos bloqueios de acesso, escadarias, elevadores e plataformas

14.3.3.1. Bloqueios de acesso

Os bloqueios de acesso serão projetados conforme o sistema de embarque escolhido. Como bloqueio de entrada se empregam as borboletas usuais, bem como os bloqueios mais modernos e automáticos, os quais se destravarão automaticamente pelo emprego de fichas (passagens) ou moedas, ou que respectivamente são

destravadas por um servidor, depois de recebido o preço da passagem.

Os bloqueios de saída só podem ser abertos para fora devido a um dispositivo travador. Nas horas de pico poderão ser abertos adicionalmente portões de saída nas estações principais, portões esses que serão controlados por funcionários.

A largura mínima de uma saída é de 0,65 m. Conforme o sistema de embarque, deverá ser mantida livre entre dois bloqueios uma área de 0,90 x 2,00 m, para a cabina de controle ou de venda de passagens, a qual será ocupada por um servidor.

Onde forem utilizados bloqueios automáticos, deverá ser previsto um espaço de cerca de 0,50 m de largura, conforme o tipo de fabricação do dispositivo automático, situado entre os bloqueios.

Em frente aos bloqueios deverá haver uma área, de espera, cujas dimensões serão estabelecidas de acordo com a demanda do tráfego local. Em média deverá poder comportar 20% dos passageiros que passam em 90 s (intensidade máxima de sequência de trens) por todos os bloqueios. Calcula-se para o dimensionamento, uma densidade de 2,5 pessoa/m². As áreas de acesso existentes, com exceção das escadas podem ser contadas como áreas de espera.

Para a capacidade de um bloqueio de passagem valem as cifras representadas na fig. 14.4. Partiu-se do princípio, que nas horas do rush, com uma fiscalização contínua nos bloqueios, não se verifiquem aglomerações demasiadas de passageiros nas áreas de espera.

14.3.3.2. Escadarias

Para dar conta do transporte em massa e por motivos de conforto, em construções modernas de metrô, são atualmente instaladas escadas rolantes. A escada fixa convencional só é usada como possibilidade optativa. Além disso, é usada nas pequenas diferenças de nível, nas entradas e saídas do metrô, a saber, do nível de rua até a área de distribuição.

A inclinação relativa da escada fixa não deve ultrapassar 16/31, devendo receber até no máximo, 15 degraus com um patamar de, no mínimo, 1,50 m de profundidade.

A largura da escada, em geral, é um múltiplo de 0,60 m, que é a faixa calculada para uma pessoa. Ficou estabelecida uma dimensão de 2,00 m, que se compõem de 3 faixas de 0,60 m = 1,80 m, mais dois corrimãos de 0,10 m cada.

As escadas rolantes em geral são fabricadas com ângulo ascendente de 30° ou 35°. No transporte coletivo é dada preferência à escada rolante de 30°, em virtude do maior conforto. Para desníveis de 5,50 m ou mais, somente são executadas — por motivos de segurança — escadas rolantes com um ângulo de inclinação de 30°. Conforme a necessidade requerida, são instaladas escadas rolantes de uma ou duas pistas. A fim de atender a uma demanda variável na entrada e saída e evitar maiores despesas na construção, deve ser prevista a possibilidade de inversão no sentido de deslocamento da escada. Se houver grande diferença na afluência de usuários nas diversas horas do dia, existe a possibilidade de paralisar temporariamente o funcionamento de determinadas

escadas, manual ou automaticamente. A ligação ou interrupção automática pode ser feita de várias maneiras, por exemplo através de contato de pedal ou de raio luminoso (fotocélulas).

A quantidade de escadas rolantes necessárias por plataforma será calculada a partir da demanda para a plataforma e da capacidade da escada.

Esta última é, para uma escada rolante de duas pistas, de 8.000 até 10.000 pessoas/h, conforme a velocidade com que pode ser acionada. Para o cálculo do número de escadas por plataforma tomar-se-á por base o volume de passageiros nas horas de pico que é da ordem de 8.000 pessoas/h.

14.3.3.3. Elevadores

Como meio de transporte de chegada e saída à plataforma estão excluídos os elevadores para passageiros, considerado o grande volume de tráfego de um metrô. Os motivos para tanto são: pequena capacidade, necessidade de muito espaço em relação à carga útil e, finalmente, descontinuidade no transporte de passageiros.

14.3.3.4. Plataformas

Como tipo de construção padrão, foram previstas plataformas laterais para as estações e paradas. Somente onde as condições de tráfego, de construção ou os locais o exigirem, serão construídas plataformas centrais. Nas estações com demanda superior a 40.000 passageiros/h, estão previstas plataformas separadas para embarque e desembarque, isto é, plataformas laterais e centrais.

Já se estabeleceu a altura da plataforma em 1,05 m acima do topo do boleto e o comprimento da plataforma com 136,00 m sendo que a largura da mesma deverá variar de acordo com a respectiva demanda. Por motivos de segurança deverão ser mantidos livres determinados espaços nas plataformas, que não entram no cálculo da necessidade de espaço. Portanto, deverá ser adotada uma diferença entre largura útil B_n e largura da construção B_k . A largura da construção B_k é obtida pela soma da largura útil B_n com um acréscimo de segurança S .

Os objetos fixos até uma altura de 3,00 m acima do topo do boleto deverão ficar no mínimo a 1,50 m de distância para dentro da plataforma. Haverá uma faixa de segurança de 0,65 m de largura, interna à plataforma ao lado e ao longo da linha. Nos outros lados das plataformas a distância de segurança é de 0,25 m. Para obter a rápida troca de passageiros desejada sem grandes dificuldades, as plataformas foram calculadas para uma densidade de apenas 1,5 pessoas/m². Assim, a largura de construção para plataformas laterais é de:

$$B_k = 0,65 + \frac{N_1}{(136 - 2 \times 0,25) \times 1,5} + 0,25$$

e para plataformas centrais é de

$$B_k = 0,65 + \frac{N_2}{(136 - 2 \times 0,25) \times 1,5} + 0,65$$

onde N_1 = número máximo de embarques e desembarques para um trem

e N_2 = número máximo de embarques e desembarques com frequência de trens de 90 s.

No caso de plataformas de embarque e desembarque separadas, o cálculo da largura pode ser feito a partir de uma densidade nas plataformas de, no máximo, de 2,5 pessoas/m², visto que os estôrvos pelos fluxos contrários de passageiros embarcando ou desembarcando são eliminados.

— Dimensões mínimas

Plataforma lateral: 4,00 m
duas escadas rolantes uma em cada extremo da plataforma = 3,40 + 0,60 m para passagem de emergência. Em relação às outras instalações de escadas também valem as mesmas dimensões, por motivo de segurança e uniformidade.

Plataforma central: 6,50 m
duas escadas rolantes = 3,40 + 2 x 1,50 m de distância de segurança e 0,10 de tolerância.

	Tipo de execução	
	sem dispositivo travador	com dispositivo travador
Entrada com passagens individuais pagas à vista	25	20
Entrada com controle automático	50	45
Saída	50-60	45

14.4

Fig. 14.3
Padrões para projeto dos equipamentos de proteção e controle dos trens

Fig. 14.4
Capacidade dos bloqueios nas plataformas em pessoas por minuto

15. Princípios de construção civil

15.1. Trabalhos cartográficos e plantas

A planificação de um metrô em São Paulo necessita de plantas topográficas com curvas de nível cobrindo uma área cujos limites atingem os seguintes bairros:

Ao norte: Limão, Santana
A leste: Moóca
A sul: Ipiranga, São Judas, Santo Amaro
A oeste: Pinheiros, Lapa

O projetista geralmente requer que o mapa topográfico básico para o projeto, contenha todos os elementos que possam influenciar o projeto e os custos de uma construção. Partindo da premissa que num mapa de boa qualidade na escala de 1:5.000 a falha de localização seja de $\pm 0,75$ até no máximo $\pm 1,5$ m e a falha de nível, conforme já mencionado no capítulo 1.4.2., seja de $m L = \pm (0,25 + 2,8 \lg \alpha)$ m até no máximo $m L = \pm (1,0 + 15 \lg \alpha)$ m (α = declive do terreno), então essa escala deveria ser suficiente para os serviços preliminares de engenharia para determinação do traçado do metrô. Para o centro da cidade, com sua aglomeração de edifícios seria necessária a escala 1:2.000 com a maior exatidão correspondente. Nos pontos mais complexos (entroncamentos) deveriam ser providenciados trabalhos cartográficos nas escalas 1:1.000 até 1:500, para a elaboração do projeto. Nas áreas de planejamento onde o ponto mais alto e o ponto mais baixo apresentam uma diferença de nível de cerca de 110 m, deverá ser anotada a 3.^a dimensão em tôdas as escalas seja através de curvas de nível de 2 em 2 m, seja por meio de anotações isoladas.

Para a área de estudos estão disponíveis trabalhos cartográficos em escala maior, elaborados a pedido da Prefeitura Municipal de São Paulo (Departamento de Cadastro) por duas firmas, nos anos de 1952-1957, em escala 1:2.000. Essas obras cartográficas contêm curvas de nível de 2 em 2 m. Foram elaboradas de fotografias aéreas nas escalas 1:7.500 até 1:10.000 provenientes de um levantamento fotogramétrico dos anos 1953/4, e estão disponíveis em três execuções (Pencil, Loofrite, Vegetal). Para a parte norte existem estampas em 4 côres. As plantas na escala 1:2.000 contêm as ruas com nomes, avenidas, praças públicas, ferrovias, rodovias, rios, córregos, lagos, pontes, matas, campos, edifícios e casas em representação pormenorizada, limites dos distritos de administração, curvas de nível de 2 em 2 m, indicações de nível para

cruzamento de ruas e outros pontos de relevância. O desenho é uma projeção cilíndrica segundo Gauss. O formato é de 1,00 x 0,60 m. O número total de mapas elaborados é de 250.

Nas medições fotogramétricas, para determinar as coordenadas de localização e nivelamento dos pontos de referência, a cidade foi coberta com uma rede de triangulação (exatidão 1:27.000 a 1:19.000) e por uma rede de marcos de nível geométricos

(exatidão: $\pm 4 \sqrt{\text{distância (km), mm}}$) cujos pontos principais foram, por sua vez, demarcados adequadamente. Segundo uma publicação (1960) do Eng.^o Francisco Prisco, do Departamento de Cadastro, todos os trabalhos foram fiscalizados e posteriormente aprovados. Nas verificações constatou-se que as tolerâncias estabelecidas por contrato de $\pm 0,50$ m no sentido horizontal e ± 2 m no sentido vertical, não foram obedecidas em todos os locais. Os exames desses mapas, através de comparação com outros levantamentos parciais em escalas maiores e através de cooperações no local, mostraram que a exatidão intrínseca correspondia em geral à precisão geralmente esperada de mapas na escala 1:2.000, porém, que a representação da topografia, como contornos de casas, alinhamentos de ruas, etc., em alguns casos, diverge da realidade. A comparação feita no local, demonstrou, outrossim, que por não ter sido efetuada atualização nos 10 anos que se seguiram à elaboração, a representação da obra cartográfica parcialmente não coincide com os fatos locais, em virtude do acelerado desenvolvimento da cidade de São Paulo. Desta forma não constam alargamentos de ruas, novas construções, pontes e outros. Os mapas contêm ainda o traçado de rodovias, ferrovias e rios que já não mais existem.

Os mapas 1:2.000 foram usados como dados básicos para o projeto do metrô, já que não existem outras obras cartográficas, particularmente em escalas maiores. A pedido, foram colocados à disposição, para os estudos, pelo Departamento de Cadastro, cópia heliográfica ou transparente. Das indicações de nível do mapa 1:2.000 foram elaborados perfis longitudinais na escala 1:2.000 para os comprimentos e 1:200 para as alturas, referentes ao traçado do metrô, dando o elemento básico para a projeção de gradientes. Para o relatório final, os perfis de nível foram redesenhados na escala 1:500.

O fato de o mapa 1:2.000 não ter sido atualizado, dificultou sua utilização como dado básico para o projeto e obrigou a medições complementares. Assim, foram feitas comparações locais, principalmente no centro da cidade, onde houve grandes modificações. Foram visadas principalmente modificações no traçado de ruas, edificações vizinhas ao futuro traçado do metrô (quantidade de andares), larguras de ruas e de calçadas, construção de pontes, cruzamentos com outras vias (ferrovias), indicações de nível, etc. Essas medições complementares foram executadas especialmente nos locais previstos para estações do metrô. Com os seus resultados foram elaborados mapas na escala 1:500. Os novos dados de níveis foram representados em perfis longitudinais separados, nas escalas 1:1.000 — 1:500 — 1:50. Esses mapas de perfis formaram a base para os trabalhos nos projetos de estações e para a projeção de gradientes nessa área. O material cartográfico referente à rede de utilidades existentes nas vias públicas é, em grande parte, ultrapassado devido a não atualização constante. Durante os trabalhos verificou-se que a escala 1:2.000 não é suficiente para os levantamentos das utilidades situadas no traçado planejado, como encanamentos de água, esgotos, cabos, etc. Igualmente, essa escala não era adequada para que as respectivas concessionárias de serviços públicos pudessem opinar sobre eventuais interferências em suas redes. Foram tomadas providências da seguinte forma: para o levantamento das utilidades foram feitas ampliações dos mapas 1:2.000 para 1:500; e para definição por parte das concessionárias em relação à localização das sondagens, os pontos de perfuração foram marcados em lugares característicos (cantos de casas, postes de iluminação, etc.) e representados em croquis separados.

Na parte sul do traçado do metrô (Linha Norte-Sul) o Departamento de Cadastro ainda dispunha, desde o tempo do estudo Berrini, de representações geográficas de 1:500 e perfis correspondentes (27 unidades). Devido a colaboração das entidades, os mesmos puderam ser utilizados para os projetos atuais.

Como nos estudos sobre o traçado do metrô, devem ser levados em consideração projetos de obras públicas existentes e previstas, foram retiradas as plantas correspondentes nos diversos Departamentos da Prefeitura, a saber, junto ao Departamento de Urbanismo, em número de 300, no Departamento de Obras, 23, e junto

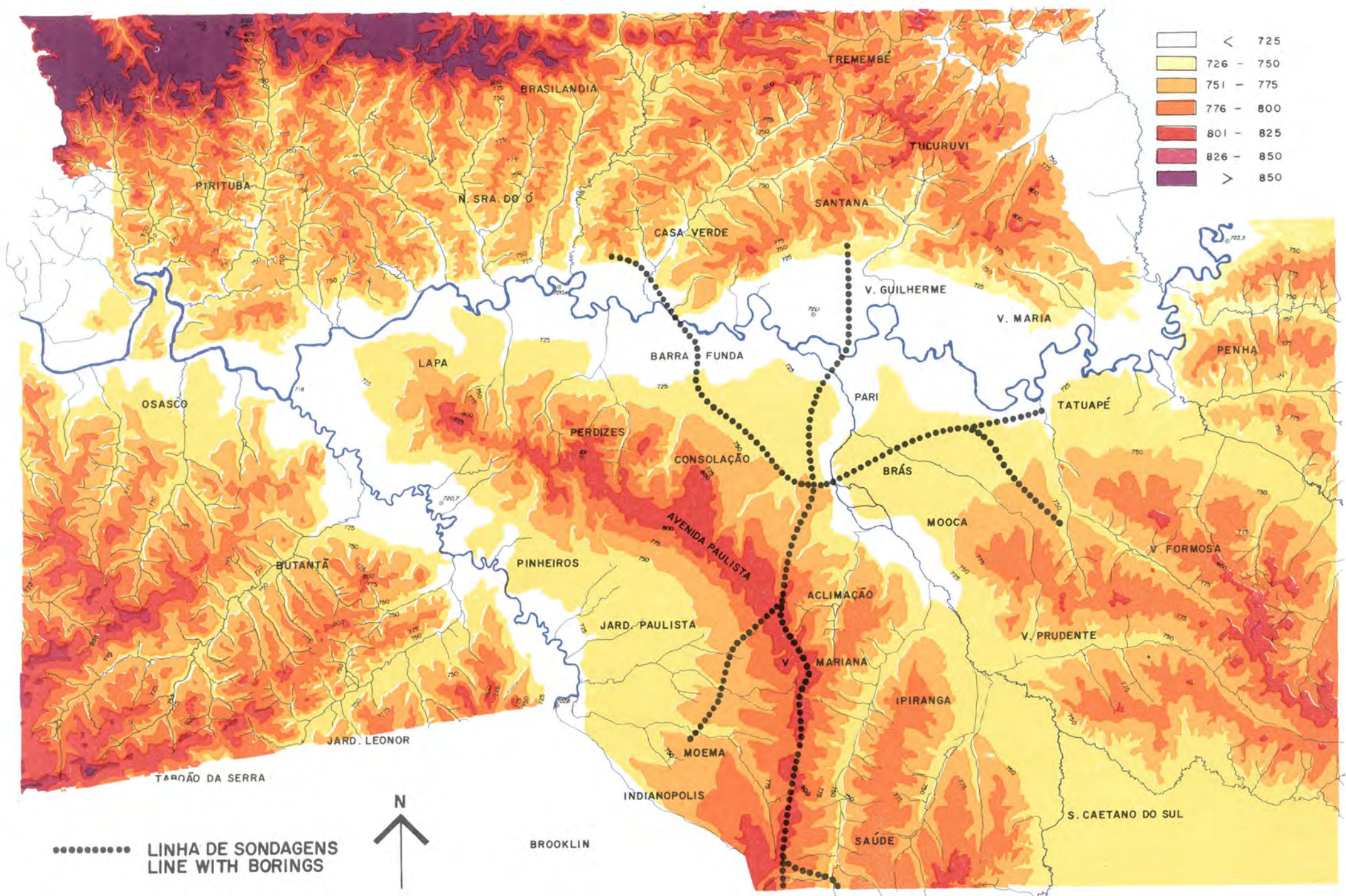
a escritórios particulares de engenharia que executam serviços para a Prefeitura, um total de 41.

Finalizando, pode-se dizer que os mapas existentes 1:2.000 com curvas de nível, sob consideração das dificuldades descritas, puderam servir, juntamente com mapas auxiliares, e plantas complementares, para os estudos do ante-projeto.

Todavia, a elaboração de um projeto detalhado e completo para o metrô, exige plantas básicas e levantamentos cartográficos de ótima qualidade e exatidão. Segundo as normas usuais, a elaboração desse tipo de projeto se procede em mapas na escala 1:500 com curvas de nível de metro em metro, que representam uma faixa à esquerda e à direita do traçado previsto, na largura determinada pelo projetista. Em casos especiais (estações e traçado no centro, representação de modificações na rede de utilidades etc.) exigem-se mapas na escala de 1:250 ou 1:100. As altitudes para os perfis necessários devem ser obtidas por nivelamento. A elaboração dos documentos básicos para o projeto e uma obra cartográfica de tal envergadura resultam em extensos trabalhos de medição e cartografia, a saber:

1. Elaboração de uma rede exata de situação e altura, com o emprêgo de instrumentos modernos, ou com o adensamento de uma rede já existente, mediante intercalação de pontos intermediários ao longo do traçado previsto. A exatidão necessária deverá corresponder à exatidão da locação para os trabalhos de construção.
2. Levantamento fotogramétrico ou topográfico e análise na escala de 1:500. Medições "in situ" em áreas de difícil alcance pelo processo aéro-fotogramétrico. Medições complementares e elaboração dos mapas 1:500. Levantamentos especiais para mapas nas escalas 1:100 e 1:250 e respectiva elaboração cartográfica.
3. Nivelamento (perfis) ao longo do traçado.
4. Preparação de documentos comprobatórios das medições. Trata-se de plantas representando a situação existente antes do início da construção, que serão complementadas durante e após a execução dos serviços por plantas destinadas à verificação de influências e consequências das obras, assim como servir ao projeto de futuras ampliações.

Todos esses serviços mencionados devem ser executados em tempo hábil, para que sirvam de base para os trabalhos dos projetistas.



15.1

Fig. 15.1
Topografia urbana de São Paulo com
indicação das seções investigadas do
sub-solo

Os estudos e as sondagens foram realizados ao longo de:

- um traçado que se estende no sentido norte ao sul, que sai de Santana, passando pelo centro da cidade em direção a São Judas.
- um traçado que se estende no sentido de leste a oeste, partindo do Tatuapé e da Moóca, passando pelo centro da cidade e terminando no bairro do Limão.

A topografia da área da cidade de São Paulo se apresenta aproximadamente simétrica em relação ao espigão central, que coincide com a Av. Paulista. Embora através de um corte transversal, perpendicular ao eixo desse espigão, se pudesse definir melhor todas as formações típicas do solo local, as condições do subsolo de São Paulo podem ser perfeitamente analisadas ao longo da seção longitudinal da linha no sentido do norte ao sul, prioritária neste estudo. O ramal Paraíso — Moema mostra apenas parte dessas condições.

As investigações realizadas têm o objetivo de esclarecer sob o ponto de vista construtivo, os seguintes aspectos:

- se ao traçado escolhido não serão impostas, pelas condições morfológicas do terreno, dificuldades técnicas intransponíveis, que poderão resultar numa alteração do traçado preestabelecido.
- quais os tipos de construção, que poderão ser adotados nos diversos trechos das linhas.
- quais os métodos de construção mais adequados.
- como poderão ser solucionados problemas particulares de fundação.

As investigações deverão indicar ainda quais os métodos construtivos que deverão evitar possíveis danos nas edificações vizinhas existentes.

Com base nos estudos de mecânica dos solos, compreendendo ensaios de laboratório e de campo, deverão ser fornecidos ao engenheiro-projetista os dados correspondentes aos problemas acima enumerados, para que o mesmo possa ter uma idéia das propriedades mecânicas das diversas camadas de sub-solo.

15.2.2. Coleta de dados existentes

Para, logo no início dos estudos, ter-se uma primeira idéia geral sobre as condições do sub-solo em São Paulo, foram coletadas e examinadas todas as publicações de natureza geológica ou de mecânica dos solos que puderam ser encontradas.

Outrossim foi requerido às Seções de Solos e Fundações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, uma relação de todas as sondagens, incluindo resultados de ensaios de laboratório, realizadas nas proximidades das seções longitudinais Norte-Sul e Leste-Oeste, nos últimos decênios. Nesta relação foram também incluídas as sondagens executadas para a elaboração de projetos anteriores referentes ao metrô.

Por outro lado, recolheu-se um grande número de informações sobre experiências práticas de especialistas de fundações em São Paulo. Este trabalho contribuiu substancialmente para que se conhecesse em relativamente pouco tempo, a maioria

dos problemas de mecânica dos solos e permitiu adaptar melhor os nossos métodos de estudos às condições reais.

15.2.3. Novas investigações do sub-solo realizadas pelo grupo de estudos

15.2.3.1. Programa de sondagens

Para a obtenção de uma noção conjunta das condições do sub-solo, tendo em vista o estudo preliminar, foi executado um total de 139 sondagens ao longo da seção indicada na figura 15.1.

A distância entre as sondagens varia geralmente entre 100 e 400 m, de acordo com as dificuldades técnicas previstas.

A profundidade das sondagens oscila entre 15 a 50 m, de acordo com as condições locais do sub-solo, a profundidade prevista para o metrô e o tipo de fundação. Em correspondência aos problemas de mecânica dos solos, associados à construção de um metrô, foi estudado o solo numa profundidade de 10 a 20 m abaixo da cota das fundações. O total de metros perfurados em sondagens somou 4.800 m.

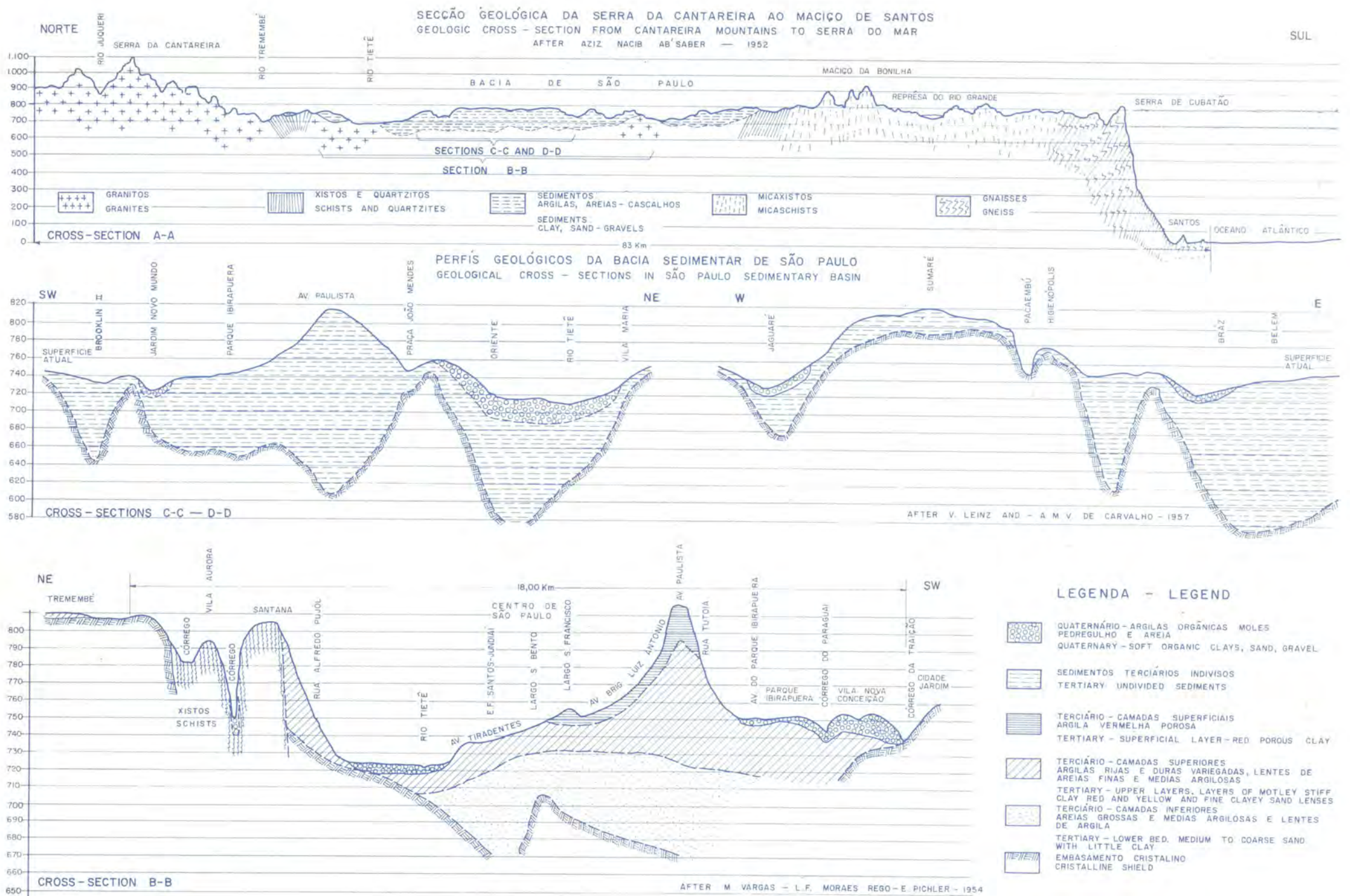
15.2.3.2. Trabalhos de campo de de mecânica dos solos

As 139 sondagens podem ser divididas da seguinte forma:
134 sondagens com um diâmetro de 2 1/2" para um estudo rotineiro das diversas camadas do sub-solo, compreendendo o reconhecimento

15.2. Investigação do sub-solo

15.2.1. Finalidade do estudo do sub-solo

Os presentes estudos visam fazer o reconhecimento das condições geotécnicas do subsolo, a fim de que, para a construção do sistema de metrô de São Paulo, seja encontrada uma solução segura e econômica para todos os problemas técnicos. O sistema de metrô é constituído por uma rede de várias linhas, que saem radialmente do centro da cidade em direção aos bairros. Em vista disso, torna-se necessário um estudo de grande extensão, o qual abrange os principais tipos de solos e rochas e sua distribuição sobre uma grande área. A área a ser pesquisada tem seu maior diâmetro em cerca de 25 km.



15.2

visual dos diversos tipos de solo e a execução de ensaios de simples caracterização.

5 sondagens com um diâmetro de 6"

Estas perfurações foram executadas em locais ao longo do traçado previsto para o metrô, onde se podia prever a presença de camadas de solos típicos em áreas perfeitamente caracterizadas. A finalidade dessas sondagens de maior diâmetro era a de obter amostras indeformadas do solo para a execução de um grande número de ensaios de laboratório.

Concomitantemente com estas sondagens, foram realizados testes de penetração estática, provas de carga com a ponteira do aparelho, e ensaios de permeabilidade "in situ". Além disso, foram colhidas 58 amostras de água subterrânea para posterior análise química, e instalados cerca de 50 piezômetros para a observação do nível de água subterrânea a longo prazo.

15.2.3.3. Ensaios de laboratório de mecânicas dos solos

Das amostras de solo deformadas, provenientes das sondagens de 2 1/2" de diâmetro, foram escolhidas amostras características para submetê-las, no laboratório, aos seguintes ensaios de classificação:

- Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação,
 - Determinação do teor de umidade natural
 - Determinação do limite de liquidez
 - Determinação do limite de plasticidade
 - Determinação do índice de plasticidade.
- Desta maneira foram ensaiadas

aproximadamente 1.400 amostras de solo retiradas das sondagens de 2 1/2".

Os dados obtidos possibilitaram, juntamente com a medida da resistência à penetração, uma classificação preliminar das diversas camadas do ponto de vista da mecânica dos solos e uma apreciação aproximada no que se refere a problemas de técnica de fundação.

As amostras indeformadas de solo extraídas nas sondagens de 6" de diâmetro, foram cuidadosamente retiradas por meio de um cilindro de aço de diâmetro interno de 12,5 cm, cuja introdução no terreno se fez por meio de pressão estática.

Com amostras selecionadas de camadas típicas, procedeu-se então a uma série de ensaios especiais de laboratório. Durante estes trabalhos não se deu apenas importância às amostras de argilas, como normalmente se faz, mas também às amostras de areias argilosas, as quais serão responsáveis por grande parte dos problemas de construção de um metrô em São Paulo. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- a) Ensaios de simples caracterização; os mesmos indicados para as sondagens de 2 1/2".
- b) Ensaios mais complexos de mecânica dos solos.

Determinação do peso específico dos minerais.
Determinação do peso específico do estado úmido.
Índice de vazios.
Coeficiente de permeabilidade (k) de acordo com a lei de Darcy.
Ensaios de adensamento.

Ensaios de compressão simples.
Ensaios de compressão triaxial.

15.2.4. Descrição geral do sub-solo

15.2.4.1. Situação geográfica e topográfica de São Paulo

A área da cidade de São Paulo está localizada numa bacia sedimentar situada no Planalto Atlântico. O diâmetro médio dessa bacia tem cerca de 35 km, estando seu centro distante da costa do Atlântico, aproximadamente 55 km. Os níveis topográficos mais baixos dentro da bacia estão aproximadamente na cota 720 m e os mais elevados na cota 825 m. (Fig. 15.2. — corte transversal A-A).

Os morros ao redor da bacia atingem uma altitude máxima de 1.135 m (vide morro do Jaraguá) ou seja, 400 m acima dos níveis mais baixos da bacia. A disparidade de níveis dentro da grande área da cidade de São Paulo é demonstrada da forma clara no corte geológico A-A da figura 15.2. Este corte segue aproximadamente na direção norte-sul, partindo da borda norte da bacia, cruzando a bacia propriamente dita e passando pelas serras que beiram o Planalto Atlântico, descendo a vertente festonada de cerca de 1.000 m até Santos, situada na baixada estreita da costa do Oceano Atlântico. É digno de nota, que na Bacia de São Paulo, assim como na maior parte do Planalto Atlântico, as águas não se escoam em direção ao mar tão próximo, mas sim, através do sistema fluvial do Tietê até o longínquo rio Paraná, a oeste. A Bacia de São Paulo está longe de ser plana, apresentando um relevo

bastante acidentado. O mapa topográfico da figura 15.1 e o corte característico norte-sul B-B da figura 15.2 evidenciam esta afirmativa. Os rios Tietê e Pinheiros drenam o terreno na bacia ao longe das abas das serras encontradas ao norte e a oeste. Entre as elevações destaca-se no centro da bacia o espigão central com uma altitude relativa de até 100 m, atingindo a cota máxima de 820 m (Av. Paulista e bairro do Sumaré). O referido espigão central é genericamente cercado pelos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí. Os cortes C-C e D-D, que acompanham de perto a direção leste-oeste (Fig. 15.2) mostram igualmente uma topografia acidentada.

A rede do metrô com seu diâmetro de, no máximo 20 km, atinge parcialmente as serras que formam a borda da bacia (vide Santana na

Fig. 15.2
Seções geológicas no planalto Atlântico e na Bacia de São Paulo

Fig. 15.3
Cidade de São Paulo — Seção geológica norte-sul

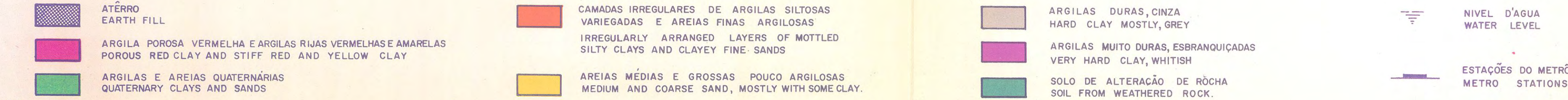
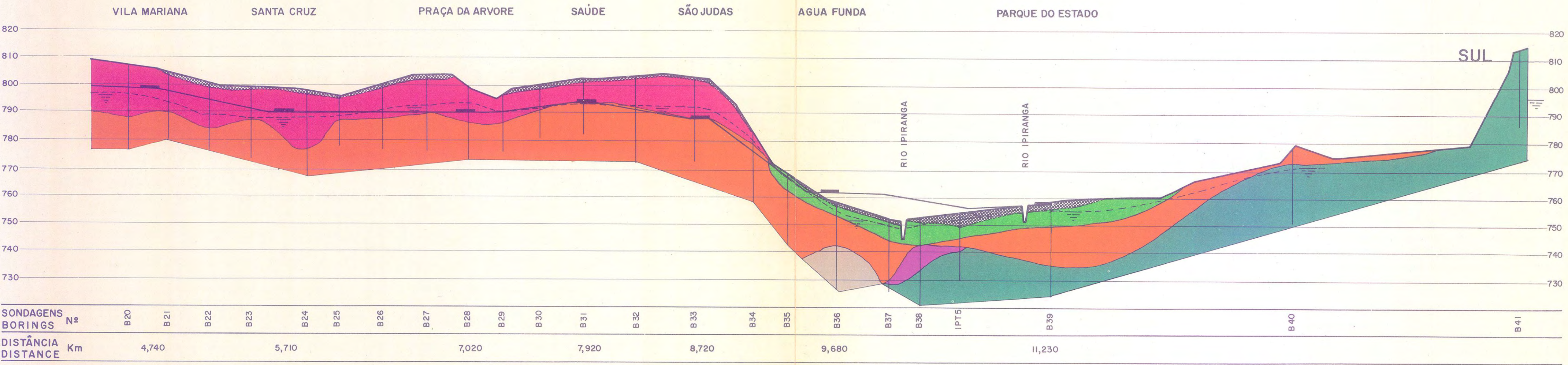
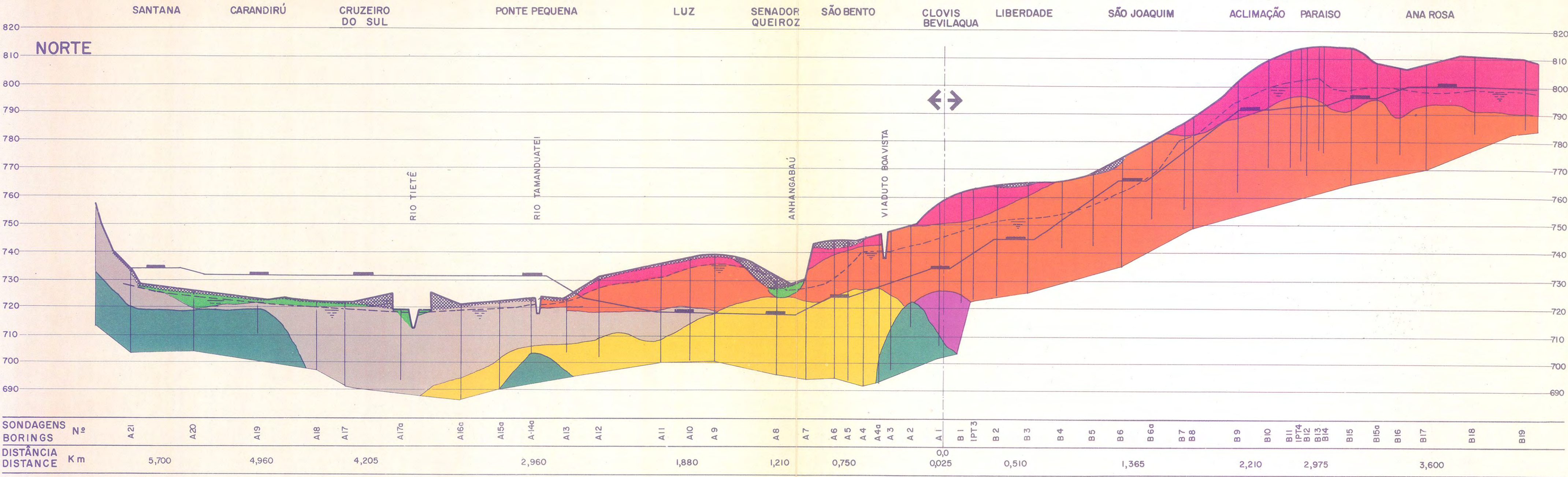
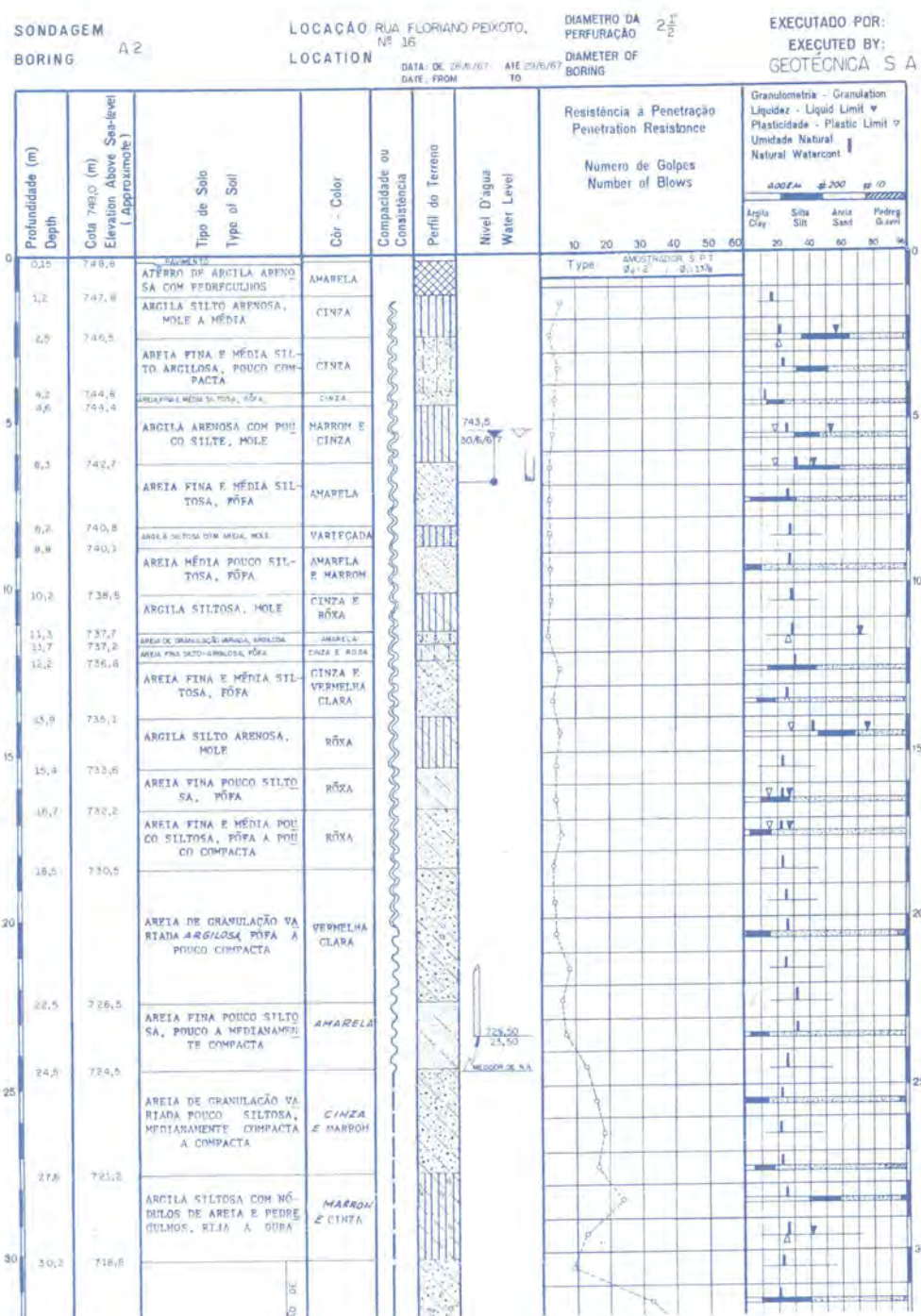


Fig. 15.4
Exemplo típico de uma sondagem no centro



15.4

fig. 15.1). Isto significa, que as linhas do metrô na área de São Paulo terão que vencer, por etapas, diferenças de nível de até 100 m.

15.2.4.2. Geologia da área metropolitana

Conforme se pode verificar no corte A-A da figura 15.2 a base e os bordos da Bacia de São Paulo são constituídos por rochas pré-cambrianas. Trata-se particularmente de granitos, gnaisses e parcialmente de xistos. As áreas da bacia cruzadas pelas Linhas Norte-Sul e Leste-Oeste são constituídas principalmente por gnaisses.

A depressão que constitui a bacia parece ter se formado devido a movimentos tectônicos. Índícios de falhamento na borda norte da bacia (fig. 15.2. corte transversal A-A) parecem comprovar a hipótese da presença de falhamentos na gênese da bacia.

As diferenças de níveis no embasamento rochoso atingem um máximo de 200 m, sendo bem maiores do que as diferenças notadas na superfície do terreno da área em questão. O embasamento rochoso da bacia se encontra entre as cotas 600 e 800 m.

Provavelmente, durante a época terciária, a bacia foi preenchida pela deposição de sedimentos, até aproximadamente a cota 820 m. O corte transversal B-B da figura 15.2 mostra claramente esta sedimentação.

Sua espessura atinge até 200 m (por exemplo na Moóca) sendo, porém, normalmente menor.

As características desses sedimentos indicam deposição em antigos rios e lagos da época provavelmente terciária. Somente em proporções menores são encontrados depósitos fluviais recentes de idade quaternária ao longo das faixas percorridas pelos rios. O corte transversal B-B da figura 15.2 mostra um corte típico através dos depósitos sedimentares.

O referido corte foi feito a pouca distância da seção norte-sul e contém, a grosso modo, a delimitação das principais camadas do solo. A conformação do solo neste corte pode ser considerada característica para toda a área metropolitana de São Paulo.

O fundo rochoso da bacia se acha inicialmente recoberto por uma camada de aproximadamente 70 m de espessura de areias médias e grossas com pouca presença de argila. Acima desta, seguem-se as camadas superiores, quase sempre de argilas rijas variegadas e de areias finas ou médias argilosas. As cores apresentadas por estes solos são muito variáveis. A espessura dessas camadas superiores chega na Av. Paulista até 70 m, enquanto que em outros locais não passa de zero. As zonas elevadas no centro da bacia se acham recobertas por uma camada de argila vermelha e porosa. Ao longo dos atuais cursos de água ocorre uma camada sedimentar relativamente pouco espessa, de origem aluvionar, da época quaternária, recobrindo as camadas terciárias.

15.2.4.3. Perfis do sub-solo

As sondagens executadas para o projeto do metrô se concentram

sobre as seções norte-sul e leste-oeste. Perfis longitudinais detalhados do sub-solo ao longo destas duas seções estão contidas num minucioso Relatório Principal sobre as investigações do sub-solo. Nesses perfis longitudinais procurou-se, com base nas investigações até agora realizadas, determinar a disposição das principais camadas de solo através da conexão dessas camadas nas diversas sondagens isoladas.

Evidentemente é de se esperar que, em vista da distância entre sondagens de mais de uma centena de metros, tais determinações nem sempre correspondem exatamente à realidade. Isto, entretanto, não altera em princípio a seqüência das camadas nem a distribuição dos principais tipos de solo.

A fim de aumentar a exatidão dos perfis longitudinais do sub-solo, tendo em vista o planejamento definitivo e detalhado, foi iniciado ainda durante a fase de estudo preliminar, um segundo programa de sondagens de grande envergadura. Os resultados, todavia, somente serão conhecidos após a publicação deste relatório. A seguir descreveremos detalhadamente o perfil longitudinal do sub-solo na seção norte-sul, bastante representativo para o subsolo de São Paulo. O perfil do sub-solo na seção leste-oeste, em princípio, possui uma configuração semelhante.

Perfil longitudinal do sub-solo no eixo norte-sul

Para melhor clareza e compreensão, foram aproveitados os diversos trechos do perfil da seção norte-sul

contidos no Relatório Principal e apresentados conjuntamente em escala menor na figura 15.3.

O perfil longitudinal segue o traçado da seção norte-sul desde Santana, ao norte, em direção ao sul, além de São Judas, incluindo ainda um prolongamento de 4,0 km em direção a SO referente ao ramal de Moema. O perfil tem aproximadamente uma extensão de 20 km desde as bordas montanhosas setentrionais da Bacia de São Paulo até as bordas montanhosas meridionais. O perfil, conforme se verifica na planta (vide mapa da figura 15.1), é quase reto e cruza o centro da cidade.

Do norte ao sul são atingidos os seguintes pontos conhecidos da cidade: Santana, Av. Cruzeiro do Sul, Rio Tietê, Rio Tamanduateí, Av. Tiradentes, Estação da Luz, Anhangabaú, Largo São Bento, Rua Boa Vista, Praça Clóvis Beviláqua, Praça João Mendes, Rua da Liberdade, Paraíso, Vila Mariana, Praça da Árvore e São Judas.

Ao norte a seção cruza primeiramente o vale formado pelos rios Tietê e Tamanduateí, com uma largura de aproximadamente 3 km. O fundo do vale se encontra entre as cotas 720 — 725 m. Essa planície terá de ser provavelmente transposta em trecho elevado de metrô. Após a ponte do rio Tamanduateí a linha de metrô deverá correr em subterrâneo através de uma elevação de terreno de 15 m de altura ao longo da Av. Tiradentes, passando pela Estação da Luz até o Vale do Anhangabaú num trecho de cerca de 2 km de extensão. Do Vale do Anhangabaú, situado aproximadamente na cota 728 m, começa um trecho de 3,5 km de extensão de subida gradual até o

Paraíso, situado no espigão central. O ponto mais alto do perfil longitudinal se encontra no Paraíso com uma altitude de 815 m. Deste ponto até São Judas o perfil segue num extensão de 6 km ao longo do espigão central situado entre as cotas 795 e 815 m. Desde o Rio Tamanduateí até Jabaquara uma provável linha de metrô teria de ser subterrânea.

Como se pode observar, o perfil longitudinal pode ser dividido em quatro partes distintas do ponto de vista de sua topografia:

1. O vale do rio Tietê.
2. A rampa Liberdade-Paraíso.
3. A crista do espigão central.
4. O declive para Moema.

O perfil obtido mostra as camadas do solo até uma profundidade máxima de 50 m. Essa profundidade das sondagens é suficiente para a apreciação das obras relacionadas com o metrô. O gradiente da linha do metrô está desenhado na seção longitudinal bem como a posição provável das estações. Foi ainda indicada a posição de todas as sondagens. A figura 15.4 apresenta um exemplo de perfil de sondagem em escala reduzida. Todos os perfis das sondagens executadas poderão ser encontrados no Relatório Principal.

Principais tipos de solo

No perfil obtido se podem distinguir os seguintes tipos principais de solo:

1. **Atêrro artificial**
2. **Camada vermelha superficial** constituída por argila vermelha porosa ou argila vermelha e amarela rija.
3. **Camadas intermediárias:** camadas irregulares intercaladas de argilas variegadas rijas e de areias finas argilosas.
4. **Camada de areias basais:** areias médias e grossas, geralmente pouco argilosas.
5. **Argilas duras,** de cor predominantemente cinza.
6. **Argila esbranquiçada muito dura.**
7. **Sedimentos quaternários:** siltes e argilas orgânicas e areias finas.
8. **Camadas de solo de alteração de rocha.**

As camadas de solo de 2) a 6) pertencem provavelmente à época terciária e se apresentam atualmente na maioria das vezes pré-adensadas. Este pré-adensamento não corresponde à atual altura de recobrimento de terra.

O vale do rio Tietê

No vale do rio Tietê, encontramos abaixo de atêrros artificiais com 1 a 7 m de espessura, sedimentos fluviais moles, recentes, da época quaternária. São constituídos por siltes orgânicos, argilas e areias finas. Os depósitos quaternários atingem uma profundidade de no máximo 8 m, seguindo-se espessas camadas de argilas duras. Essas camadas de argila têm uma coloração verde-cinza e contém em alguns trechos espessas lentes de areia muito compacta. No lado norte do vale do rio Tietê as camadas de argila dura se localizam diretamente sobre a alteração de rocha (originalmente gnaisses). No lado sul do vale se podem encontrar entre

as camadas de argila dura e a zona de gnaisses decompostos, depósitos mais ou menos espessos de areias basais. Estas camadas arenosas contém na maioria das vezes um baixo teor de argila. As sondagens na área do Tietê demonstram que a profundidade das camadas de argila dura alcança pelo menos 30 m de profundidade.

O "espigão central" da Bacia de São Paulo e a rampa Liberdade-Paraíso

A crista do espigão central é recoberta por uma espessa camada de solo vermelho. Sua profundidade atinge perto da Rua Paraíso até 25 m de espessura, no máximo. Ela é constituída da parte superior, até uma profundidade de 8 a 10 m, de argila porosa vermelha. Em maior profundidade passa a ser constituída por argila vermelha e/ou vermelha e amarela, rija, não mais porosa (zona de transição). O limite entre a argila porosa e a não porosa corresponde quase sempre à superfície do primeiro lençol freático. Na camada de argilas vermelhas rijas, se encontram concreções de limonita rijas a muito duras, cujas espessuras variam de alguns milímetros até vários decímetros. A mais espessa concreção de limonita já encontrada na Bacia de São Paulo tem 2 m de espessura. Trata-se de deposição de óxidos de ferro. A camada de argila vermelha superficial é produto de um processo de laterização. Assim, acima do nível do lençol freático foram lixiviados certos silicatos e certas quantidades de óxidos de ferro pela ação da água de infiltração, e esse processo pode ter ocasionado o aparecimento de uma camada de argila porosa.

Parece ter ocorrido no nível do lençol freático existente em épocas anteriores, um acúmulo do óxido de ferro lixiviado das camadas superiores e da sua cristalização resultou a formação das concreções de limonita.

A camada vermelha superficial encontrada ao longo da crista de todo o espigão central é encontrada também, porém, em menor espessura na rampa extensa entre a Liberdade e a Rua Paraíso. De acordo com a opinião de alguns especialistas, a mesma zona de laterização é encontrada novamente na camada superior de solo entre o Vale do Anhangabaú e o rio Tamanduateí. Neste caso, entretanto, trata-se na maioria das vezes de misturas de argila e areia.

Camadas de atêrro de alguma importância nesta área são encontradas apenas no Vale do Anhangabaú. Abaixo da camada de argilas vermelhas superficiais se encontram as "camadas intermediárias", constituídas por camadas intercaladas de argilas e areias arrançadas irregularmente tanto no sentido vertical como horizontal.

As argilas se apresentam em cores variegadas. As camadas arenosas são constituídas por areias de granulação geralmente fina e são sempre argilosas.

Foi verificado que estas "camadas intermediárias" têm uma espessura entre 10 a 15 m na rampa Liberdade-Paraíso, enquanto no espigão central, nem com sondagens de 50 m de profundidade essas camadas foram atravessadas.

Na área formada pela rampa Liberdade-Paraíso e pelo espigão

central o embasamento rochoso não foi atingido. Somente na Praça Clóvis Bevilacqua apareceu a 28 m de profundidade gnaisses decomposto.

Neste mesmo local foi encontrado entre a rocha alterada e as camadas intermediárias um tipo de argila, extremamente dura, esbranquiçada com manchas vermelhas escuras, a qual recobre uma camada de arenito da mesma cor (ver as sondagens A 1, D 1 e D 2a). Uma argila igualmente dura e de cor esbranquiçada foi encontrada na Av. Tiradentes (sondagem A 10) também situada abaixo das camadas intermediárias e praticamente na mesma cota. Essa argila esbranquiçada extraída na sondagem A 10 parece pertencer à mesma formação de argilas duras do vale do Tietê. Entretanto, a camada de argila esbranquiçada da Praça Clóvis Bevilacqua juntamente com o arenito fortemente cimentado e com alto teor de sílica existente abaixo, parecem ter uma origem diversa.

O declive para Moema

Da parte mais alta do espigão central até as proximidades de Moema, existe um desnível de cerca de 65 metros. No início da descida para o Ibirapuera as condições geológicas se mantêm as mesmas do espigão central. Na altura da Rua Oscar Pôrto, a camada superficial de argila porosa desaparece dando lugar à uma camada contínua de solo quaternário que recobre todo o trecho entre aquela rua e Moema.

Essa camada é constituída principalmente por argilas pretas com matéria orgânica, e sua espessura varia de 1,5 a 6,0 metros. Abaixo da camada orgânica aparecem os horizontes típicos da "camada intermediária." No trecho Ibirapuera-Moema essas

camadas aparecem recobrimdo depósitos de argilas cinzas e duras, semelhantes aos horizontes que ocorrem na Praça Clóvis Bevilacqua e vale do rio Tietê. Não foi definido nesta fase das investigações se essas argilas duras dos locais acima considerados, possuem a mesma origem.

Apesar de em algumas sondagens ter-se perfurado até 15 m em alteração de rocha, somente em poucos casos atingiu-se a rocha sã. Esta observação coincide com as conclusões de estudos anteriores, segundo os quais a zona de decomposição de rocha, na Bacia de São Paulo, tem uma espessura que varia de 12 a 40 metros.

Como se pode depreender da descrição da seção norte-sul, o preenchimento da Bacia de São Paulo foi feito por sedimentos provavelmente terciários. Somente nos vales dos rios atuais existem pequenas camadas aluviais quaternárias, com poucos metros de espessura. A situação do lençol de água subterrânea já foi descrita de forma generalizada num parágrafo anterior. O primeiro nível de água encontrado na época da execução das sondagens está desenhado no perfil longitudinal da seção norte-sul da figura 15.1.

15.2.5. Agressividade da água subterrânea

Para a verificação da agressividade da água subterrânea, em relação aos materiais de construção, foram retiradas amostras de água de 59 sondagens e submetidas à análise química no IPT. Para a classificação da agressividade foi utilizada a tabela de Normas Industriais Alemã (DIN) da figura 15.5.

Classificação	Agressividade	Valor pH	CO ₂ (mg/l)
0	neutra	>6,5	<15
I	fraca	6,5-5,5	15-30
II	forte	5,5-4,5	30-60
III	muito forte	<4,5	>60

15.5

Sondagem N.º	Valor pH	CO ₂ (mg/l)	Grau da agressividade
A 17a	6,6	34,0	II
B 28	5,4	81,7	III
B 37	6,3	47,7	II
C 22	5,9	27,2	I
C 24	6,1	84,0	III
C 27	6,3	118,1	III
C 31	5,0	70,4	III
D 22	5,4	61,3	III
E 4	5,6	29,5	II
E 6	5,3	77,2	III

15.6

Fig. 15.5
Classificação da agressividade da água subterrânea no concreto

Fig. 15.6
Resultados das análises químicas da água subterrânea

Em São Paulo, a agressividade da água ao concreto se deve ao fato da água subterrânea apresentar um valor baixo de pH, ao mesmo tempo que contém um alto teor de ácido carbônico (CO_3H_2).

Os resultados de análises, mais de confiança, são os das 10 amostras apresentadas na figura 15.6. Como se pode verificar, a agressividade da água é muito forte em 60% das amostras analisadas, devido principalmente ao alto teor em CO_3H_2 .

Ficou comprovado que a agressividade da água subterrânea na área metropolitana apresenta uma distribuição heterogênea de valores. Em alguns trechos foram encontradas variações para o projeto detalhado.

15.2.6. Influência das condições do subsolo em relação aos processos de construção e às construções propriamente ditas

Do resultado das investigações se pode deduzir, de modo geral, que as camadas superficiais do solo na Bacia de São Paulo, constituída por sedimentos quaternários e terciários, não são resistentes como fundação. Somente as camadas mais profundas têm uma resistência média a alta.

Embora, nas construções normais, as condições do solo sejam muito desfavoráveis, podem vir a criar problema também neste tipo de construção.

As fundações dos trechos em elevado, requerem para o seu assentamento um terreno suficientemente resistente. De modo geral, é de se esperar nesses trechos, que as camadas superiores de pouca resistência tenham que ser atravessadas por fundações mais

profundas como p. ex., estacas, poços e tubulões.

Os trechos em subterrâneo do metrô na área do centro da cidade atravessarão as camadas alternadas e heterogêneas que constituem as "camadas intermediárias".

Da mesma maneira, esses trechos do metrô estarão situados em cotas ligeiramente acima ou abaixo do nível do lençol freático principal. Nos trechos onde serão aplicados os métodos de construção a céu aberto ("cut and cover") se podem prover grandes dificuldades, devido à possibilidade de se formarem areias movediças ("quick sand"), e devido à existência de areias semipermeáveis em muitos locais.

Em toda a área de construção do metrô, as camadas de areia contém, via de regra, de 3 a 30% de argila. Isto dificultará o rebaixamento do nível do lençol freático por processo de gravidade. Na maioria dos casos somente um rebaixamento a vácuo deverá ter êxito. Nesse caso, a heterogeneidade do solo também deverá trazer problemas. Nas zonas onde o rebaixamento for executado em solos contendo camadas de argila é de se esperar que devido ao desaparecimento do expurgo hidrostático ocorram recalques prejudiciais. Em cada caso, ter-se-á de estudar, se esses possíveis recalques em áreas construídas, não causarão maiores prejuízos.

Esses efeitos negativos deverão ser atenuados pelo pré-adensamento das camadas terciárias. No cálculo do adensamento se pode admitir que um aumento de pressão inferior à pressão de pré-adensamento trará somente recalques mínimos no solo. Este fato, aliás, tem sido usado pelos projetistas de muitos arranha-céus em São Paulo. Na construção dos

edifícios, esses projetistas sempre procuraram fazer que a pressão sob as fundações não ultrapassasse a pressão de pré-adensamento.

Nos processos de escavação a céu aberto ("cut and cover") ter-se-á que evitar através de medidas apropriadas, a ruptura hidráulica do fundo da escavação. Na área densamente construída no centro da cidade, deverão ser escolhidos métodos de construção que evitem o movimento do solo, próximo e, principalmente, debaixo dos edifícios.

Na zona do espigão central, entre o Paraíso e São Judas a linha do metrô está a pequena profundidade. Neste trecho as escavações serão principalmente em solo argiloso e além disso, estarão quase sempre acima do lençol freático. Assim sendo, é de esperar que não ocorram maiores dificuldades técnicas.

Considerando que a linha do metrô está situada nesta zona sempre próxima da crista do espigão central, a construção de eventuais filtros para a passagem do fluxo de água subterrânea, interrompido pela construção do metrô, só será necessária em casos excepcionais.

A agressividade da água subterrânea é em alguns locais muito forte. Porém, este problema, deverá ser um pouco atenuado pelo fato de que a velocidade de movimento da água subterrânea é relativamente baixa, uma vez que os solos são na maioria pouco permeáveis. Provavelmente essa razão porque não se perceberam até hoje, danos no grande número de fundações de edifícios situados abaixo do nível da água subterrânea.

Nesta altura do estudo, é evidente que as construções do metrô devam receber uma proteção especial contra a água subterrânea e que durante o

planejamento detalhado seja necessário efetuar, para as diversas áreas, mais investigações. Entretanto, desde já, em face dos resultados até agora obtidos, se pode contar com água subterrânea de agressividade forte a muito forte em numerosos pontos da área metropolitana.

15.2.7. Programação para as investigações futuras

As investigações do sub-solo realizadas até agora para o metrô, juntamente com as informações mais antigas sobre a área de São Paulo forneceram uma boa idéia geral da conformação do sub-solo ao longo do traçado planejado. Os resultados detalhados das investigações realizadas constam de um volumoso relatório principal que será apresentado em separado. Nesse relatório se encontram também os perfis das sondagens e o resultado dos estudos de mecânica do solo. Para o planejamento detalhado da Linha Norte-Sul já se iniciou a execução de um programa complementar de investigações. O volume desta segunda parte das investigações ultrapassa consideravelmente o da primeira. Nesta segunda parte, especial atenção é dada aos estudos das condições da água subterrânea e a realização de um intenso programa de ensaios de laboratório. Além disso, se pretende completar o estudo preliminar através de pesquisas mineralógicas que permitem conhecer melhor as condições geológicas das principais camadas de solo.

Para a fase de construção ter-se-á de pesquisar os métodos mais adequados para o rebaixamento do lençol freático, para a estabilização do solo através de injeções bem como recomendar outras provas "in situ".

Os métodos utilizados na construção de vias subterrâneas são os mais variados. A escolha depende em grande parte das condições topográficas e das características locais do sub-solo. Para que possam ser propostos os mais adequados, os diversos métodos de construção devem ser examinados quanto à sua aplicabilidade, considerando as condições reinantes em São Paulo, como se faz a seguir.

16.1. Métodos de construção para vias subterrâneas pelo sistema "a céu aberto" ("cut and cover")

A condição básica para execução de galerias subterrâneas pelo sistema "a céu aberto" é haver terreno que permita a abertura de uma vala com as dimensões necessárias para a construção. Isto sucede quando o traçado da linha acompanha ruas suficientemente largas.

Os diversos métodos do sistema "a céu aberto" se diferenciam principalmente pela maneira de executar o escoramento das paredes da vala e pelos materiais de construção que se aplicam. Os métodos mais usados, e que serão descritos a seguir, são:

- Método Berlinense
- Método Hamburguês
- Método com parede de estacas-pranchas
- Método com parede-diafragma (Milanês)
- Método com parede de estacas moldadas justapostas.

O método de escavação da vala com taludes não será tratado, já que não apresenta problemas especiais.

Devem ser mencionados ainda, a título informativo, o sistema de caixão submersível e o método por flutuação de peças pré-fabricadas para túnel, cuja descrição não será necessária, pois não serão aplicáveis em São Paulo.

16.1.1. Método Berlinense e variantes de Munique

O método Berlinense foi criado no início deste século para a construção do metropolitano de Berlim, tendo sido aplicado até a época mais recente. Entre outras obras do metrô executados nesses últimos anos, esse método foi aplicado nas linhas de expansão em Berlim e também

em trechos do Metrô de Toronto (Fig. 16.1). Havendo condições de solo parecidas com as de Berlim, — areia e argila magra, — esse método é tecnicamente perfeito e econômico na execução. O método prevê que as paredes verticais da vala sejam escoradas de acordo com o progresso da escavação, através de cravação de perfis I — distância de 2 a 3 m — colocando-se pranchões de madeira horizontais nos espaços intermediários.

A junção das paredes da vala ao pavimento da rua deve ser impermeável e constantemente controlada, pois chuvas súbitas poderão ocasionar erosões e ruptura do solo atrás do revestimento das paredes.

As duas paredes laterais são escoradas por estroncas de madeira ou de aço, cujo comprimento de flambagem poderá ser reduzido através de contraventamento longitudinal. Nos trechos em que qualquer deformação das paredes deva ser evitada o mais possível, as estroncas serão protendidas.

O rebaixamento do lençol freático se faz por meio de poços filtrantes, processo esse para o qual o solo arenoso de Berlim muito se presta, e que proporciona fundo e paredes da vala secos.

Após a conclusão da escavação, aplica-se sobre os pranchões horizontais uma camada de concreto protetora da impermeabilização das paredes, assim como uma camada de concreto magro no fundo da vala.

Após a aplicação de 3 a 5 camadas de impermeabilização asfáltica, é executado o fundo do túnel; este — após o endurecimento e a retirada das estroncas inferiores — assegura o escoramento dos perfis I mantendo a vala livre para a construção da seção transversal restante do túnel, pois a fileira de estroncas seguintes encontra-se acima do teto do túnel. Segue-se a execução das paredes e do teto do túnel, com impermeabilização e camada protetora.

Depois do reatêrro da vala, os perfis I são retirados, sendo que os pranchões horizontais — na área do túnel — permanecem no solo. A deterioração dos pranchões acima do nível da água subterrânea até agora só trouxe recalques insignificantes da pavimentação das ruas.

Entre outras localidades, o sistema Berlinense também foi aplicado em Munique, com adaptação às condições locais. O sub-solo

apresenta camadas de argila dura e magra, sendo que a cravação dos perfis foi substituída pela colocação dos mesmos em furos previamente abertos. Desta forma, evitam-se as vibrações provenientes da cravação e o conseqüente perigo de aparecimento de trincas nos edifícios adjacentes. Igualmente, reduz-se bastante o ruído, para maior conforto dos moradores nas proximidades da obra.

Nas áreas centrais urbanas trabalha-se atualmente quase sempre segundo esse método.

A drenagem do terreno é feita de acordo com as condições apresentadas pelo sub-solo: ou na forma de rebaixamento do lençol freático com poços filtrantes, ou por meio de poço aberto no fundo da vala com bomba, e calhas para escoamento. Havendo forte corrente de água subterrânea transversal à vala, são colocados drenos longitudinais nas paredes, para coleta e desvio da água subterrânea.

Nos trechos entre as estações do Metrô de Munique foi omitida experimentalmente a vedação betuminosa, construindo-se a linha de concreto impermeável. O número das juntas longitudinais foi reduzido a um mínimo; a seção transversal foi concretada em apenas duas etapas. O espaçamento entre juntas de concretagem no sentido transversal foi diminuído, a fim de reduzir o perigo de fissuras por retração. Nas estações foi conservada a aplicação de impermeabilização asfáltica, a fim de evitar o inconveniente de aparecimento de manchas de umidade no concreto aparente ou revestido. Esse método exige um superdimensionamento das valas criando um espaço lateral para aplicação do revestimento externo, de impermeabilização como no método Hamburguês.

Esse método requer uma execução muito cuidadosa e correta, aliada a um rigoroso controle na fabricação e aplicação do concreto impermeável; se a água subterrânea for muito agressiva, não poderá ser dispensada a vedação betuminosa externa.

No método Berlinense, bem como em outros tipos de construção "a céu aberto", recentemente realizadas, a colocação de estroncas entre as paredes da vala tem sido substituída por sua ancoragem no terreno.

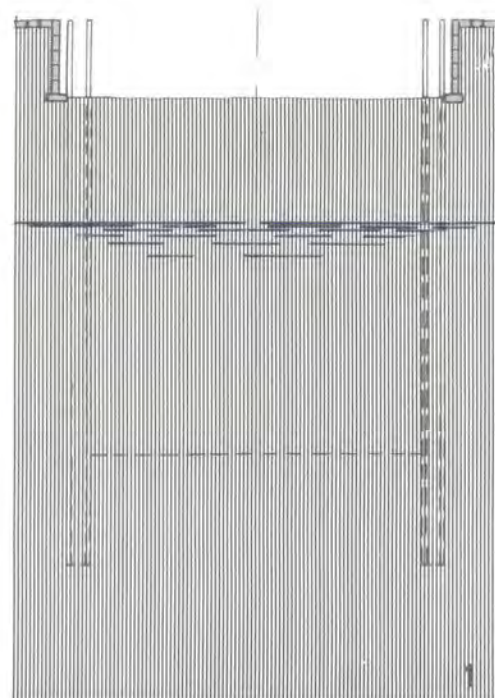
Todavia, considerando a predominância de areias argilosas e a consistência do solo de São Paulo, esse método quase não será aplicável.

16.1.2. Método Hamburguês

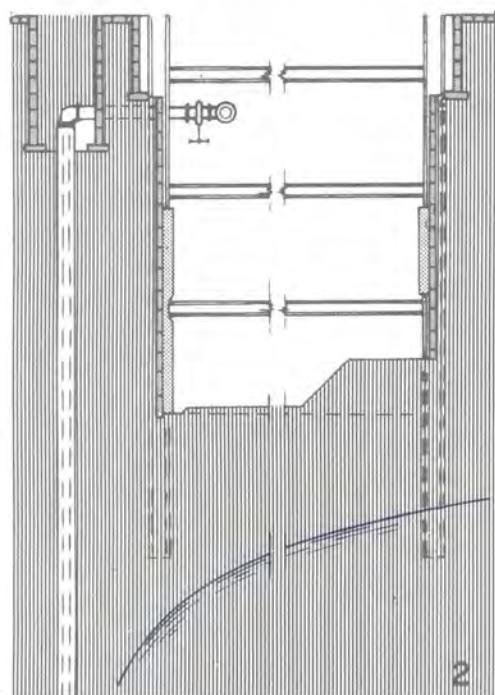
O método Hamburguês originou-se no método Berlinense, com a adaptação às condições locais (Fig. 16.2). Enquanto o solo arenoso uniforme de Berlim assegurava uma vala seca pelo rebaixamento do lençol freático através de poços filtrantes, as camadas da areia fina e silte do sub-solo de Hamburgo, — que sob vários aspectos assemelha-se ao de São Paulo — impedem que as paredes da vala sequem, e isso é condição básica para a aplicação da camada protetora da impermeabilização. Assim sendo, é preciso reservar um espaço livre lateral (área de serviço), para se poder aplicar a impermeabilização na superfície externa do túnel já pronto. Além disso, o pedregulho e pedras soltas dificultam e chegam muitas vezes a impedir a cravação exata dos perfis I, o que é uma condição indispensável no método de construção Berlinense. Desta forma, a característica principal do método Hamburguês é o espaço livre (indispensável) entre as paredes do túnel e a parede da vala.

A colocação de estroncas e de pranchões nas paredes é feita da mesma forma que no método Berlinense. No entanto, as juntas do madeiramento devem ser vedadas com palha de madeira ou similar, caso estejam sujeitas a infiltrações de água subterrânea. Após a aplicação do concreto magro e da impermeabilização do fundo, faz-se a concretagem do fundo, das paredes e do teto, com auxílio de fôrmas. Em seguida, procede-se a impermeabilização das paredes externas protegendo-as por um revestimento suplementar de alvenaria. Durante o fechamento das valas, os pranchões do escoramento podem ser recuperados, retirando-se finalmente os perfis I.

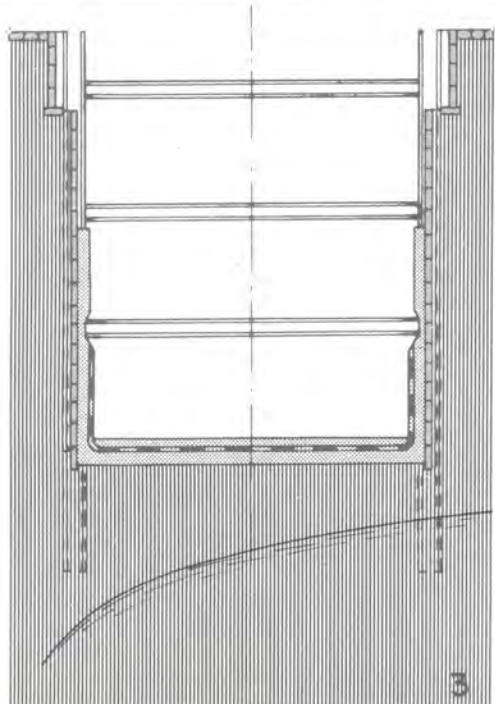
A comparação entre o método Hamburguês e o método Berlinense com as variantes de Munique, mostra que a principal vantagem do método Hamburguês é a aplicação direta da impermeabilização nas paredes externas da construção, o que assegura uma vedação perfeita. Por outro lado, não há perigo, como no método Berlinense, de que a impermeabilização seja danificada quando for colocada a armação ou feita a concretagem. Pelo método Hamburguês, os pranchões de madeira podem ser totalmente recuperados, sendo que pelo método Berlinense uma parte dos mesmos permanece no solo. Ao contrário do método Berlinense, a retirada dos perfis I não oferece perigo à impermeabilização.



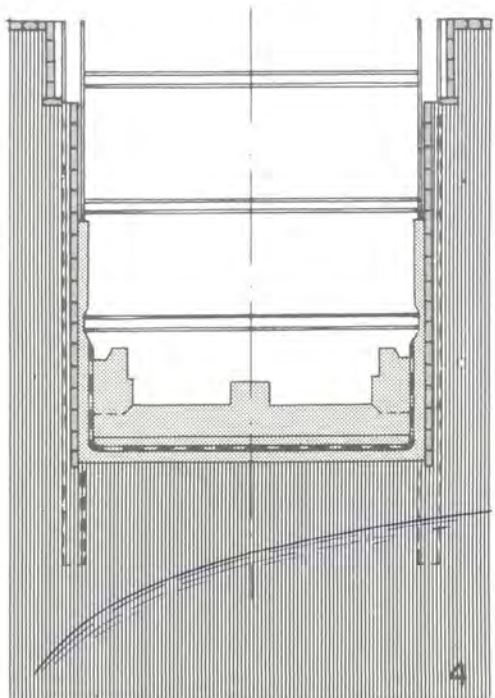
Cravação das vigas I
Escavação até 1.00 m de profundidade.



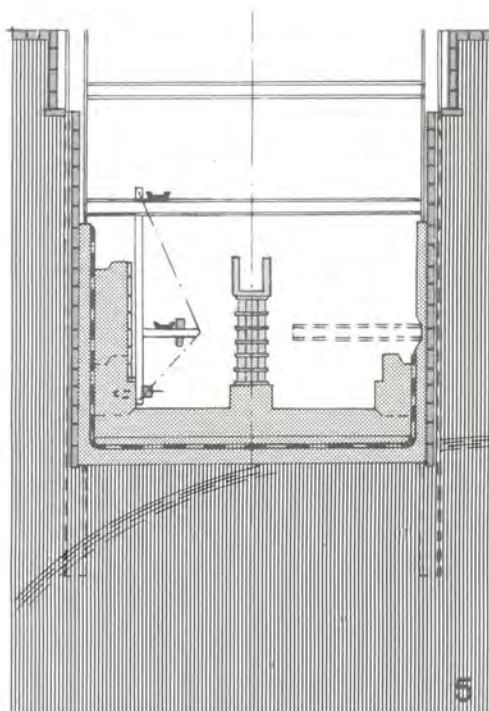
Abaixamento do lençol freático.
Escavação em camadas de 3.00 m
Colocação das pranchas horizontais entre as
vigas e revestimento das mesmas com
concreto armado.



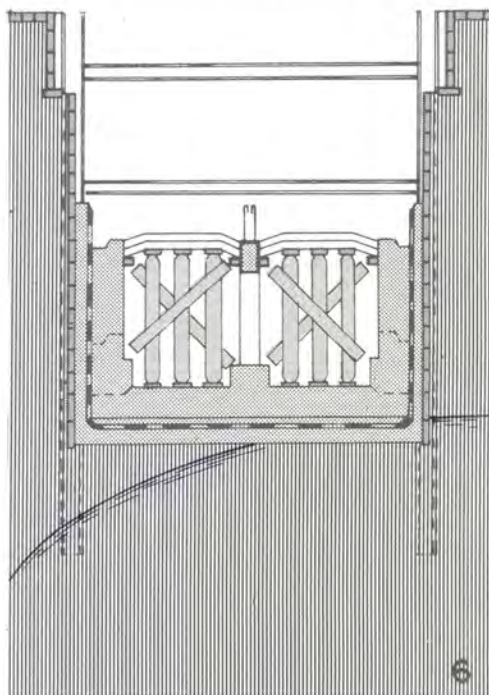
Capa de concreto colocada no fundo da vala.
Impermeabilização da laje e da parte inferior
das paredes. Colocação da camada de
proteção acima do impermeabilizante da laje.



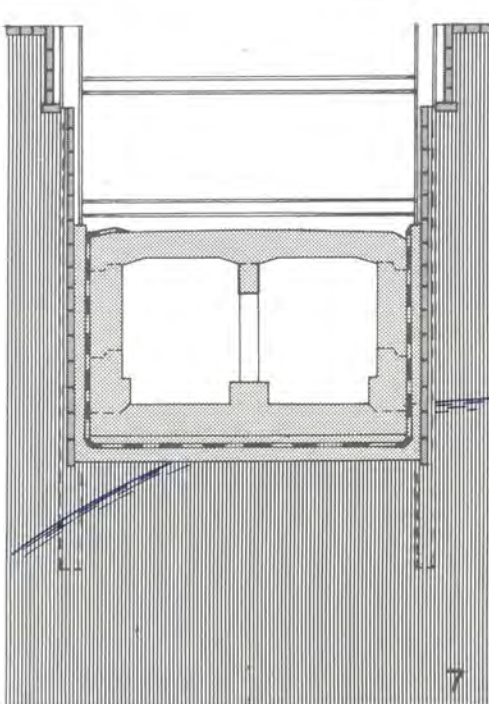
Armação e concretagem da laje, seguido pela
forma, armação e concretagem da parte
inferior das paredes



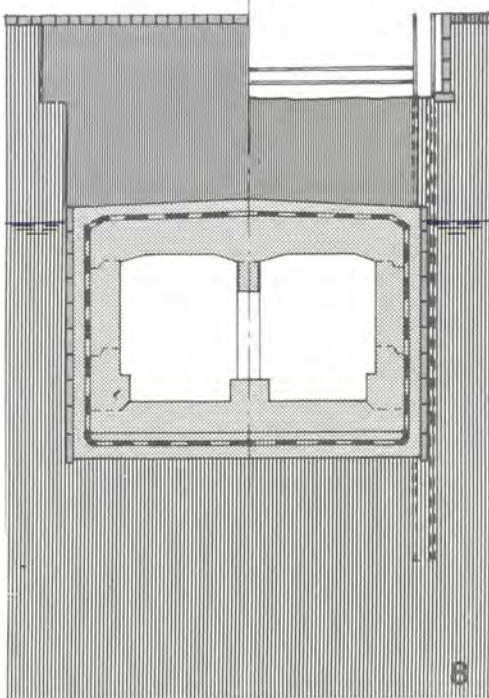
Endurecido o concreto, será retirada a escora
mais baixa; segue-se a impermeabilização
das paredes, forma, armação e concretagem
das paredes e das colunas centrais.



Escoramento e forma da laje superior.

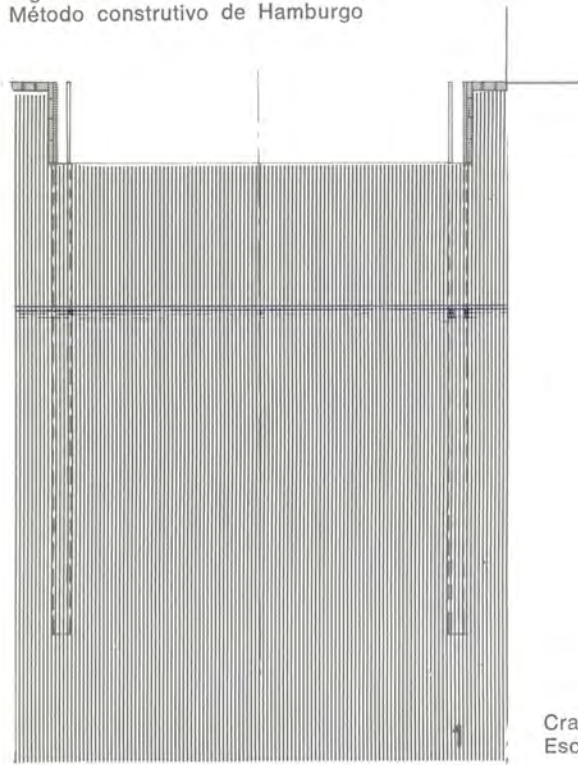


Armação e concretagem da laje superior,
após o que se deixa subir lentamente o nível
do lençol freático.

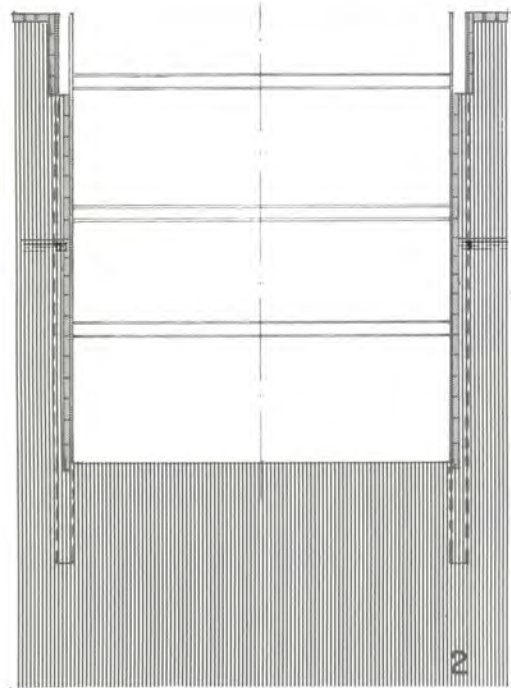


Retirada a escora superior, coloca-se o
impermeabilizante da laje superior e a camada
de proteção acima desta. Atérro da vala,
retirada da instalação para o rebaixamento do
lençol freático e das vigas laterais I
e reconstrução do pavimento da rua.

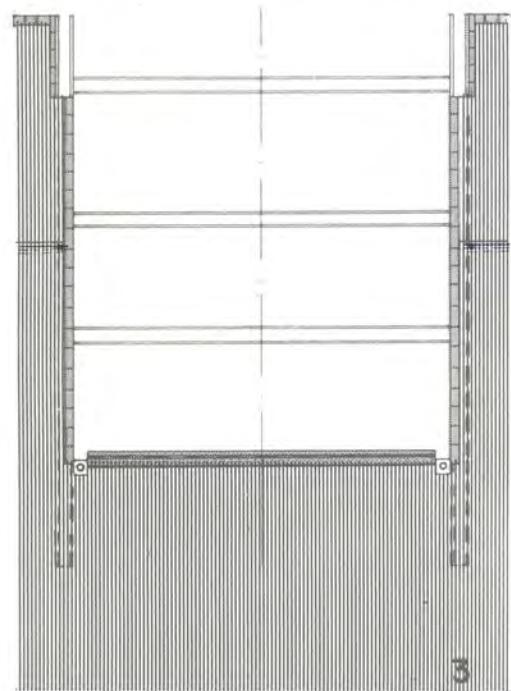
Fig. 16.2
Método construtivo de Hamburgo



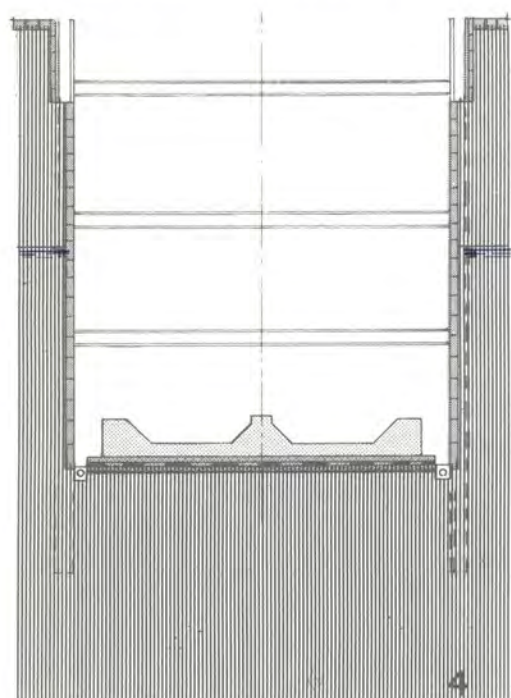
Cravação das vigas I
Escavação até 1.00 m de profundidade



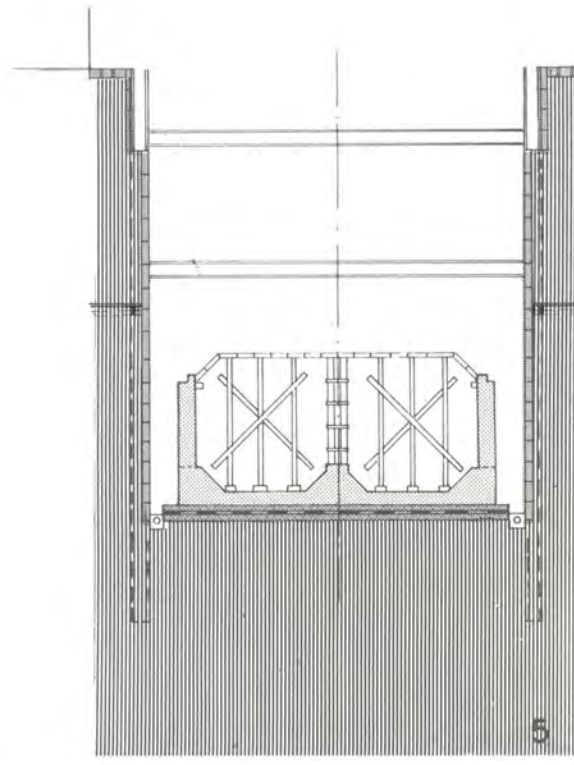
Escavação em camadas de 3.00 m
Colocação das pranchas horizontais entre as vigas



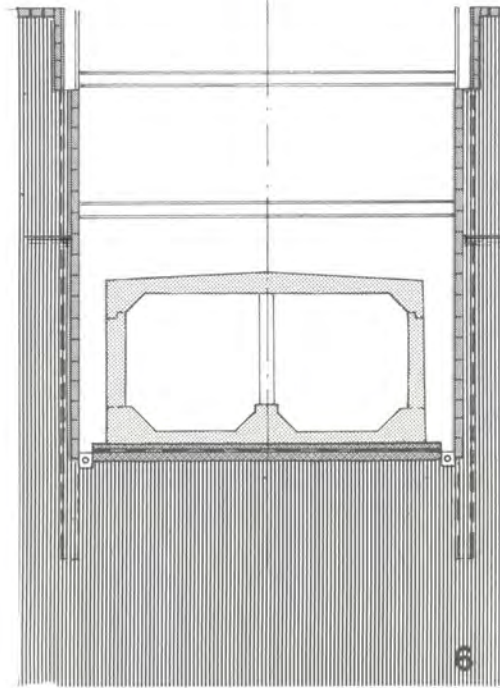
Drenagem com bombas automáticas colocadas lateralmente ao túnel.
Camada de concreto colocada no fundo da vala.
Impermeabilização da laje. Camada de proteção acima do impermeabilizante da laje.



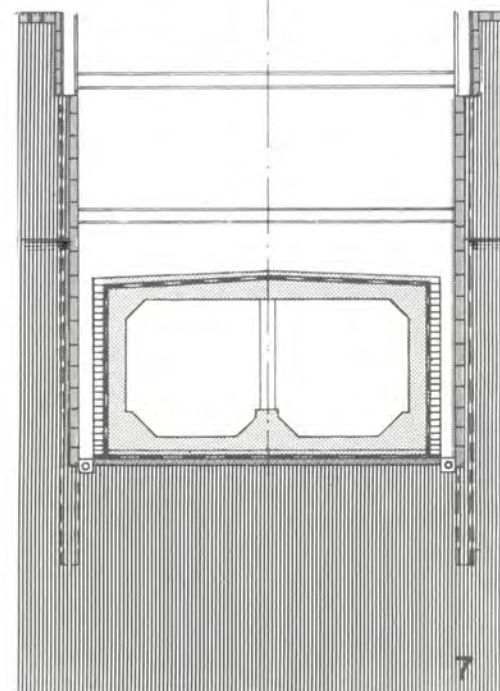
Armação e concretagem da laje



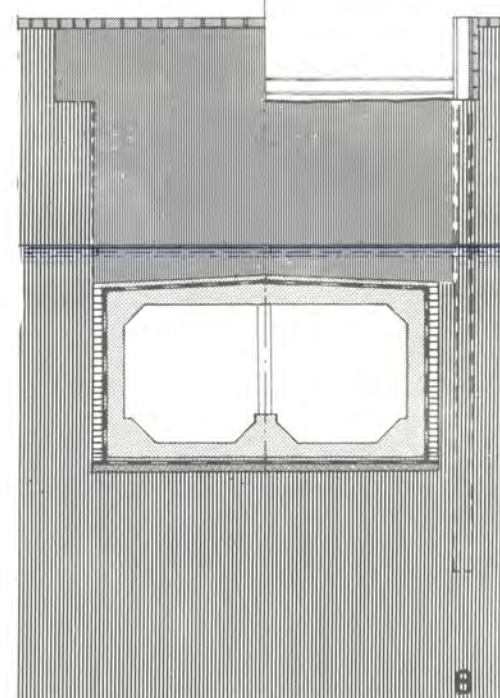
Endurecido o concreto, será retirada a escora mais baixa; segue-se a forma, armação e concretagem das paredes e das colunas centrais.



Escoramento, forma, armação e concretagem da laje superior.

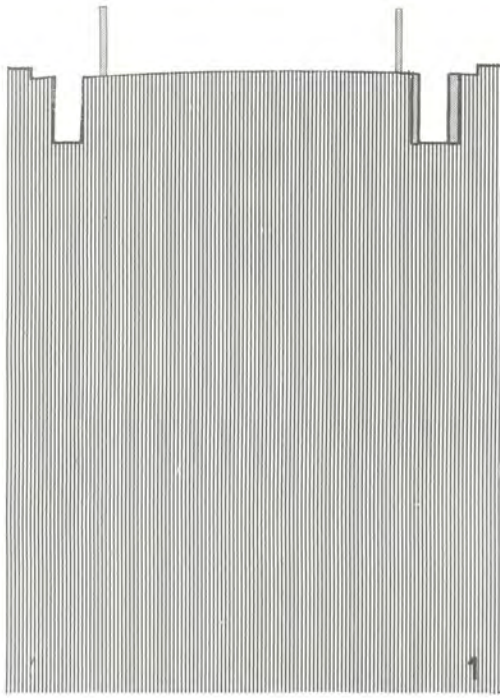


Impermeabilização das paredes e da laje superior
Aplicação de camada de proteção sobre a camada impermeabilizante nas paredes e na laje superior.

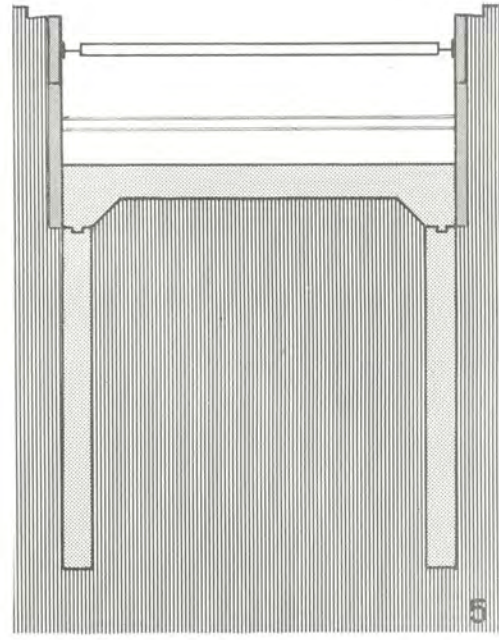


Removidas as bombas automáticas, começa o atêrro com retirada simultânea das pranchas horizontais, recuperação das vigas e reconstrução do pavimento da rua.

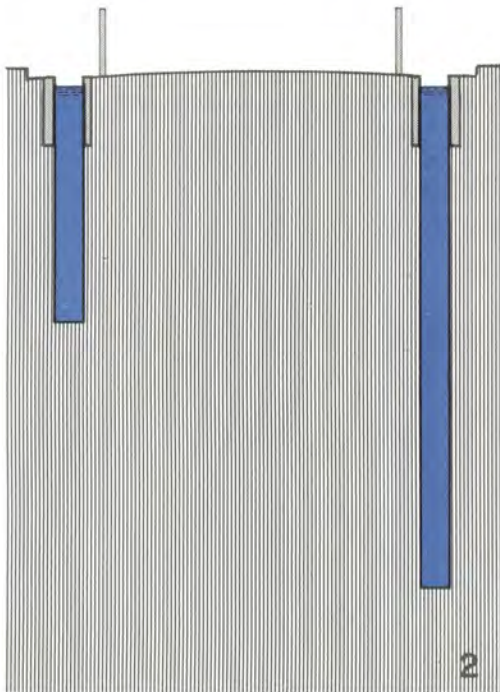
Fig. 16.3
Método construtivo de Milão



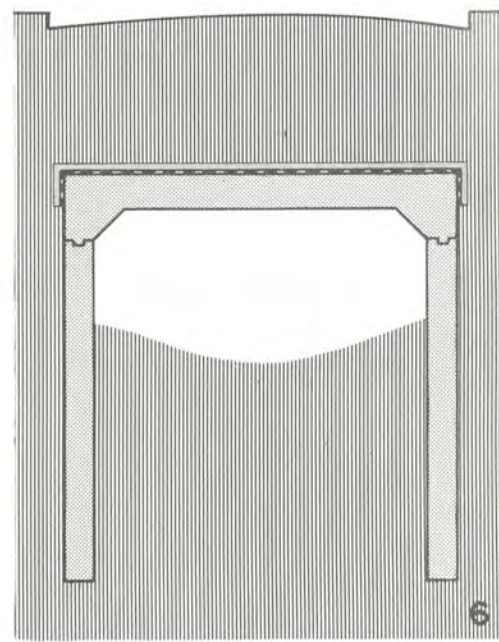
Escavação manual de duas valas laterais até 1,50 m de profundidade.



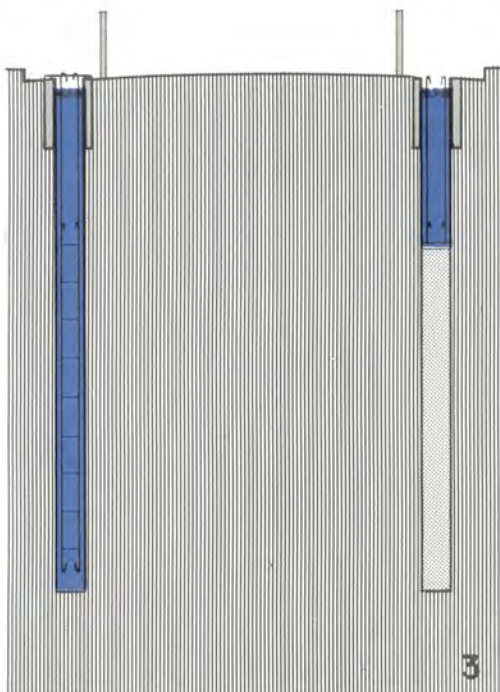
Concretagem da laje superior.



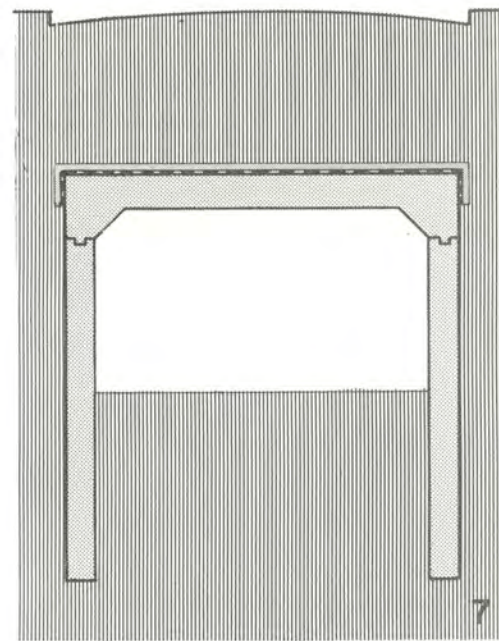
Escavação com equipamento especial e enchimento simultâneo da vala com lama tixotrópica.



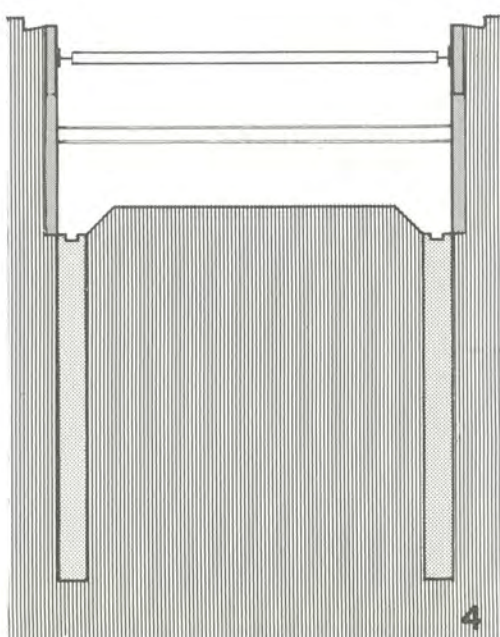
Endurecida a laje será aplicada a impermeabilização e a camada de proteção; começa o atêrro.



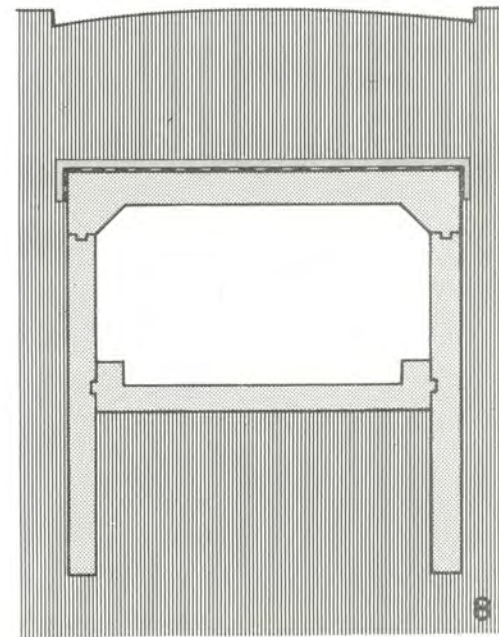
Colocação da armadura e do concreto pelo método "contractor".



Escavação do túnel, restituição do pavimento da rua



Levantamento da pavimentação e escavação até o nível inferior da futura laje superior do túnel.



Concretagem da laje inferior.

Em confronto com a execução em concreto impermeável, a impermeabilização contínua oferece uma segura proteção contra infiltrações e, principalmente, contra águas subterrâneas agressivas. Além disso, a impermeabilização contínua reduz o aparecimento de correntes de fuga, que podem ocasionar danos à construção do túnel e às instalações de abastecimento adjacentes.

A principal desvantagem do método Hamburguês é o espaço livre lateral indispensável à impermeabilização, que significa um alargamento da vala, de cerca de 1,80 m, resultando em escavações mais vultosas e em maiores gastos nos escoramentos. Em ruas estreitas, esse alargamento muitas vezes traz grandes dificuldades.

Quanto aos custos, a impermeabilização contínua é mais cara do que a construção em concreto impermeável, porém, as maiores despesas de uma são compensadas pelo cuidado especial necessário na outra, principalmente no que diz respeito às juntas. Portanto, na escolha do método de construção, o risco trazido pela falta de impermeabilização deverá ser cuidadosamente cotejado com as maiores despesas decorrentes da impermeabilização.

16.1.3. Método com paredes de estacas-pranchas

Neste método as estacas-pranchas substituem os perfis I e os pranchões horizontais. Devido ao maior gasto de material, é de execução dispendiosa; por esse motivo, só se aplica em casos de grande necessidade, como por exemplo quando houver solos com perigo de liquefação, e sem possibilidade de drenagem devido a uma seqüência irregular de camadas ou quando houver ameaça de erosão de solos. A parede contínua de estacas-pranchas impede a passagem de partículas de solo, bem como, quando cravada a uma profundidade conveniente, o refluxo das camadas subjacentes por baixo da cortina. Tendo em vista as condições desfavoráveis do sub-solo de São Paulo, será necessário, pelo menos nas valas de grande profundidade, considerar a aplicação desse método em diversos trechos.

16.1.4. Método com paredes-diafragma (método Milanês)

Conforme já foi mencionado, o sistema de construção "a céu aberto" acompanha o traçado das ruas e praças. Por isso, em virtude da proximidade de edifícios, algumas vezes resultam cargas tão elevadas para as paredes da vala, que os métodos até agora citados não poderão ser aplicados, devido às deformações dessas paredes. Com exceção do método com estacas-pranchas, os outros dois métodos podem trazer danos aos edifícios adjacentes, em consequência das perdas de água e formação de cavidades no solo. Além disso, os tipos de execução até agora descritos afetam temporariamente o tráfego nas ruas, sendo que, conforme a largura da rua ocasionariam afunilamentos ou interrupção do trânsito.

Por outro lado, a cobertura da vala de construção para permitir a continuação do tráfego, resulta em consideráveis despesas e dificuldades para a execução da obra.

Com o aprofundamento das escavações é necessário colocar mais estroncas aumentando as dificuldades nos trabalhos da construção.

Para evitar essas desvantagens dos métodos até agora descritos, foi empregado o método com paredes-diafragma, o qual por ter sido aplicado, pela primeira vez na construção do Metrô de Milão — é também chamado método Milanês (Fig. 16.3). Esse método visa a utilizar os muros de escoramento como paredes do túnel definitivo, estorvando o menos possível o tráfego nas ruas.

Segundo esse método, escavam-se com equipamento especial, caçambas ou tubos de sucção, valas estreitas em seções de 2,50 m a 5,00 m de comprimento, conforme a proximidade e altura das edificações. A medida que se processa a escavação, essas valas estreitas são mantidas cheias de um líquido tixotrópico, uma suspensão de bentonita, que reforça as paredes da vala e substitui o escoramento convencional. Após alcançar a profundidade desejada, introduz-se uma armação de aço e faz-se a concretagem submersa, pelo método "Contractor". A medida em que é feita a concretagem, a lama de bentonita pode passar para a seção seguinte da vala (Fig. 16.4) ou seguir para um depósito para armazenamento ou recuperação.

Após a execução das paredes laterais, faz-se a escavação e o escoramento até a face inferior do teto; corta-se a parte da parede que ultrapassa o teto do túnel e dobram-se os ferros da armação para ligação do teto do túnel, após o que se faz a armação e a concretagem deste. Depois do endurecimento do concreto é feito o reatêrro acima do túnel, bem como a pavimentação da rua, para prosseguimento do tráfego na superfície.

A escavação do túnel e o transporte de terra, bem como o transporte do concreto para construção do piso, passam a ser feitos subterraneamente, a partir de alguns poucos pontos de acesso. Os desnivelamentos da parede são posteriormente acertados ou cobertos por revestimento.

As condições em Milão eram favoráveis à aplicação desse método, de forma que a construção de metrô pôde prosseguir rápida e economicamente.

A via subterrânea atingia uma profundidade média de 12 m não alcançando o lençol freático.

Assim, foi necessário impermeabilizar apenas o teto contra as águas infiltradas.

As condições são outras quando as paredes-diafragma são construídas abaixo do nível freático. Devido ao seu tipo de execução, a parede-diafragma com suas inúmeras juntas não é impermeável. Assim sendo, há necessidade de construir novas paredes impermeáveis internamente ao túnel, (Fig. 16.5) ou então — para evitar os altos custos dessa construção — veda-se as juntas da parede-diafragma quando de sua execução.

Foram elaboradas diversas soluções para a vedação das juntas verticais entre as diversas partes da parede-diafragma e da ligação do fundo da vala com as paredes laterais, porém, não foram ainda comprovadas. Numa dessas soluções as juntas verticais são vedadas por um cobre-junta preso à armação de ferro.

Para a ligação do fundo da vala com as paredes laterais, é colocada uma placa de material sintético ligada à armação. Após a conclusão da escavação, essa placa é retirada, deixando um entalhe para a execução do fundo. Para a vedação da junta entre o fundo e a parede coloca-se um tubo de borracha, no qual mais tarde é injetada argamassa. (Fig. 16.6) A dosagem do concreto deve proporcionar impermeabilidade máxima. Em menores proporções, esse método já foi aplicado várias vezes, porém, de forma ampla só foi aplicado em Munique.

É condição básica para a aplicação do método, em água subterrânea, que a capacidade de carga das paredes-diafragma não seja eliminada posteriormente pela atuação de águas agressivas.

Na comparação entre o método com paredes-diafragma e o método Berlimense, e respectivamente, o Hamburguês, apresentam-se as seguintes vantagens:

O tráfego na rua sofre interrupção de curta duração.

Como não há necessidade de cravação, não há perturbações devido a ruídos.

Não haverá danos causados por vibrações.

Devido à construção rígida das paredes da vala e ao seu escoramento pelo teto de concreto e pelo fundo do túnel definitivo, só ocorrerão deformações insignificantes, ficando os edifícios adjacentes melhor protegidos contra recalques e formação de trincas.

Em virtude da grande capacidade de carga das paredes e dos reforços pelos elementos de concreto armado dos futuros tetos, intermediário e final, nas valas de grande profundidade obtem-se espaços livres (áreas de serviços) mais altos do que pela execução com perfis I e estroncas de aço ou madeira.

As desvantagens são as seguintes:

Devido à sua execução em seções, as paredes-diafragma com suas juntas não são impermeáveis. As providências a serem tomadas para sua impermeabilização aumentam consideravelmente os custos de construção, devido aos maiores gastos de material e mão de obra.

Havendo águas subterrâneas fortemente agressivas não é possível a aplicação do método com paredes-diafragma, a não ser como simples parede de vala.

As paredes do túnel apresentam, como consequência de seu método de construção, grandes desnivelamentos, exigindo acertos posteriores ou revestimento.

Se a lama de bentonita penetrar numa canalização danificada ou escorrer para porões não conhecidos, a vala para as paredes-diafragma poderá ruir durante a escavação, o que traria graves perigos para os edifícios adjacentes.

Em São Paulo o método com paredes-diafragma será de importância onde o tráfego nas ruas não puder sofrer interrupções senão de curta duração ou onde fôr necessário atender à segurança dos edifícios perto da vala de construção. Todavia, as camadas de limonita existentes em São Paulo, dificultam bastante a execução de escavações estreitas e

perfurações, pois as pancadas necessárias para quebrar a limonita ocasionam desmoronamento nas paredes das valas, que requerem serviços de consolidação e, conseqüentemente, custos adicionais. Nos trechos que apresentam camadas de limonita aconselha-se executar paredes-diafragma apenas em casos de extrema necessidade.

16.1.5. Método com paredes de estacas moldadas justapostas

Nesse método forma-se a parede da vala por estacas moldadas justapostas, que se tocam ou se sobrepõem parcialmente. (Fig. 16.7) A perfuração poderá ser feita através de tubo ou poços com líquido tixotrópico. Em virtude do maior número de juntas, a impermeabilidade é menor ainda do que nas paredes-diafragma. Principalmente em solos argilosos, as juntas ficam cheias de argila devido ao movimento rotativo do aparelho de perfuração, pelo que não se pode obter a vedação.

Se as paredes de estacas moldadas forem utilizadas apenas como parede de vala, então esse método resulta muito dispendioso. Em princípio, a parede da vala também poderá servir como parede definitiva, juntamente com uma parede interna impermeável, porém, a colocação do teto do túnel na parede conjugada é de difícil execução.

A isto se adiciona a dificuldade na perfuração pela presença de camadas de limonita.

Assim como a parede-diafragma, a parede de estacas moldadas justapostas é mais eficiente no que diz respeito a segurança dos edifícios.

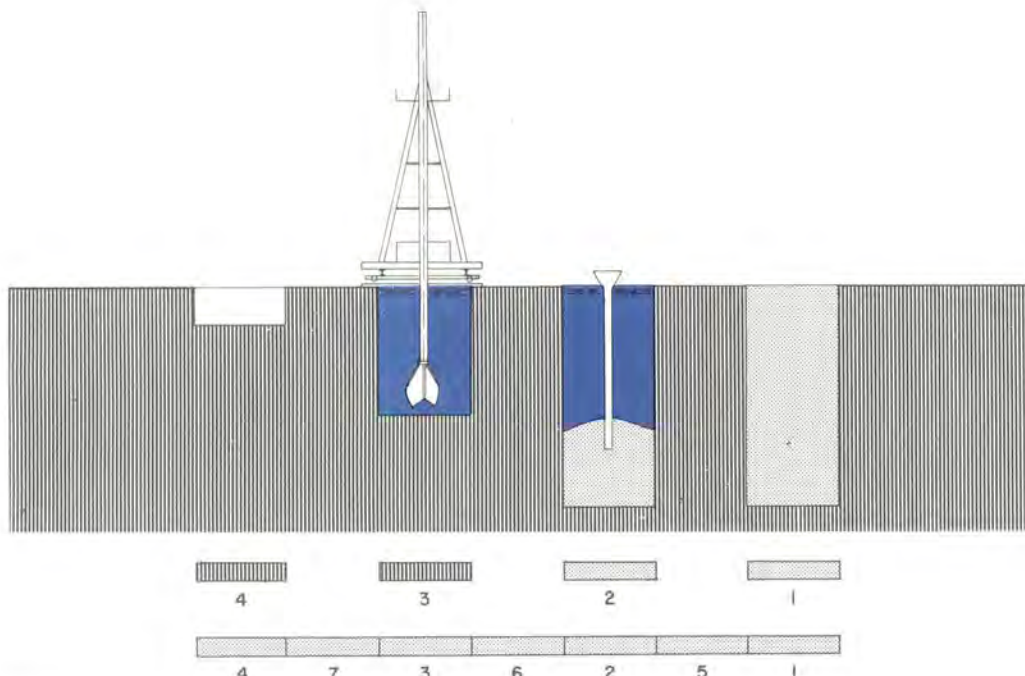
Nesse caso, geralmente as estacas são cravadas encostadas umas às outras.

16.1.6. Ancoragem das paredes das escavações

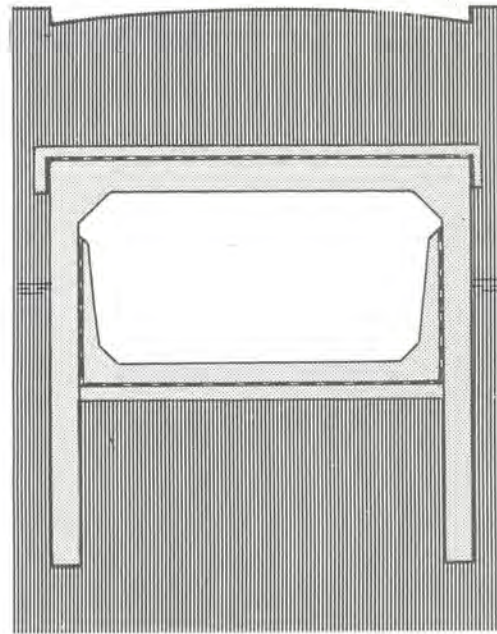
Nos últimos anos, em lugar de se proceder a sustentação das paredes das escavações por meio de escoramento interno, tem sido muito mais freqüente o processo de sustentá-las por meio de ancoragem externa nos terrenos laterais.

Com este processo a seqüência dos trabalhos da construção já não é dificultada pela presença de escoras e, sobretudo em escavações profundas e de grandes proporções, evita-se a embaraçante rede de escoramento. No processo de ancoragem emprega-se em geral tirantes de uma só barra corrugada de aço ou de vários cabos de proteção, os quais, reunidos em feixes, são introduzidos no orifício aberto no solo lateral. O fundo do orifício, ou mesmo todo seu comprimento, é preenchido com concreto apiloado de acordo com a capacidade de sustentação exigida. Quanto a esta capacidade, seu valor depende essencialmente da natureza do solo no qual a ancoragem é introduzida. De acordo com as experiências, cada tirante cravado em argila deve resistir a uma força que varia entre cerca de 10 a 30 t e em areia de 20 a 40 t.

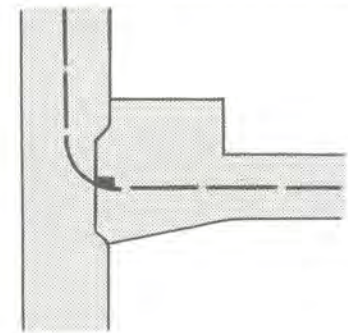
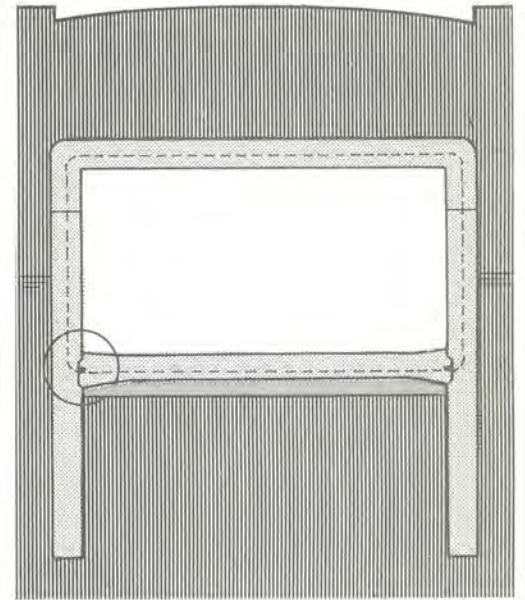
Praticamente, em todas as escavações abertas (processo de construção do Metrô de Berlim, de Hamburgo, de paredes de estacas, de paredes-diafragma) pode ser dispensado o escoramento interno, o qual viria dificultar a execução dos trabalhos



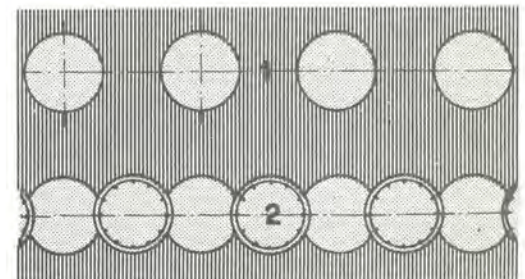
16.4

Fig. 16.4
Paredes-diafragmaFig. 16.5
Túnel com impermeabilização internaFig. 16.6
Túnel em concreto impermeávelFig. 16.7
Cortina de estacas justapostas

16.5



16.6



16.7

posteriores, sempre que seja possível a sustentação do empuxo da terra por meio de ancoragem no próprio solo.

Também no caso de escavações onde há somente um corte vertical do terreno adapta-se bem o processo de ancoragem no solo lateral, pois neste caso não há possibilidade de escoramento interno. Este tipo de sustentação de paredes de escavações é particularmente apropriado para os trechos do metrô executados em cortes ao longo de um terreno em declive. Aqui pode a ancoragem ser aplicada, tanto como garantia durante a construção das obras para sustentação provisória, como para muro de arrimo definitivo.

16.1.7. Escolha do método adequado para a construção de vias subterrâneas do Metrô de São Paulo

16.1.7.1. Sub-solo e água subterrânea

A constituição do sub-solo de São Paulo apresenta grandes variações litológicas em virtude da existência de camadas argilosas e arenosas de diferentes consistências contendo porcentagens variáveis de silte. Em virtude das camadas de areia, que encerram a água, se alternarem com camadas impermeáveis de argila, não pode ser estabelecido um único nível de água subterrânea. A profundidade do lençol freático (nível de água subterrânea) chega a oscilar entre 9,00 m a 16,00 m nas partes mais elevadas como Paraíso, Praça João Mendes, para 2,00 m a 5,00 m nas áreas de baixadas ou vales como os do Tietê, Tamanduateí, Anhangabaú, etc.

Os resultados das análises químicas de amostras de água subterrânea mostraram a existência de razoável porcentagem de ácido carbônico agressivo, em determinadas áreas. Aconselha-se a aplicação de várias camadas de impermeabilização asfáltica, para proteção das obras construídas abaixo do nível freático.

16.1.7.2. Drenagem

A drenagem aberta com poços coletores com bombas e calhas somente será possível em casos isolados, devido às condições do sub-solo de São Paulo — principalmente por causa da liquefação do solo.

O rebaixamento do lençol freático através de poços filtrantes não é exequível. Somente poderá ser executado através de poços ou galerias filtrantes a vácuo. Todavia, também esse processo não assegura uma drenagem total de cada camada, sendo sempre necessário prever possíveis penetrações de água através das paredes da vala. Nas camadas de argila ou ricas em material siltoso sujeito a arrastamento, poderão surgir recalques prejudiciais dos terrenos vizinhos.

A drenagem das camadas de areia poderá ocasionar a retirada de água da argila, podendo resultar em recalques de edifícios.

De resto, o problema da drenagem somente poderá ser esclarecido definitivamente por meio de ensaios de bombeamento em grande escala no campo, o que deverá ser feito, de preferência, em terrenos da construção preliminar, como por exemplo: um na área de São Judas — Ana Rosa,

um na área Paraíso — Clóvis Beviláqua e outro na Luz.

16.1.7.3. Escolha do método de construção para as paredes da vala

Devido à água subterrânea residual que penetra as paredes, fica totalmente excluída a aplicação do método Berlinense para São Paulo. Para as condições de S. Paulo o método mais adequado é o Hamburguês.

Portanto, devem ser novamente resumidas as vantagens desse método, a saber:

- Possibilidade de uma cuidadosa fiscalização dos serviços através do espaço livre (área de serviço) adicional em ambos os lados da obra.
- Os pranchões de madeira podem ser recuperados e aplicados novamente.
- As camadas impermeabilizantes aplicadas externamente na construção terminada asseguram uma perfeita vedação.
- A impermeabilização contínua é a melhor proteção contra elementos prejudiciais ao concreto, existente nas águas subterrâneas e, além disso, reduz o perigo de surgimento de correntes de fuga.

c) As águas das camadas não coletadas pelo sistema de drenagem podem ser retiradas por vedação adicional das juntas entre os pranchões horizontais, impedindo movimentação do solo e, com isso, recalques de edifícios.

Assim sendo, esse método é aplicável em qualquer profundidade até o lençol

freático. Também abaixo do nível da água subterrânea pode ser aplicado, sendo, porém, necessárias providências adicionais para impedir os movimentos de partículas do solo carregado pelas águas infiltradas através das paredes da vala. Essa providência adicional consiste na colocação de pranchões horizontais em cujo reverso se aplica uma camada filtrante. Além disso, todas as juntas entre os pranchões devem ser cuidadosamente vedadas.

A aplicação do método Hamburguês é limitada pela possibilidade de reter a afluência de água na colocação dos pranchões e impedir com isso a conseqüente perda de solo. Nesse caso, o método Hamburguês deverá ser substituído por paredes de estacas-pranchas que impeçam, com segurança, a perda de solo e a penetração de água.

Mais sondagens e experiências práticas mostrarão em que locais deverão ser executadas paredes de estacas-pranchas. Em alguns casos também será necessário executar paredes de estacas-pranchas em lugar do método Hamburguês, para impedir recalques, que poderão surgir em conseqüência do rebaixamento do lençol freático.

A melhor solução para escavações mais profundas seria escorar a parte superior da vala pelo método Hamburguês, e a parte inferior, numa diminuição da largura da vala, com parede de estacas-pranchas.

Desta forma, na parte construída com estacas-pranchas não será necessário fazer rebaixamento do lençol freático. Na área da Linha Norte-Sul — na medida em que as primeiras sondagens efetuadas para este estudo permitem

uma conclusão — o trecho de São Judas até depois da Estação Ana Rosa provavelmente poderá ser executado pelo método Hamburguês. Sômente em áreas pequenas o fundo da vala chega a atingir camadas de saibro e areia, que contém água; geralmente a vala atravessa camadas argilosas mais impermeáveis.

Uma área mais crítica é a do Paraíso até o vale do Tietê, pois ali existem alternadamente camadas de argila e de areia, já a partir do nível da superfície. Nessa área possivelmente será necessário construir certos trechos com paredes de vala impermeáveis, devido à forte influência de água; em parte deverá ser aplicada a combinação já mencionada do método Hamburguês com o das paredes de estacas-pranchas, e em outras áreas, com edificações não muito próximas, o simples método Hamburguês poderá ser o suficiente.

Para uma determinação exata dos métodos a serem aplicados nessa área, será necessário executar sondagens mais pormenorizadas de água subterrânea e do subsolo, inclusive amplos ensaios in loco, dentro de programa para um estudo de construção.

Em ruas estreitas com edifícios altos, nos quais o método Hamburguês não poderá ser aplicado, em virtude da deformação das paredes da vala e do perigo da movimentação do solo, será apropriado o método com paredes-diafragma. A construção rígida da parede da vala oferece grande segurança contra recalques de edifícios vizinhos e uma conseqüente formação de trincas nos mesmos.

Deverá ser verificado para cada caso em separado se as paredes-diafragma serão utilizadas apenas como escoramento da vala, ou se poderão ser aproveitadas como parte da construção definitiva do túnel, como ocorreu em Milão.

Esse método de construção é o adequado para a Estação São Bento e o trecho seguinte da Rua Boa Vista até o Pátio do Colégio, principalmente porque — devido ao grande movimento de pedestres na zona bancária — ali só serão possíveis curtas interrupções do tráfego.

Outrossim, em muitos casos serão necessárias paredes-diafragma e paredes de estacas moldadas para maior segurança dos edifícios.

16.2. Métodos de execução para metrô em sistema de construção subterrânea

A construção de metropolitanos subterrâneos, processo há muito praticado e em fase de mecanização já bastante adiantada, emprega-se, principalmente, nas áreas de maior aglomeração de grandes construções dos centros urbanos.

Nestas áreas estes métodos permitem a escolha livre do traçado das linhas a uma profundidade relativamente grande, sem que seja necessário tomar em consideração as construções e vias superficiais existentes.

A seguir, enunciar-se-á, detalhadamente, o uso e desenvolvimento de tais sistemas de exploração subterrânea, descrevendo os principais equipamentos mecânicos, analisando minuciosamente, as experiências de construções em

diversos metrô, a fim de justificar os métodos construtivos e o maquinário aconselhados para as condições topográficas e geológicas da cidade de São Paulo.

16.2.1. Método de construção do sistema mineiro

Os sistemas mais antigos que se conhecem para construção de túneis em rocha solta, são sistemas nos quais as paredes do vão a ser aberto devem ser sustentadas por um escoramento ou revestimento.

Este, via de regra, é apoiado, na altura do piso por meio de armações metálicas ou de madeira, em forma de batentes de portas, longarinas ou arcos de ferro.

Este sistema de construção, entretanto, comparado com o sistema do tipo couraça, apresenta muitas desvantagens, quais sejam:

a) A necessidade de mão de obra muito elevada e velocidade de avanço muito reduzida;

b) Na execução do revestimento de madeiras, resultam vazios, na parte posterior, que podem causar recalques do terreno superior;

c) O revestimento de madeira e uma parte das escoras se perderão no terreno, o que causará aumento de despesas;

d) Na transferência de pressão da rocha por intermédio das escoras para a base, surgem pontos de tensão que muitas vezes ultrapassam a capacidade de suporte do solo, provocando recalques;

e) Na execução do acabamento final do túnel são necessárias alterações no escoramento, que por sua vez podem provocar novos recalques;

f) Pelo apodrecimento das madeiras do revestimento surgem vãos ôcos. É muito importante, na construção de túneis para metrô, que se evitem estes assentamentos e desnivelamentos que possam, nas áreas urbanas, causar danos em pavimentações, construções ou canalizações de serviços urbanos;

g) Estes sistemas só são praticáveis acima do nível freático.

Pelos motivos acima enunciados demonstram-se as desvantagens do sistema mineiro, razão pela qual não será aconselhado na construção do Metrô de São Paulo.

16.2.2. Método de construção pelo sistema couraça

O sistema couraça é um método, que com o emprêgo de uma couraça — que assumirá a sustentação temporária do terreno no vão aberto — permite o assentamento dos anéis de revestimento do túnel em solos instáveis.

Além disso, este sistema permite o uso de elementos pré-fabricados e o avanço contínuo pela aplicação de equipamento mecânico destinado à retirada ininterrupta da terra escavada.

De grande importância é a possibilidade de adaptação do equipamento às características e tipos de solo a serem escavados, à medida que se vão apresentando, assim como o seu emprêgo sob condições variadas do lençol da água subterrânea, ao longo do percurso. Estas condições definirão, em princípio, a necessidade

de um equipamento semi-automático ou completamente automático. O uso do sistema de couraça não só permite a operação a seco, como também dentro do lençol freático, exigindo, entretanto, nesse caso, técnicas de trabalho e equipamentos especiais.

Desenvolvimento histórico

O sistema de couraça passou a ter importância especial quando, no fim do século passado, foi iniciada a construção de metrô em grandes cidades como Londres, Nova Iorque e Berlim.

Para a escolha dos métodos mais adequados nos primórdios da construção dos metrô, o mais importante eram as condições geológicas e hidrogeológicas.

Em Londres, as camadas de aluvião, areia e cascalho são relativamente de pouca espessura, em média de 6,00 a 8,00 m; esses depósitos assentam sobre uma formação terciária constituída por uma camada de argila homogênea, azulada, praticamente impermeável, material que se presta excelentemente ao método da couraça. Deste modo foi em Londres que se desenvolveram os métodos de construção de túneis.

Certas providências, como as coberturas transitáveis das valas de construção, que em alguns casos podem constituir uma solução aceitável, em outros casos menos favoráveis, serão tão dispendiosas que o seu custo não seria ultrapassado pelo método de couraça, em condições normais de terreno.

Por outro lado, será ainda necessário levar em consideração a interferência de canalizações de abastecimento ou de drenagem, que poderão forçar a escolha de um nível bastante profundo para a linha do metrô. Se, entretanto, um grande número de canalizações principais dessa natureza em perfeito funcionamento e atendendo realmente às necessidades, tenha de ser desviado para que as obras possam ser realizadas a céu aberto, será preciso realizar um estudo comparativo criterioso, entre tôdas as vantagens e desvantagens da construção a céu aberto e da construção em túnel.

Problema de outra natureza, que se agravou nos últimos tempos na construção dos metrô em cidades americanas e européias, quando foram conduzidas a céu aberto, foram os prejuízos do comércio das zonas de construção que resultaram em processos de indenização.

Se nas áreas urbanas a serem percorridas um dos problemas acima mencionados estiver presente de maneira especial, ou se todos se apresentarem ao mesmo tempo, dever-se-á examinar cuidadosamente a conveniência do sistema de túneis, mesmo se as condições geológicas do terreno não forem as ideais. Cada caso deve ser analisado individualmente, devendo-se contrapor vantagens técnicas a desvantagens financeiras.

16.2.2.1. O sistema de couraça acima do lençol freático

O método de construção de túneis pelo sistema de couraça tem quase cem anos. A ferramenta mais importante para a execução deste sistema é a couraça que tem a forma de tubo de aço de seção circular, cujo diâmetro interno é um pouco maior que o diâmetro externo do túnel, salvo poucas exceções.

As figuras 16.8 e 16.9 mostram uma couraça de construção simplificada, de acionamento manual, e apresentam, igualmente, em todos os detalhes mais importantes, uma couraça de avanço não mecanizado, incluindo as operações de trabalho.

A capa da couraça (1) é reforçada pela armação de aço (2); a extremidade posterior da couraça (3) cobre os dois últimos anéis (4 e 5) dos quais sempre o último (5) é montado dentro da cobertura (6) da couraça por uma máquina de colocação dos segmentos do anel. Após a formação do anel por meio dos segmentos (7) a couraça avança com o auxílio de macacos hidráulicos (8) de avanço correspondente à largura de um anel. Neste mesmo tempo os macacos hidráulicos frontais (9) que sustentam o escoramento da frente de trabalho (10) são recolhidos nas mesmas medidas. Atrás da couraça corre um andaime móvel (11) usado para parafusar as junções dos anéis, que sustentam as instalações do equipamento injetor do concreto (12) para o preenchimento do vão exterior ao anel, deixado pela couraça (13). O material resultante da escavação será transferido para as vagonetas (15) pelo carregador de caçamba (14) instalado em trilhos e posteriormente transportado para o poço inicial. Usavam-se esporadicamente couraças com seção semi-circular, assim chamadas couraças tipo teto.

Traçado e níveis

Pelo método da couraça o metrô não necessita seguir o traçado das ruas e pode passar sob construções existentes. Esta liberdade de escolha de traçados possibilita a construção de curvas em grandes raios, que por sua vez possibilitam altas velocidades de cruzeiro.

Por este motivo, em Londres, por exemplo, foi escolhido um raio mínimo de 400 m. Por outro lado, para o método da couraça, raios inferiores a 200 m não são aconselháveis, pois surgem problemas quanto à orientação do avanço da couraça. Também, porque a profundidade dos túneis neste caso não interfere, o nível pode ser escolhido sem levar em consideração as condições topográficas dentro dos declives prescritos, enquanto que pelo sistema a céu aberto a profundidade é limitada por fatores de ordem técnica e econômica.

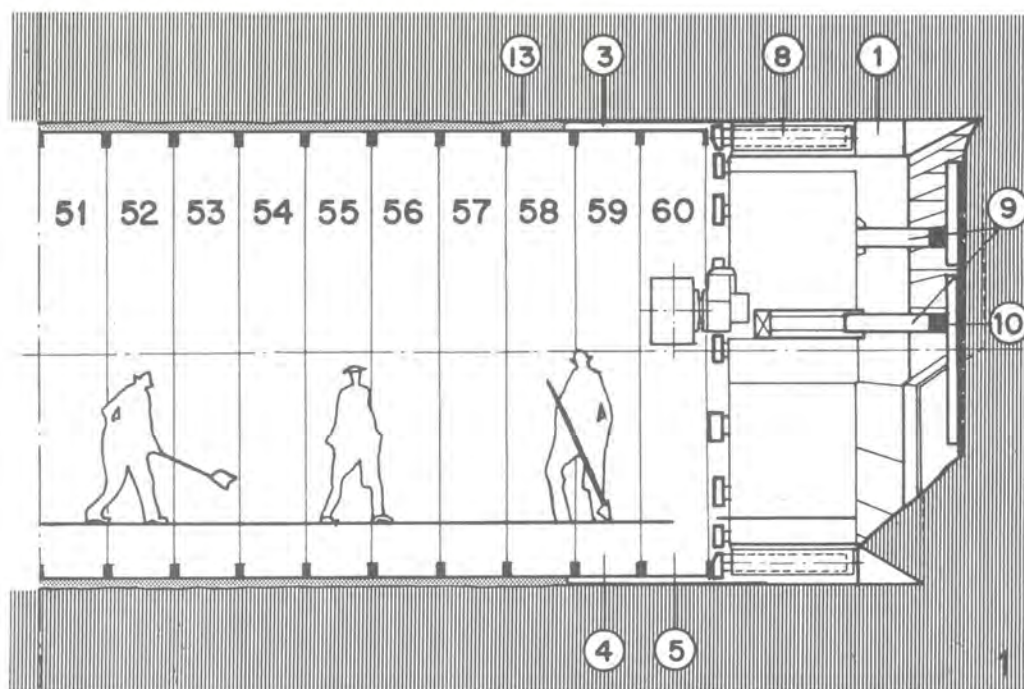
Este ponto de vista deve ser levado em consideração nas grandes cidades como São Paulo, onde existem, nas áreas centrais muito edificadas, grandes desníveis.

Túneis para vias singelas ou duplas

Aqui se torna interessante uma comparação das vantagens e desvantagens de túneis de uma ou duas vias, abertos pelo método da couraça. Esta comparação somente poderá ser feita considerando-se certas condições hidrogeológicas em relação ao traçado projetado.

Já foi mencionado anteriormente que uma das principais providências a serem tomadas na construção de túneis é evitar o assentamento do solo sobre o túnel que pode provocar recalques na superfície.

No método da couraça forma-se por fora do revestimento do túnel um espaço vazio, em forma de anel, cuja dimensão é dada pela espessura da couraça e pelo espaço necessário para orientá-la no avanço, ou seja entre o lado externo do revestimento e o lado interno da parte posterior da couraça.



- 1 Couraça
- 2 Reforço interno da couraça
- 3 Parte posterior da couraça
- 4+5 Anéis
- 6 Máquina para colocação dos segmentos do anel
- 7 Segmentos do anel
- 8 Prensas hidráulicas para avanço da couraça
- 9 Prensas hidráulicas frontais
- 10 Frente de trabalho
- 11 Andaime móvel
- 12 Equipamento injetor
- 13 Espaço preenchido com injeção de argamassa de cimento
- 14 Carregadora de caçamba
- 15 Vagoneta

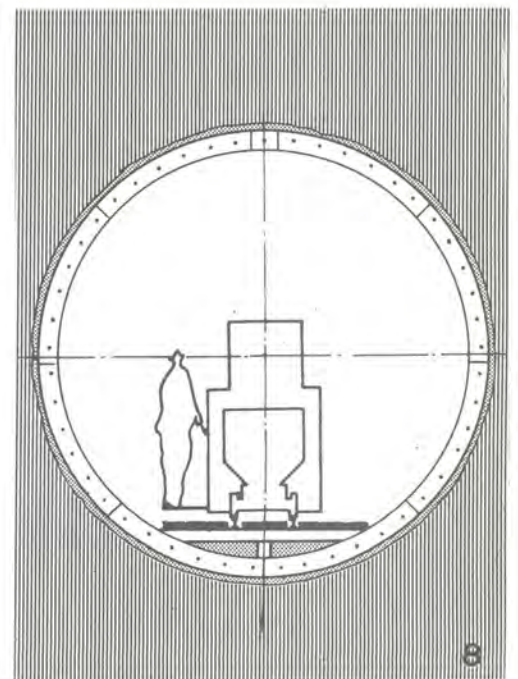
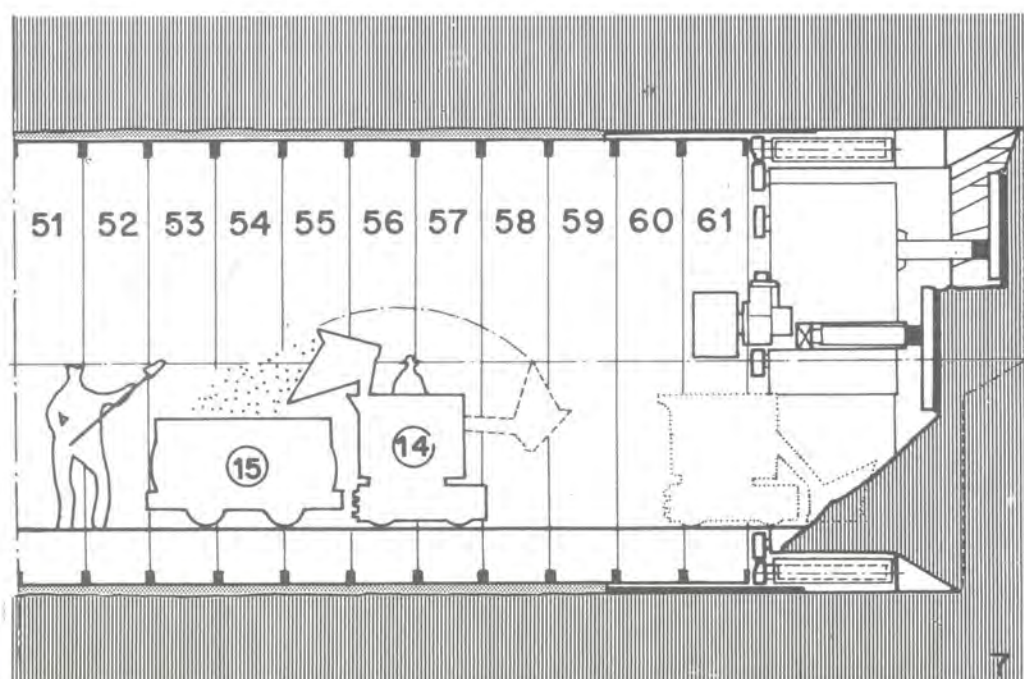
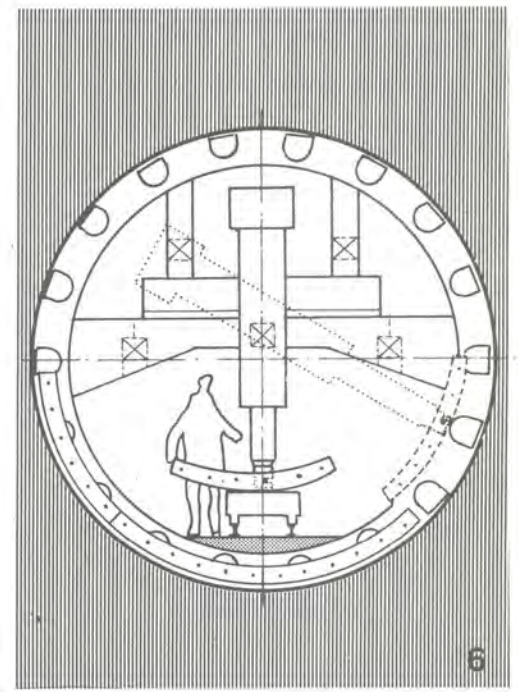
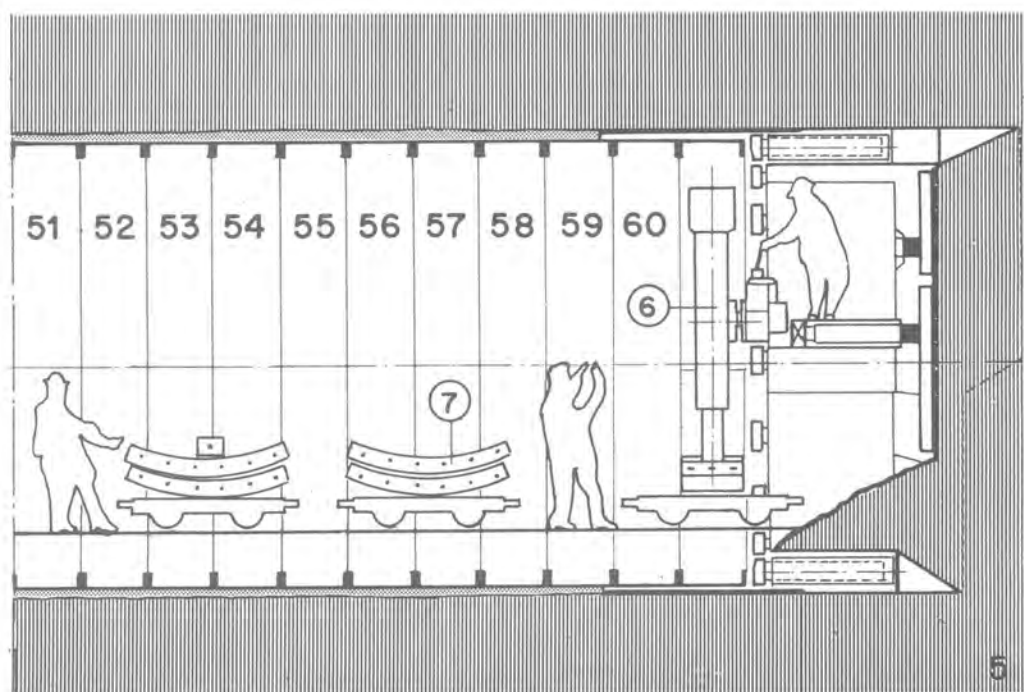
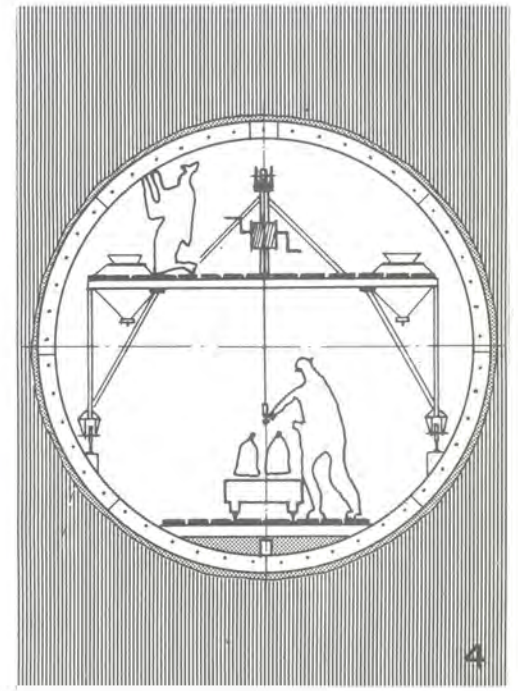
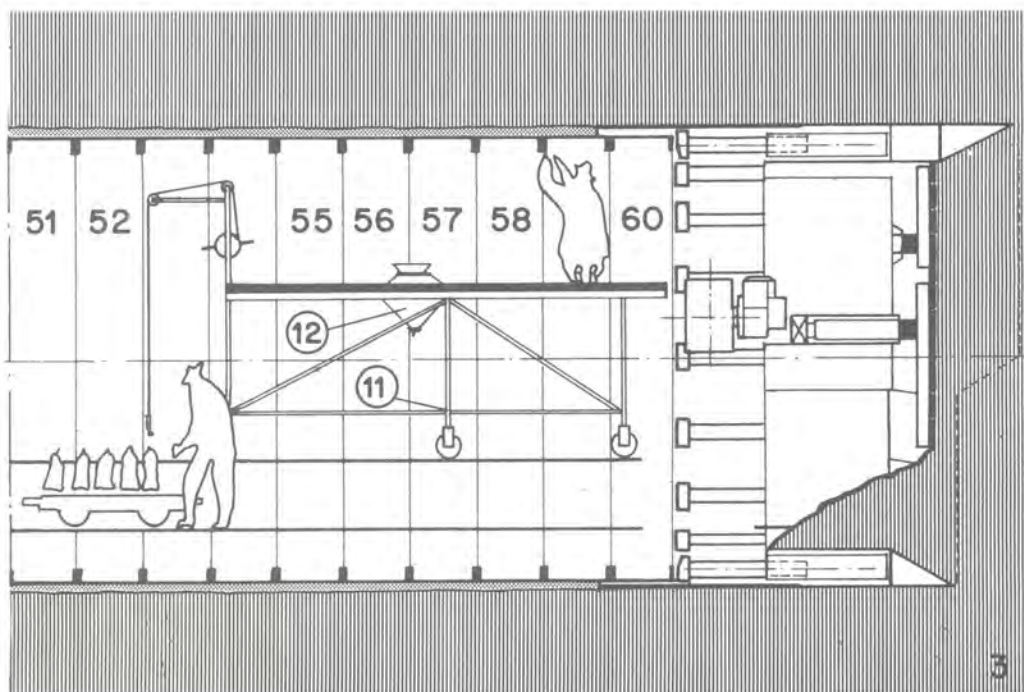
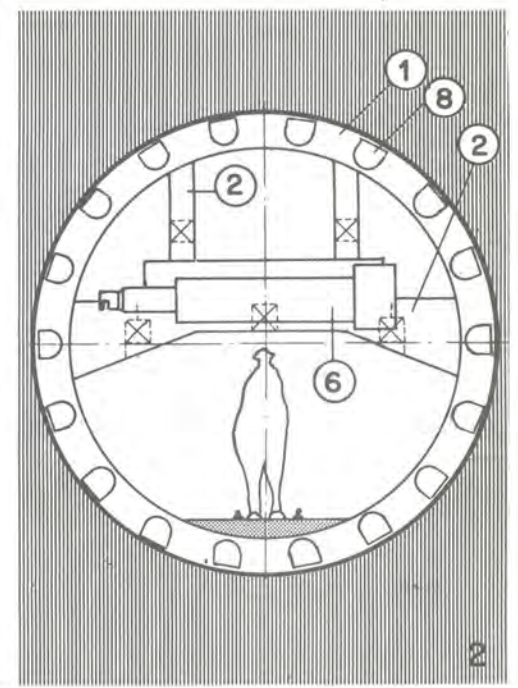


Fig. 16.8
Execução de túnel pelo método em
couraça ("shield")

- 1+2 Comêço do avanço da couraça
- 3+4 Aparafusamento dos segmentos do anel
- 5+6 Colocação dos segmentos do anel
- 7+8 Escavação

Este anel tem, em um túnel de via singela, uma espessura de 70 mm. Em túneis de diâmetro externo de 6,15 m o volume desse anel por metro linear é de 1,34 m³.

Nos túneis de via dupla do Metrô de Paris, que tem um diâmetro de 10,00 m, a espessura do anel é em média de 120 mm (conforme descrição da firma Robbins), tendo portanto um volume de 3,82 m³ por metro linear de túnel.

Para se evitar os assentamentos, este espaço é preenchido com argamassa, mas em terrenos de fraca coesão como por exemplo cascalho, nem sempre se pode preenchê-lo completamente, pois sempre cai material solto, principalmente na parte superior. A experiência mostra que os assentamentos provocados por estas razões são de menor intensidade em túneis de via singela. Em terrenos de maior coesão o perigo de assentamento é menor, pois o vão permanece aberto por mais tempo, o que permite uma boa injeção de argamassa.

Na suposição de que a profundidade da cobertura de um túnel de via singela seja de 10 m, em nível dos trilhos — a profundidade seria de apenas 6,50 m. Esta diminuição de 3,50 m na espessura do recobrimento poderia trazer consequências desfavoráveis no caso do topo do túnel se aproximar demasiadamente de fundação ou pontas de estacas. Além disso, o túnel de via singela permite maior liberdade de traçado, principalmente na ligação de estações e desvios. Pode-se ainda imaginar que no caso de o traçado acompanhar duas ruas muito estreitas que correm paralelamente seria mais lógico

instalar uma via singela abaixo do eixo longitudinal de cada uma das ruas, ao invés de um túnel único que pudesse se aproximar demais das fundações das construções laterais.

Todos os argumentos acima mencionados e o fato de que o custo de execução de dois túneis de via singela, é sempre sensivelmente menor do que um de via dupla, devem ter contribuído para que em quase todo o mundo os túneis construídos pelo método da couraça sejam de vias singelas. Somente o Express-Metrô de Paris constitui exceção. Ali toda a rede de metrô foi construída pelo método de couraça em túneis de via dupla, inclusive na passagem sob o rio Sena.

O trecho da Place de l'Etoile até Neuilly tem um comprimento de 2,7 km, não tem estação, corre em linha reta e não passa sob nenhuma construção. É portanto ideal para a construção de um túnel de duas vias pelo método da couraça, já que parte das desvantagens acima mencionadas neste tipo de construção ficam excluídas.

Distâncias entre os túneis

Na definição do traçado das linhas surge a pergunta, até que distância túneis de via singela se podem aproximar?

Baseado em experiências podem ser dadas as seguintes sugestões:

A distância entre dois túneis que correm paralelamente deveria ser igual ao diâmetro D do túnel. Neste caso um túnel pode ser estudado do ponto de vista estático, sem considerar o vizinho. Caso as

necessidades locais o exigirem, se pode reduzir esta distância D para 1/2 D ou até menos, tratando-se de trechos de túneis normais ou estações. Neste caso então, será necessário calcular estáticamente o revestimento a ser usado, considerando a influência de um sobre o outro. Para este caso, ou casos onde possam surgir esforços suplementares, será necessário especificar o revestimento por cálculos estáticos e introduzir escoramentos ou ancoragens durante a execução das obras.

Espessura da cobertura e providências contra assentamentos

Outro problema importante é a espessura de cobertura de solo nos túneis, principalmente na passagem sob obras de arte, casas ou outros túneis.

Uma pequena altura de cobertura, que seja menor que o diâmetro da couraça, traz consigo o perigo dos assentamentos. Este porém se torna de menor importância quando se consegue:

- preencher o vão que se forma em redor do revestimento do túnel provocado pela passagem da couraça com massas de composição consistente;
- evitar desmoronamentos na frente de trabalho, seja de escavação manual, seja mecanizado;
- manter a deformação produzida pelas cargas verticais dentro dos limites permitidos.

A espessura do vão em forma de anel que a couraça deixa para trás na sua passagem, é resultante da espessura

da chapa da parte posterior da couraça, que numa couraça com diâmetro de 6,00 a 6,70 m é de 40 mm aproximadamente — e do assim chamado jogo entre o lado interno da parte posterior da couraça e lado externo do revestimento do túnel — aproximadamente 30 mm.

Este jogo é necessário para facilitar o avanço da couraça em curvas e desviá-lo da linha reta rígida formada pelos cilindros do túnel. Este vão não apresenta uma espessura constante no seu corte transversal.

Um dos cuidados primordiais na execução pelo método da couraça é justamente extinguir os efeitos deste fenômeno, o que se consegue mediante preenchimento do vão com massa de baixo índice de retração, como, por exemplo, argamassa misturada com cal, betume ou bentonita, logo após ao avanço da couraça.

Com o preenchimento do vão consegue-se que os assentamentos que existiriam no solo, causados pelo avanço da couraça, sejam equilibrados e que as condições do cálculo estático do revestimento sejam preenchidas. Evita-se, pois, uma deformação do túnel causada por cargas verticais, deformação esta que ultrapassaria os limites estabelecidos nos cálculos e que nos métodos de couraça, onde se usa ar comprimido, seja reduzido o vazamento do mesmo pelas frestas dos anéis.

É aconselhável, de tempos em tempos, para melhorar a atuação do preenchimento primitivo, aplicar sob pressão por detrás da carcassa, outras injeções, como, por exemplo, nata de cimento.

Para evitar assentamentos na frente de trabalho, onde as condições hidrogeológicas são de suma importância, várias providências precisam ser tomadas. Sabe-se que a altura da frente de trabalho alcança de 6,00 a 6,60 m. A escala de coesão do solo varia de fraca até altamente estável, sendo de notar que, no sub-solo de São Paulo, se pode encontrar na frente de trabalho camadas de solo dos mais diversos índices de coesão.

Em couraças abertas, nas quais o terreno é escavado manualmente, a frente de trabalho terá que ser escorada, tanto em zonas de cascalho, areia grossa, média e fina, como em solos coesivos. Este escoramento também terá que ser apoiado na armação da couraça durante o avanço da mesma. Isto só é possível com a intercalação de macacos hidráulicos, chamados macacos hidráulicos frontais, que são encolhidos na medida em que a couraça avança por meio dos macacos hidráulicos de avanço.

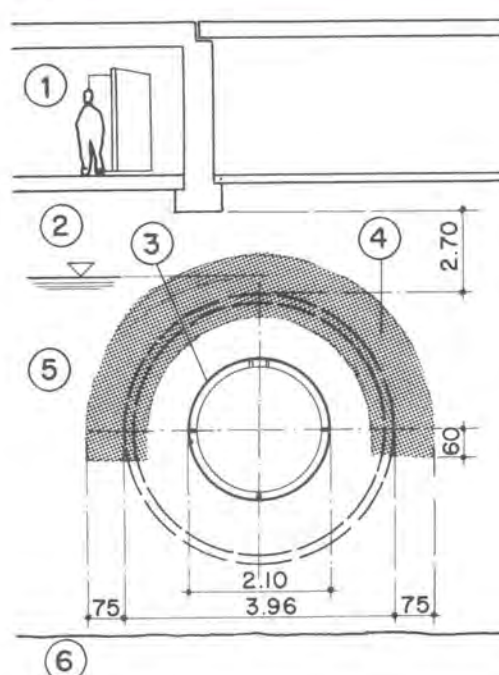
Nos sistemas mecanizados ou semi-mecanizados, valem as mesmas hipóteses.

Para manter as deformações dos anéis do túnel, produzidas por cargas verticais dentro dos limites previstos, cumpre ter em vista as seguintes considerações:

Conforme acima citado, os anéis de revestimento do túnel são montados sob a proteção da parte posterior da couraça. Como neste estado precisam suportar somente o próprio peso, formam praticamente um círculo perfeito. Porém, com o avanço da couraça, passam a sofrer as influências das cargas externas, isto é, pressão do solo e pressão da



16.9



16.10

Passagem debaixo de um banco com ar comprimido

- Cofre forte
- Lençol d'água
- + 4 Solidificação química a partir da galeria preliminar
- Pedregulho
- Argila

Fig. 16.10
Passagem debaixo de um banco com ar comprimido

água, onde principalmente a carga vertical mais se faz sentir. O resultado é que a seção transversal e circular tende a assumir a forma elíptica pelo rebaixamento do topo e alargamento lateral. Esta deformação é sustada, ou melhor, é mantida nos limites permitidos, quando o vão, acima citado, estiver bem preenchido, pois em conjunto com as diversas camadas do solo forma-se uma reação transversal. Nunca se pode evitar, entretanto, uma deformação milimétrica da parte superior. O vulto das deformações também depende do tipo do revestimento.

Com o aumento da altura de recobrimento diminuem os perigos, pois caso ocorram assentamentos na superfície, serão distribuídos sobre áreas maiores.

Pontos críticos devido à reduzida espessura de recobrimento

Quando o gradiente obriga a existência de reduzidas alturas de cobertura, surgem os assim chamados pontos críticos. A solução técnica destes pontos críticos requer providências especiais. Estas providências consistem de uma consolidação, adaptada às características do solo, feita por cima do túnel aproximadamente até à linha média da altura do túnel e tem duas finalidades.

Uma, que é servir à segurança da obra, e outra que é propiciar uma sustentação duradoura da sobrecarga ou, em outras palavras: devem facilitar, durante o avanço da escavação, o completo preenchimento do vão e assim formar uma abóbada no terreno, que descarrega lateralmente uma parte da carga que atuava sobre o túnel e desta maneira o alivia.

Os métodos a serem empregados dependem muito das condições hidrogeológicas.

Assim aconteceu em Londres na passagem por baixo do porão onde se situava a caixa forte de um banco (Fig. 16.10). A profundidade de cobertura é somente de 2,70 m, entre o topo do túnel e as bases inferiores das fundações do prédio do banco. Os assentamentos do solo tinham que ser evitados de qualquer maneira, pois a mínima deformação na construção iria provocar o emperramento da porta da caixa forte que tinha uma ajustagem milimétrica. A formação do sub-solo é de cascalho e o nível freático situa-se acima do topo do túnel. A escavação pelo método da couraça tinha então que ser executada com o auxílio do ar comprimido. O solo foi consolidado através de pequena galeria que era aberta antes do túnel à medida que este avançava. Como se tratasse de cascalho, foi usado o método Joosten (consolidação química). Esta providência evitou o desmoronamento antecipado do cascalho no vão formado, tanto pela couraça da escavação, como da definitiva, permitindo desta maneira o preenchimento total do mesmo com material adequado.

Com estas medidas estava garantido um avanço sem perigo de recalques. Além disso, conseguiu-se uma diminuição das cargas que agiam sobre o túnel pela formação de uma abóbada de sustentação, evitando assim a deformação do mesmo, isto é, o rebaixamento do topo apresentou dimensões insignificantes.

Em São Paulo, porém, para pequenas espessuras de cobertura, em relação a passagens sob ou paralelas a obras

de arte, e às condições do sub-solo conforme resultados das sondagens realizadas, não haverá necessidade de aplicação dos métodos acima mencionados, ou se necessário, só em pouquíssimas exceções.

Enquanto que em passagens sob fundações planas e principalmente de sapata corrida onde não se tomam providências especiais, dever-se-ia manter uma espessura de cobertura de, no mínimo, igual ao $D =$ diâmetro do túnel. Pode reduzir-se a espessura nos casos de passagem sob fundações de estacas flutuantes, principalmente de estacas do tipo Franki, sem maiores problemas até $2/3$ do diâmetro do túnel, pois estas estacas, em conjunto, formam com o solo envolvente um bloco uniforme que tende menos aos assentamentos que a fundação plana acima mencionada. Condição primordial, porém, é que se preencha o espaço vazio logo atrás da couraça, completa e imediatamente, como anteriormente já foi explicado.

Congelamento

Certos tipos de solo, como os siltes, requerem muito tempo para serem drenados, tanto por rebaixamento do lençol freático como por ar comprimido. Mantém uma consistência pastosa. Seria necessário provar se as camadas existentes nas sondagens SS e SCN 11, as quais poderiam ser especificadas como mole e muito mole, respectivamente, fazem parte desta categoria de solos. Trechos nos quais se apresentem tais solos só poderão ser vencidos mediante o método de congelamento. Quando estes siltes são encontrados, é necessário interromper o avanço da couraça. Este deverá ser bloqueado por meio de uma comporta e o trecho a ser escavado será congelado através desta comporta.

16.2.2.2. Avanço em zonas de água subterrânea

Quando escavações pelo método da couraça forem empreendidas abaixo do nível freático, deverão ser adotados certos procedimentos para o afastamento das águas. Existem duas maneiras:

o rebaixamento do lençol freático

o emprêgo de processos pneumáticos.

Além disso, existem duas maneiras de combinar estes sistemas, como, por exemplo, o método de ar comprimido conjugado com o rebaixamento do nível da água, ou o emprêgo de ar comprimido só na couraça, mantendo no túnel pressão atmosférica normal. Estes sistemas de eliminação da água necessitam de serviço contínuo. Na interrupção do serviço a água penetrará na couraça e no túnel, trazendo consigo o solo. As consequências serão grandes assentamentos e desnivelamento na área de cobertura do túnel que, em algumas circunstâncias, pode chegar até a formação de crateras na superfície.

Escavação pelo método de couraça com rebaixamento do lençol freático

Se o lençol freático descer pelo menos 70 cm abaixo do nível inferior da couraça, nada se modificará no método já descrito no capítulo 16.2.1., para a execução pelo método da couraça em terrenos secos. Por método de execução se entende: avanço da couraça, escavação e transporte do solo, montagem dos anéis de revestimento do túnel, preenchimento do vão externo que

acompanha os anéis e preenchimento das frestas entre os anéis.

Entretanto, o sistema com rebaixamento do lençol freático apresenta algumas particularidades que serão descritas adiante.

Rebaixamento do nível freático

O sucesso deste método depende consideravelmente da composição e natureza das camadas da superfície até 10 m abaixo do nível inferior do túnel, ou, em outras palavras, o rebaixamento de lençóis freáticos principalmente em solos de diversas camadas, pode oferecer dificuldades. Os custos porém não são elevados. Em São Paulo, solos de areia fina e silte, se alternam com camadas de solos de material de boa coesão e impermeabilidade.

Estes solos não são favoráveis para o rebaixamento do lençol freático. Em Hamburgo, onde existem condições semelhantes, conseguiu-se adotar este método com êxito para execução de construções a céu aberto e alguns trechos em túnel de couraça. Ali foram perfurados entre os dois túneis, poços de drenagem a 20 m de distância um do outro e indo de 6 a 10 m abaixo do nível inferior do túnel.

Os poços são perfurados com um diâmetro de 600 mm e equipados com filtros de 300 mm de diâmetro em todo o comprimento. O vão livre que resta é preenchido com cascalho filtrante de 1 a 2 mm. As bombas submersas têm um diâmetro de 150 mm e bombeiam até 930 m³/h de água com motores elétricos de 30 C. V.

Devido à composição de areia fina do solo de São Paulo um rebaixamento do lençol freático só com poços filtrantes será de resultado duvidoso.

Camadas de solo cujo valor k está entre 10^{-3} e 10^{-5} cm/s só podem ser drenados por instalações a vácuo, pois a água contida nos mesmos não pode ser retirada por simples gravidade.

Nestes poços de formas tubulares é produzido um vácuo de 0,7 a 0,9 kg/cm², que oferece uma sobrepressão na água nos póros do solo, de tal maneira que a água se separa dos grãos de areia e escorre para os poços. O alcance destes poços a vácuo é porém restrito. Alcançaram com os filtros de 50 mm de espessura, no assim chamado sistema "well point", no máximo 1,00 a 1,50 m e com o uso de filtros de 300 mm um pouco mais. No método da couraça, em contraposição ao de céu aberto, só é necessário colocar as bombas a vácuo nas áreas da frente de trabalho.

Ainda existe um outro sistema, que se poderia acrescentar ao rebaixamento do lençol freático. Encontrando-se um lençol freático na altura da frente de trabalho, rebaixá-lo por meio de lanças a vácuo, que são adaptadas na couraça por dentro do túnel. Estas lanças têm um diâmetro de 50 mm, acompanham o avanço e são introduzidas na frente de trabalho. Só podem ser usadas naturalmente em couraças abertas e não nas mecanizadas. Todas estas instalações de bombeamento necessitam, para a certeza de um trabalho sem interrupções, de uma rede elétrica de emergência para casos de falhas no fornecimento de energia elétrica.

Recalques resultantes do rebaixamento do lençol freático

Um detalhe importante, no caso do controle de água com auxílio do

rebaixamento do lençol freático ou pelo sistema de ar comprimido a ser observado, são os eventuais recalques que possam surgir, o que, como antes já foi mencionado, é de vital importância nos grandes centros urbanos.

No rebaixamento do nível freático, em zonas de areia grossa ou média, praticamente, não há o perigo de recalques, pois os mesmos são evitados pela firme estrutura das areias. Em areias finas, entretanto, e em terrenos argilosos esta estrutura não existe e portanto há o perigo de recalques nestas zonas. Testes rigorosos são necessários para se verificar, se e até que ponto uma ação destes recalques pode influenciar fundações flutuantes.

Método da couraça com ar comprimido

O método de ar comprimido tem mais de cem anos e servia antigamente para o afundamento de caixões pneumáticos abaixo do lençol freático, ou seja, era usado no avanço vertical e também nas construções de túneis sob a água ou ainda no avanço de túneis em linha horizontal ou em declive.

Nos túneis, a determinação da pressão é motivada por diversas circunstâncias. Pode variar entre a pressão máxima que corresponde à altura hidrostática entre o nível da água e a base inferior do túnel, e alturas hidrostáticas menores situadas entre a base e o topo da frente de trabalho do túnel.

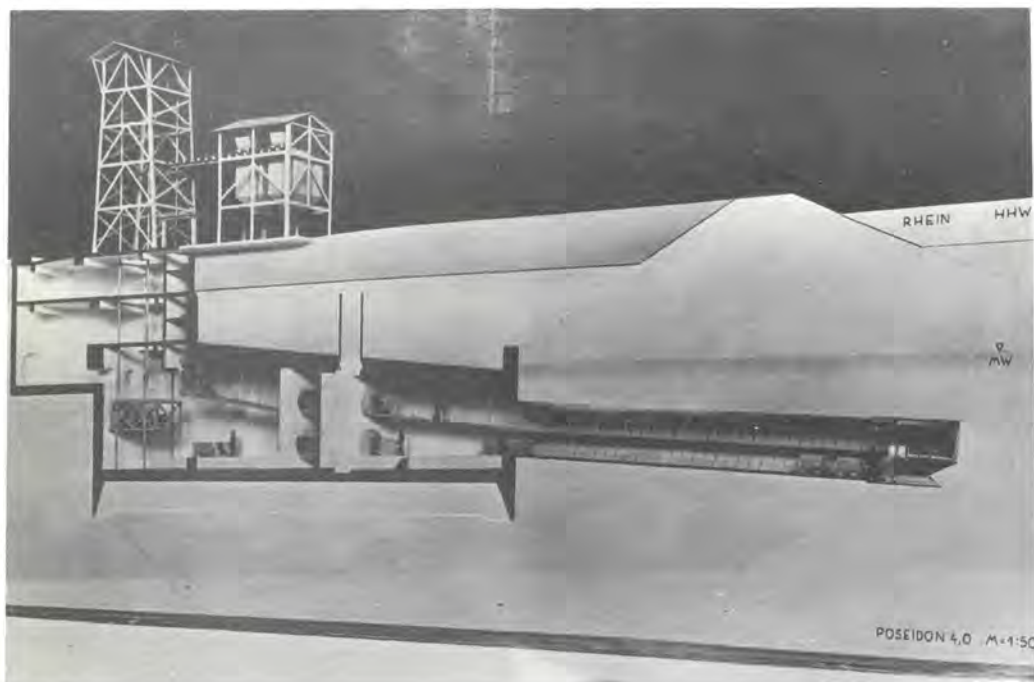
Tanto nos caixões pneumáticos como nos túneis, devido à permeabilidade dos locais de trabalho, a sobrepressão precisa ser mantida por fornecimento de ar comprimido, no qual a altura hidrostática pode ser mantida de acordo com a profundidade da obra. A possibilidade do emprêgo do sistema de ar comprimido é bastante flexível. Sua utilização ainda será possível quando o rebaixamento do lençol freático, mesmo com bombas a vácuo, não é suficiente, ou seja, na drenagem da frente de trabalho ou, pelo menos, dos dois terços superiores da mesma.

Este sistema é também menos sensível às variações de solo em camadas consecutivas. Com o emprêgo destas técnicas consegue-se, nas condições adversas do solo que se apresentam em São Paulo, elevado fator de segurança no trabalho.

Poços de partida e chegada

Sempre que os poços de partida e chegada dos túneis se encontrarem nas áreas de estações, dever-se-ia aproveitar a vantagem de uma possível existência do rebaixamento do lençol freático. Aproveitando-se um rebaixamento do lençol freático, a instalação das comportas de ar comprimido no início dos túneis, evita despesas de montagem e desmontagem de câmaras especiais de compressão (Fig. 16.11).

Se, entretanto, for necessário executar sob pressão o início e o término da escavação do túnel, serão necessárias câmaras de pressão resistentes e bem vedadas nos poços, as quais não só precisam conter a couraça, assim como a conexão com as câmaras de ar comprimido. Esta câmara de pressão precisa ter o teto e as paredes de concreto armado as quais, em geral, são demolidas posteriormente, pois raramente será possível adaptá-las, de início, às plantas e seções transversais das estações.



16.11

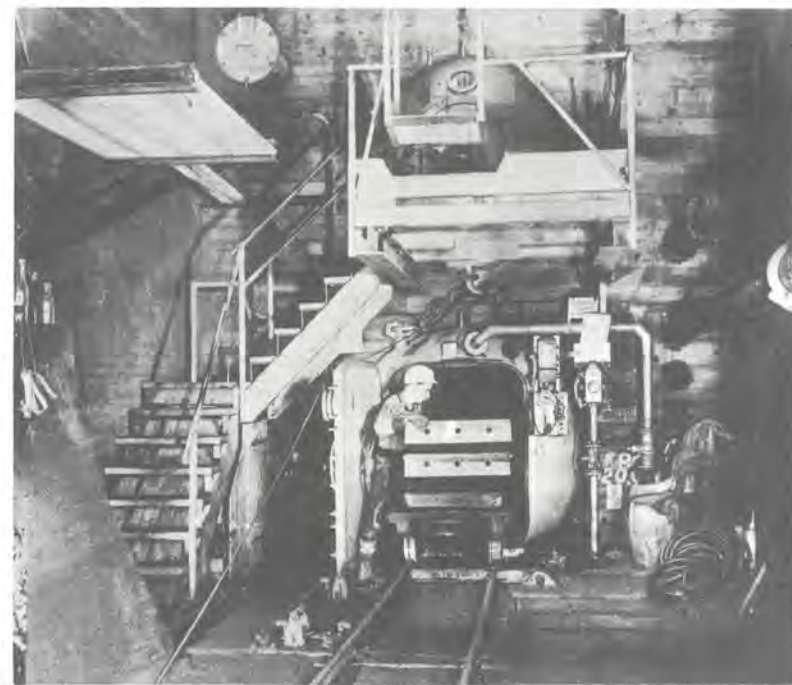
Fig. 16.11
Poço para início de operação da couraça sob ar comprimido (modelo "Rheintunnel, Duesseldorf")

Fig. 16.12
Vista interior de uma casa de compressores, a esquerda de 1.º estágio (baixa pressão), a direita de 2.º estágio (alta pressão) e equipamento de reserva

Fig. 16.13
Eclusas de ar comprimido na parede de concreto armado do poço de partida, em cima para pessoas, em baixo para materiais



16.12



16.13

O mesmo se dá com os poços de chegada, quando a couraça tiver que funcionar sob pressão. Precisam ser equipados da mesma forma com uma câmara de pressão de concreto. As dimensões deste poço, entretanto, podem ser menores, devido à ausência das instalações, eclusas e equipamentos de extração de material escavado e alimentação de concreto. Após a entrada da couraça na câmara de pressão e a execução da ligação hermética do túnel às paredes externas dos poços de partida e chegada, terá que ser necessariamente demolido o teto para retirada da couraça e seu reaproveitamento nas sucessivas seções de escavação.

Instruções para o uso de ar comprimido

Em muitos países, o trabalho executado sob ar comprimido é regulamentado por leis que se referem em geral ao controle do estado de saúde, do tempo de trabalho e de tempo de descanso dos operários especializados, bem como às normas para compressão e descompressão das câmaras de acesso aos recintos de trabalho.

Estação de compressores

Montagem e desmontagem, manutenção e operação de estações compressoras serão necessários para o fornecimento de ar comprimido durante dias seguidos. Este será produzido por um número suficiente de compressores de baixa pressão, para a ventilação no túnel e compressores de alta pressão (até 9 atm) para o acionamento de ferramentas pneumáticas, assim como o preenchimento do vão externo aos anéis do túnel com argamassa. Todas

as máquinas serão alimentadas pela rede urbana de energia elétrica, que deverá assegurar o funcionamento constante do sistema (Fig. 16.12).

Para o caso da falha desta fonte, deverá ser prevista uma outra fonte, de emergência, acionada por motores Diesel ou ainda uma outra, independente da rede normal, ou ambas, em conjunto, que imediatamente possam fornecer energia pelo menos para os compressores de baixa pressão, para as bombas de refrigeração e para a iluminação.

Para a instalação do sistema de ar comprimido são necessários reservatórios de ar, eliminadores de óleo e água, tubulações, comportas e acessórios.

Comportas para ar comprimido

As comportas servem para manter a diferença de pressão entre a atmosfera interna e externa do túnel, bem como para a introdução do material de construção no túnel, por exemplo, segmentos de anéis e retiradas em vagonetas do material escavado.

As comportas deverão ter dimensões suficientes para permitir a passagem das locomotivas movidas a bateria, pois no túnel sob pressão não é possível trabalhar com máquinas Diesel. Outras comportas, geralmente denominadas "campânulas", destinam-se a passagem de pessoas, nos dois sentidos e têm dimensões suficientes para permitir a entrada e saída de toda uma equipe de uma só vez. Esses aparelhos são construídos, essencialmente, por uma câmara, munida de duas portas estanques, uma em comunicação com o meio exterior e a outra com a zona de trabalho,

dentro da qual se processa, lentamente, a compressão ou descompressão indispensável à adaptação progressiva dos operários, (Fig. 16.13). Caso a pressão do ar atinja 1,3 atm deverão ser instaladas, nas proximidades da obra e fora do túnel, campânulas especiais funcionando como ambulatório para prevenção de possíveis acidentes que possam ocorrer em trabalho neste ambiente e, principalmente durante a operação de entrada e saída do pessoal.

Processo para diminuição da pressão

Em pressões de 2,0 atm ou mais (em geral só se permitem pressões até 3,0 atm) ou seja, em profundidade em que o nível inferior do túnel chega a 20 m ou mais abaixo do nível freático, o avanço da couraça sob ar comprimido é encarecido pelo maior tempo exigido para saída e entrada do pessoal nas câmaras de trabalho, pelos acréscimos de taxas nos salários, e também pelo aumento do número de doenças causadas pelas pressões elevadas.

Para equilibrar estas desvantagens, estão os técnicos, há algum tempo, tentando elaborar um sistema que permita reduzir estas pressões impostas pelas exigências hidrostáticas acima mencionadas, a um máximo, por exemplo, de 1 atm.

Uma possibilidade seria, a de vedar a parte dianteira da couraça por um anteparo com comporta e assim manter a pressão hidrostática necessária somente entre a frente de trabalho e a couraça. No túnel e na parte posterior da couraça, onde se instalam os anéis, o trabalho seria executado à pressão normal.

Outra solução seria tratar o sub-solo com produtos químicos e materiais sintéticos, impermeabilizando-o de tal maneira que o consumo de ar e também a pressão nas câmaras de trabalho possam ser suficientemente reduzidas. Assim foi executado com sucesso o novo Blackwall-Tunnel de Londres.

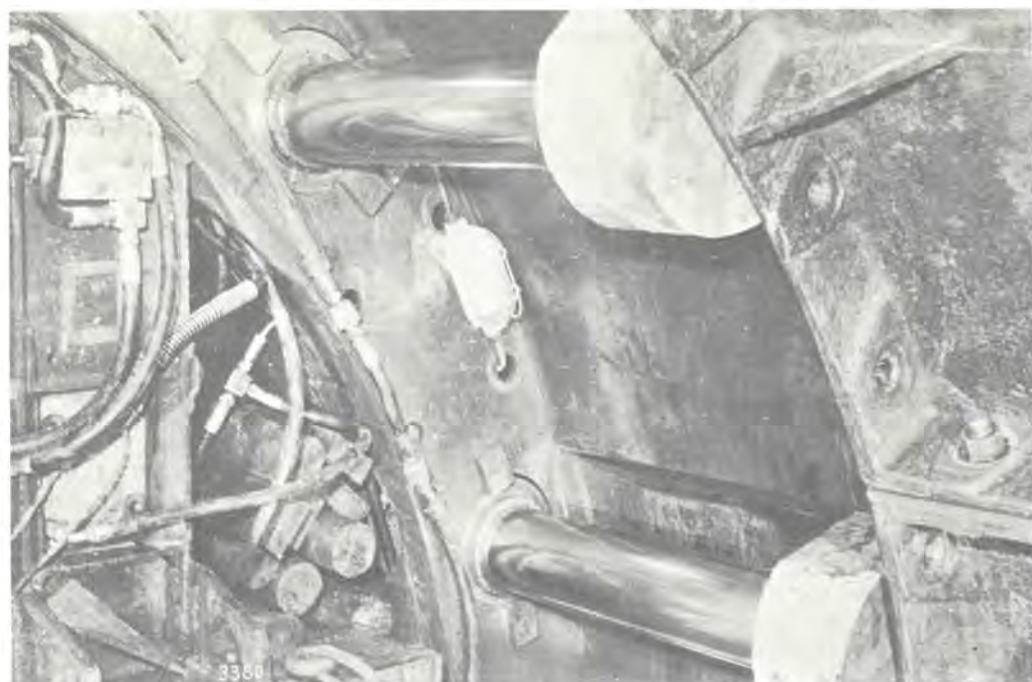
Mais um sistema de solução relativamente positiva para a diminuição da pressão, consiste numa combinação do sistema de ar comprimido com um rebaixamento parcial do lençol freático.

Assim, por exemplo, num túnel onde a altura hidrostática normal é de 25 m, um rebaixamento do lençol freático de 10 m permitiria uma diminuição da pressão de 2,5 atm para 1,5 atm. Isto já traria consigo grandes economias ao sistema de avanço da couraça com ar comprimido e diminuiria bastante o perigo dos acidentes por ele provocados.

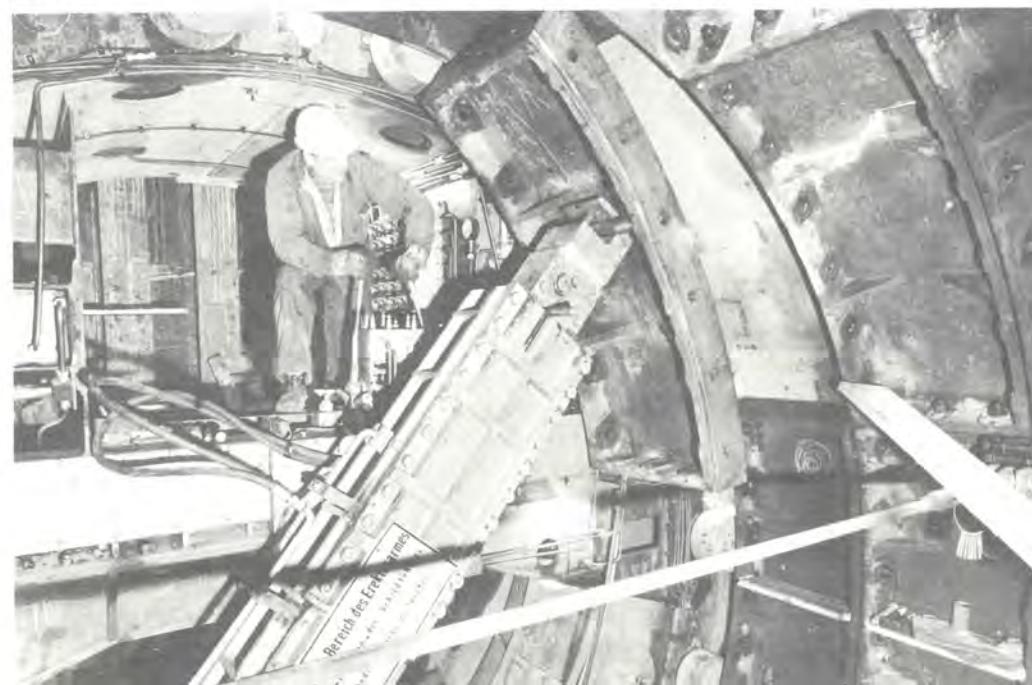
16.2.3 Descrição geral da construção pelo método da couraça

16.2.3.1 Couraça com escavação manual ou couraça aberta

O primeiro e mais ousado iniciador da escavação pelo método da couraça, foi Brunel, nascido na França no ano de 1769. Projetou em 1818, uma couraça para executar uma passagem sob o Tâmesa em Londres. A seção transversal da couraça, bem como a do túnel, eram retangulares. O verdadeiro predecessor da couraça moderna, porém, foi o método projetado e realizado por J. H. Greathead, para um túnel para



16.14



16.15

pedestres construído sob o Tâmbora em 1869. A seção transversal era circular, e o túnel tinha um diâmetro externo de 2,18 m.

A primeira obra pelo método da couraça combinado com o processo de ar comprimido foi executada em Londres, no ano de 1886.

Enquanto isso, a couraça aberta, ou couraça com escavação manual, foi utilizada e comprovada muitas vezes. Sua maior vantagem em confronto com as couraças parcial ou totalmente mecanizadas é a de poder ser utilizada na escavação de, praticamente, qualquer tipo e camada de terra mesmo quando a parte inferior do solo a ser escavado consistir de rocha ou contiver blocos erráticos. Outras vantagens são ainda o péso reduzido, o baixo preço, menores custos de montagem e desmontagem e menores riscos de acidentes.

Em contraposição a essas vantagens estão maiores custos de mão de obra devidos ao trabalho manual na escavação do solo e no escoramento da frente, bem como a maior lentidão no avanço.

Na maioria dos solos com pedregulho solto, a frente da escavação precisa ser escorada. Este escoramento consiste de pranchões de madeira dispostos horizontalmente, apoiados em vigas verticais. Essas vigas, ou armações, são sustentadas contra a estrutura de aço, que reforça a capa da couraça, através de macacos hidráulicos. As plataformas de trabalho dos mineiros estão presas às cabeças desses macacos. Muitas vezes é suficiente escorar apenas os dois terços superiores da frente a ser escavada, deixando cair o solo do

terço inferior segundo o seu ângulo de talude natural.

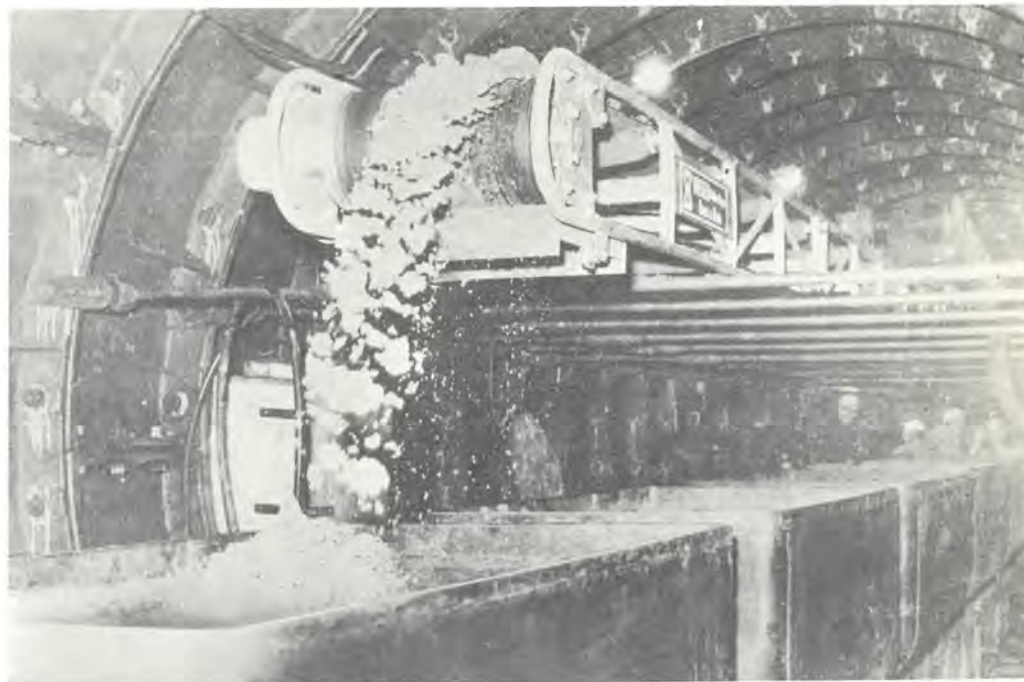
O solo é escavado pelos mineiros de cima para baixo, com ferramentas adequadas, na área correspondente ao anel de revestimento do túnel.

Os mineiros deixam cair o solo escavado numa esteira de transporte que sobe numa inclinação de 30° e que transfere material para uma esteira horizontal a qual o descarrega diretamente nas vagonetas de transporte.

Apesar desses gastos de mão de obra relativamente grandes e do pouco espaço disponível, foi possível atingir em Duesseldorf, na escavação em couraça com ar comprimido para um coletor de esgotos sob o Reno (diâmetro externo 3,80m), num trecho com segmentos de anel de ferro fundido de 583,50 m de comprimento, uma velocidade média de avanço de 8,00 m/dia, com produções máximas de até 10,50 m/dia.

As prensas hidráulicas para avanço da couraça têm seu apoio sempre no último anel de revestimento do túnel que ainda permanece dentro da cauda da couraça. (Fig. 16.14). Para permitir o avanço da couraça, esses macacos precisam superar a resistência das extremidades de corte da couraça, a resistência de atrito entre o solo e a couraça e finalmente a contra-pressão dos macacos frontais.

Os macacos de avanço servem também para a orientação da couraça no caso de desvio da linha reta, como, por exemplo, nos traçados em curva, nas variações de inclinação e no caso de desvio involuntário da couraça, ocasionados pela variação de



16.16

Fig. 16.14
Macacos de avanço, no canto barras de ferro de contrapêso ao movimento de "balanço" da couraça

Fig. 16.15
Eretor colocando segmentos do anel de ferro fundido

Fig. 16.16
Vagoneta e esteira rolante

resistência das camadas do sub-solo local. A capacidade das prensas depende da superfície da capa da couraça. Deverão ter no mínimo 100 t por metro linear de perímetro da couraça, devendo, além disso, ser adequadas às condições geológicas.

Em local da couraça, que proporciona uma boa visão, encontra-se a cabina de comando para o condutor da couraça, equipada com válvulas de controle individual para cada macaco hidráulico e alavancas de comando da máquina colocadora dos segmentos de anel.

As bombas para as instalações hidráulicas, tratando-se de couraças menores (menos de 5,00 m de diâmetro), são montadas quase sempre acima da superfície do terreno. Tratando-se de couraças maiores, são instaladas numa plataforma móvel junto à própria couraça.

Um outro elemento importante na construção em couraça é o eretor, ou braço de montagem, para a colocação dos segmentos do anel de revestimento do túnel (Fig. 16.16). Através dele os segmentos são montados na cauda da couraça, formando o anel de revestimento do túnel. A largura dos anéis varia entre 600 e 1 000 mm, medindo em regra 750, 800 ou 900 mm.

Na couraça aberta, ou de escavação manual, o eretor é quase sempre formado por um braço de montagem que gira em torno do eixo da couraça. O acionamento é hidráulico, e a capacidade de carga depende do péso dos segmentos de anel a serem colocados.

Logo atrás da couraça, ligado por correntes ou barras, acha-se um

andaime de serviço e transporte que se move sobre trilhos e serve para vários fins. Transporta o tambor da compressora para injeção de argamassa ou similar para o enchimento da junta do anel da couraça e a esteira transportadora para carregar as vagonetas com terra escavada; serve de apoio para esteira transportadora com inclinação de 30° e como plataforma de serviço para a montagem dos anéis, para o parafusamento dos segmentos de anel e para a vedação da junta acima mencionada.

O péso de uma couraça aberta, com um diâmetro externo de cerca de 6,00 m, é de aproximadamente 75 t.

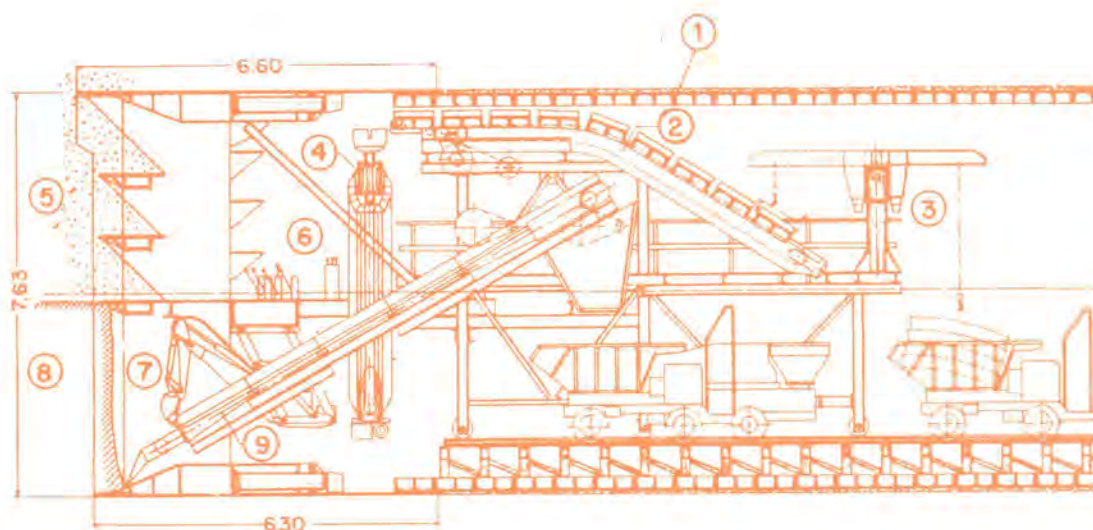
16.2.3.2. Couraças parcialmente mecanizadas

As couraças semi-mecanizadas contêm todos os elementos das couraças abertas já descritas. A diferença é que o trabalho manual é parcialmente substituído por máquinas. Os trabalhos mecânicos em questão, são a escavação, o carregamento e o transporte da terra escavada, bem como o escoramento frontal do solo a ser escavado no caso de terrenos pouco coesivos. A forma de execução é melhor descrita através de exemplos.

Na construção de uma passagem subterrânea para pedestres em Rendsburg, sob o canal que liga o Mar do Norte ao Mar Báltico, que media apenas 130 m, foi aplicada uma couraça comum aberta; porém, neste caso, a escavação não foi manual com transporte através de esteiras transportadoras, mas sim, com uma carregadora de caçamba sobre trilhos que fazia diretamente o

Courea semi-mecanizada Metrô de Hamburgo

- ① Injeção de argamassa
- ② Fita transportadora para segmentos
- ③ Grua
- ④ Erector de segmentos
- ⑤ Areia
- ⑥ Pôsto de comando
- ⑦ Escavadora hidráulica
- ⑧ Argila
- ⑨ Cadeia transportadora
- ⑫ Coureaça
- ⑬ Parede central
- ⑭ Plataforma de trabalho



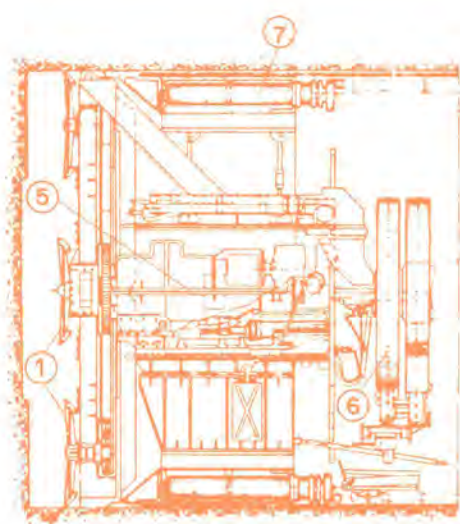
16. 17 Corte longitudinal pela estrutura da coureaça e colocação dos segmentos de ferro fundido



Corte pela coureaça

Coureaça com 6 discos fresadores

- ① Discos fresadores
- ② Engrenagem planetária
- ③ Roda guia
- ④ Balde
- ⑤ Eixo principal
- ⑥ Erector de segmentos
- ⑦ Prensa hidráulica



16. 18

carregamento das vagonetas. Em comprimentos maiores de túnel a carregadora de caçambas podia lançar a terra num pequeno silo, o qual descarregava sobre uma esteira transportadora que carregava as vagonetas. (Fig. 16.16). O sub-solo era tão firme que não exigiu escoramento.

Em Moscou, no ano de 1962, foi construída uma coureaça para escavação de um túnel de 4,10 m de diâmetro, em sub-solo não coesivo, como areia, etc. Em lugar do escoramento vertical normalmente necessário nesse tipo de sub-solo, foram distribuídas plataformas horizontais subdividindo a altura total da coureaça, nas quais a areia desliza segundo o seu ângulo de talude natural quando a coureaça avança. À medida que prossegue esse avanço, o solo escavado cai numa esteira transportadora ou em placas de deslizamento, que o desviam para a raspadeira transportadora. Esta última faz o transporte para uma esteira transportadora horizontal, que carrega as vagonetas.

Na construção dos dois túneis da estação do metrô sob a estação ferroviária principal de Hamburgo, a coureaça também foi provida de plataformas horizontais na parte superior do solo a ser escavado, consistente de areia, aproveitando-se o ângulo do talude natural, sendo que essas plataformas substituíam o escoramento vertical do solo (Fig. 16.17).

Na parte inferior, que era constituída de um solo resistente, a escavação era feita por escavadoras mecânicas. De tipo similar era o equipamento utilizado na construção do túnel Leste de Boston nos E.U.A. (maio de 1960). Ainda nesse caso tornou-se

necessário um grande dispêndio de mão de obra para levar o solo escavado até as duas esteiras transportadoras.

Para São Paulo provavelmente poderá ser realizada uma mecanização parcial.

Para tanto, de certo será necessário executar escoramento nas camadas arenosas do subsolo ou então, no mínimo, prever o equipamento para escoramento, como, por exemplo, prensas frontais.

As coureaças acima descritas, com as plataformas escalonadas para deslizamento de areia segundo os taludes naturais, provavelmente não poderão ser utilizadas. Para escavação de solos mais rígidos, poderão ser usadas escavadoras de colher como as de Hamburgo, caso a área de serviço não seja demasiadamente reduzida por prensas frontais ou plataformas de serviços eventualmente necessárias.

Em Detróit utilizou-se, na escavação de argila mole, plástica, porém homogênea, uma coureaça cuja frente era fechada por uma placa de aço. Essa placa era provida de duas janelas, que poderiam ser fechadas por ferrôlho. No avanço da coureaça pela largura de um anel de revestimento, as janelas eram abertas.

O solo mole e de alta plasticidade em parte era deslocado e em parte penetrava pelas janelas no interior da coureaça, sendo esta parte carregada e transportada para fora. Em São Paulo esse método não deverá ser utilizado, pois o deslocamento parcial do solo ocasionaria movimentações inadmissíveis dos terrenos adjacentes.

16.2.3.3. Coureaças totalmente mecanizadas

Trata-se de coureaças nas quais todos os trabalhos feitos manualmente nas coureaças abertas, são executadas por equipamento mecânico, tanto a escavação, como o carregamento, e em alguns casos também o transporte do solo. No entanto, a questão da sustentação frontal do sub-solo, onde esta se fizer necessária, constitui grande problema.

Enquanto as coureaças abertas servem para a escavação de todo tipo de pedregulho solto, podendo ser aplicadas também em camadas de rochas ou blocos erráticos existentes nesse terreno, o tipo de construção das coureaças semi-mecânicas, já depende mais ou menos da conformação geológica e hidrológica dos terrenos a serem escavados. Isto vale em extensão maior para as coureaças totalmente mecanizadas, conforme mostrarão os exemplos seguintes. Apesar, entretanto, das dificuldades de operação inerentes a esses equipamentos e do risco financeiro considerável de emprêgo das coureaças totalmente mecanizadas em virtude do seu custo relativamente elevado, e não obstante os vários fracassos, já verificados o desenvolvimento da técnica demonstra uma tendência cada vez maior para a mecanização total, também na construção de túneis.

Desenvolvimento histórico

Já no fim do século passado foram utilizados vários dispositivos na Inglaterra, para escavação mecânica do sub-solo, tendo-se levado em consideração as condições favoráveis do mesmo, que era composto de argila impermeável rígida.

A máquina escavadora Price-Excavator tem uma roda com seis raios providos de ferramentas cortantes, em forma de lâminas, ou de cinzeis.

O solo assim raspado cai no fundo da coureaça. Na extremidade de cada um dos seis braços acha-se uma caçamba de arrasto, que recolhe o solo escavado e o descarrega numa esteira transportadora.

Essa máquina foi utilizada pela primeira vez em Londres, no ano de 1897, provando sua eficiência não só na argila homogênea de Londres, como também nos solos mistos. Somente na década de 30 do século atual iria aparecer um novo tipo: — a coureaça com esfera de arrasto, de Hallinger. Nessa coureaça, a máquina escavadora consiste numa calota esférica, que preenche quase inteiramente a parte frontal da coureaça, provida de várias fileiras de lâminas e, atrás destas, de fendas para a penetração do solo escavado na coureaça. A calota esférica pode girar sobre um eixo horizontal. A frente da escavação é sustentada pela própria calota esférica.

O método aplicado por Price foi desenvolvido nas grandes construções de metrô da União Soviética, em Moscou, Leningrado e Kiev.

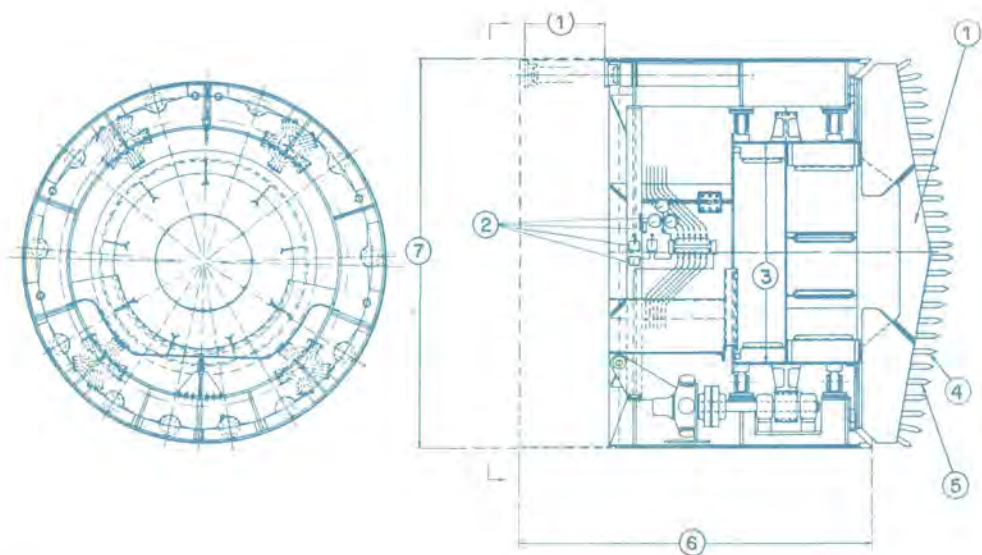
Partindo dos simples discos cortantes, os construtores soviéticos construíram máquinas mais complicadas para a escavação de solos mais rijos, com vários discos com fresas. Com a escavadeira de fresas de Moscou a terra é desagregada pelos dois discos de fresa postos em movimento rotativo através de uma engrenagem planetária. Uma draga raspadeira, com doze caçambas, descarrega o

Fig. 16.17
Couraça semi-mecanizada: Metrô de Hamburgo

Fig. 16.18
Couraça com 6 discos fresadores

Fig. 16.19
Couraça mecanizada (Drum Digger)

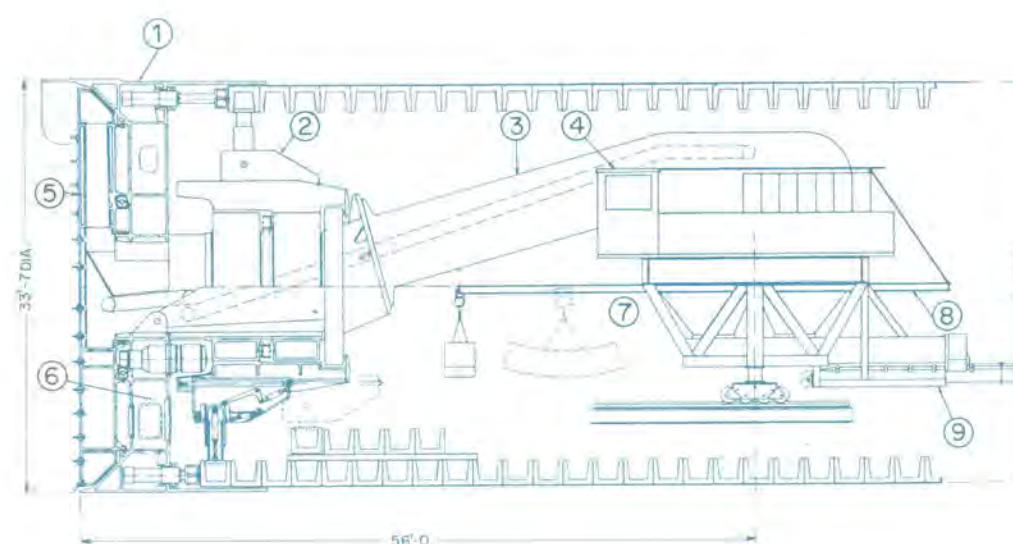
Fig. 16.20
Couraça mecanizada (Robbins)



Couraça mecanizada
Drum Digger

- ① Extensão da prensa
- ② Válvulas e manômetros
- ③ Diâmetro externo do cilindro
- ④ Dentes removíveis
- ⑤ Velocidade máxima = 5 revoluções por minuto
- ⑥ Comprimento total da couraça 3.594 mm
- ⑦ Diâmetro externo da couraça 3.988 mm

16.19



Corte longitudinal
Couraça mecanizada (Robbins)

- ① Couraça
- ② Erector de segmentos
- ③ Tubo de transporte
- ④ Cabine de operador
- ⑤ Roda fresadora
- ⑥ Eclusa de serviço
- ⑦ Silo
- ⑧ Monotrilho
- ⑨ Esteira transportadora

16.20

Corte longitudinal

solo escavado em um calha inclinada, que, partindo do topo da couraça, alimenta uma esteira transportadora. Dali o solo escavado desliza por uma outra calha inclinada para a esteira transportadora que carrega as vagonetas. A velocidade média de escavação é de 8,00 m/dia.

A máquina escavadora com discos de fresas, utilizada em Leningrado, funciona de maneira similar. Sobre a roda principal estão montados seis discos com fresas, sendo que essa roda central gira em torno do eixo principal 2,8 vezes por minuto, enquanto os discos de fresas concluem 19,5 rotações por minuto. O transporte da terra escavada é o mesmo que na máquina com dois discos de fresas. Os eretores estão montados sobre um eixo ôco, que permite transportar a terra escavada na parte central da couraça através dos suportes dos eretores. A velocidade média da escavação é de 8,00 m/dia.

Contrariamente às escavadeiras desenvolvidas na União Soviética (Fig. 16.18), na Europa Ocidental e na América do Norte se procura construir máquinas, mais simples e resistentes.

Tanto é que, mesmo para um túnel com 10,00 m de diâmetro, utiliza-se apenas uma roda cortante que cobre toda a seção transversal do túnel. Desta forma, excluem-se as engrenagens planetárias, indispensáveis ao acionamento dos vários discos de fresas, naturalmente sujeitos a grandes desgastes e falhas.

Há cerca de 10 anos foram construídas na Inglaterra as primeiras couraças totalmente mecanizadas. Foram projetadas essencialmente para a escavação em solos rígidos. O tipo

McAlpine sob muitos aspectos é parecido com o "Price-Excavator". A roda cortante provida de quatro braços e que cobre toda a seção transversal, é acionada através de motores hidráulicos. A escavadeira está firmemente ligada à couraça, impossibilitando que, simultaneamente com a escavação e o transporte de terra, com a couraça parada, seja feita a montagem do revestimento do túnel. A máquina provou ser adequada para o sub-solo de argila de Londres, tendo sido aplicada com êxito em Toronto, no Canadá, onde o terreno apresentava camadas mistas. Todavia, a condição prévia para um bom funcionamento é uma frente de escavação firme.

No início desta década foi projetado ainda na Inglaterra um outro tipo de escavadeira, destinada primeiramente para uma linha de metrô no sub-solo argiloso de Londres; esta máquina é o "drum-digger", ou seja, a escavadeira-tambor de Kinnear-Moodie (Fig. 16.19).

Essa escavadeira de tambor desagrega o solo por meio de seis braços providos de lâminas, que abrangem toda a área a ser escavada. A roda cortante, porém, não está situada no eixo principal, mas sim, está presa a um tambor disposto no centro.

O tambor ainda tem outra função, que é a de servir para o transporte da terra escavada. O material escavado desliza ao longo dos braços para o tambor e é transportado por meio de pás helicoidais semelhantes às de uma betoneira, para a extremidade oposta do tambor e é transportado por meio de esteira, para as vagonetas.

O "drum-digger" mostrou-se muito

apropriado para a escavação do subsolo homogêneo e livre de águas subterrâneas de Londres.

No início desta década foram desenvolvidas nos E.U.A., couraças totalmente mecanizadas, que apresentam grande progresso e detalhes interessantes. A firma Robbins, Seattle, construiu para o metrô expresso de Paris uma couraça totalmente mecanizada com um diâmetro externo de 10,28 m, para túnel de via dupla (Fig. 16.20).

Esta couraça totalmente mecanizada, que é a maior construída até hoje, possui igualmente apenas um disco cortante, cobrindo toda a área a ser escavada. Ele pode ser provido alternativamente, para escavação em rocha mole, (camadas de rochas calcárias, por exemplo) de rolos escarificadores, ou para terra solta, de cinzeiros ou lâminas. As bordas cortantes são protegidas por um frizo de aço tipo Wídia. O solo escavado solto é elevado por caçambas até o topo do túnel e cai sobre uma esteira principal. A couraça Robbins permite, outrossim, a escavação de túneis submersos, sem ser necessário colocar todo o corpo do túnel e o pessoal que nele trabalha sob ar pressurizado. Somente há sobrepressão na parte da frente da couraça, que é separada por anteparo impermeável ao ar, e no recobrimento da esteira transportadora principal, a qual por sua vez, termina em duas eclusas de material para a terra escavada. As câmaras sob ar comprimido podem ser alcançadas através de uma eclusa para pessoas. Todavia, esta é utilizada apenas temporariamente, para possibilitar verificações. O pessoal restante que trabalha no túnel encontra-se sob pressão normal.

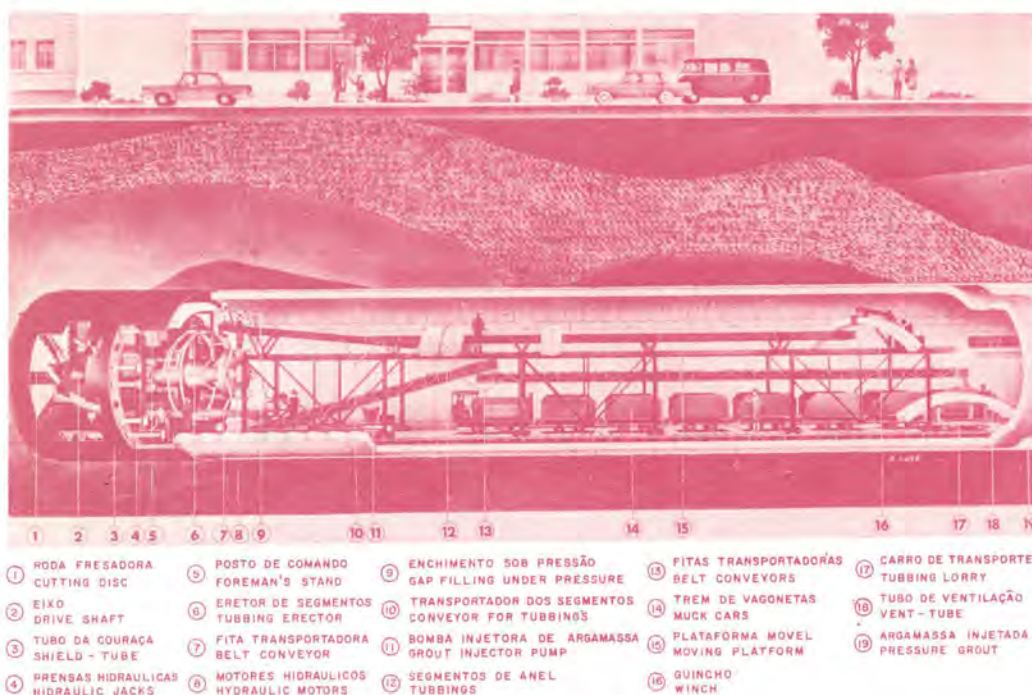
O fechamento impermeável à água da cauda da couraça em sua junção com o revestimento do túnel apresenta dificuldades. Na nova construção do metrô expresso de Paris foi ainda utilizada uma segunda couraça de cerca de 10,00 m de diâmetro, que pode ser considerada semi-mecanizada, na qual a parte da frente da couraça e a esteira transportadora encontram-se sob ar comprimido.

O único homem a trabalhar sob ar comprimido, é o condutor da escavadora. Os mineiros estavam distribuídos pela frente de trabalho em nove cabinas abertas atrás do anteparo e manejavam ferramentas com grandes articulações esféricas para escavar o solo.

Este tipo de escavação não deu resultado favorável. Desta forma, decidiu-se modificar radicalmente o método. Todas as camadas do sub-solo que consistem de areia fina com água subterrânea, foram enrijecidas quimicamente a partir da superfície. A partir de então, os nove mineiros trabalhavam na frente do anteparo, de aço, sob ar comprimido, no solo endurecido, com as ferramentas pneumáticas convencionais.

Na Alemanha foi planejada primeiramente em Hamburgo, e logo também em Munique, a execução de grandes trechos em túnel. Devido às condições geológicas e hidrológicas de ambas as cidades, as escavações só puderam ser feitas por couraças com ar comprimido e rebaixamento do lençol freático.

As duas primeiras couraças totalmente mecanizadas foram aplicadas em Hamburgo em duas



16.21

partes diferentes da obra. O sub-solo de Hamburgo pode ser comparado ao de São Paulo, pois é constituído de camadas irregulares, de espessura variada, arenosas e argilosas. As camadas arenosas contêm água subterrânea, apresentando, porém, menor índice de areias finas e muito finas do que as de São Paulo.

Num trecho com camadas essencialmente argilosas as instalações para a escavação foram feitas por uma firma inglesa, a Lilley. Todavia, não teve sucesso, e após inúmeras e demoradas tentativas a máquina foi reformada e transformada em couraça aberta com escavação manual.

A couraça mecanizada, aplicada em solos essencialmente arenosos, obteve melhores resultados. A máquina foi construída pela fábrica Bade & Co., em Lehrte. O diâmetro externo da couraça era de 5,58 m. O disco cortante, com oito braços providos de lâminas cobria a frente de trabalho. Entre os braços estavam dispostas placas de aço, que formavam uma frente de sustentação rotativa. O disco cortante não executava movimentos rotativos, mas oscilações de cerca de 50°. A terra escavada caía no fundo da couraça e era transportada para uma esteira, passando depois para a esteira transportadora principal, com a qual eram carregadas as vagonetas. Os dois braços para montagem dos segmentos do anel estavam dispostos num aro que cingia a esteira transportadora principal. Obtêve-se uma velocidade média de escavação de 8,00 m/dia.

O túnel foi revestido de anéis de ferro fundido. Em Munique foram escavados cerca de 1.920 m de túnel para um metrô, com uma máquina escavadora totalmente mecanizada, construída pela firma Calweld, Los Angeles, E.U.A., a qual, com auxílio de rebaixamento do lençol freático, obteve bons resultados, (Fig. 16.21). Atualmente está sendo executada mais uma escavação em Munique, com uma couraça Calweld similar, um pouco melhorada. A couraça tem um diâmetro de 6,82 m. Na primeira etapa dos trabalhos devem ser executados cerca de 1.660 m de túnel. As condições do sub-solo de Munique são mais favoráveis a uma couraça mecanizada do que as de Hamburgo, pois o sub-solo no qual é feita a escavação apresenta-se mais homogêneo. É constituído de sílex, um sedimento terciário, que pode ser comparado à argila mais ou menos arenosa, que se torna mais dura com a profundidade.

A roda cortante da máquina Calweld tem oito braços providos de

lâminas de corte, de metal duro. Os braços têm um corte transversal triangular cuja ponta se acha voltada para dentro. O solo escavado, deslizando ao longo desses braços, cai num funil coletor. O funil leva para uma esteira transportadora que transporta o material através de uma esteira inclinada para a esteira transportadora principal acima das vagonetas.

O eretor acionado hidráulicamente não é montado na couraça, mas no carro-reboque com andaimes, ligado à couraça. Para controle e acerto da direção e inclinação, isto é, para o comando da couraça, dispõe-se de um aparelho Laser.

A escavação é feita com auxílio de rebaixamento do lençol freático.

16.2.4. Construção do túnel executado pelo método da couraça e cálculo estático do mesmo

16.2.4.1. Cálculo estático de túneis construídos pelo método da couraça

Para a obtenção dos esforços no túnel devido às cargas externas, o túnel cilíndrico poderá ser considerado como um problema a duas dimensões. Em cada seção do referido túnel é estudado um anel de, por exemplo, 1 m de largura. Para efeito de cálculo, o anel cilíndrico poderá ser substituído por um polígono inscrito.

O túnel poderá ser construído com um revestimento simples ou duplo, sendo que, com o revestimento simples, este terá que suportar todas as cargas. Além disso, nos locais onde é exigida uma completa impermeabilização, o citado revestimento simples deverá ter uma estrutura rígida. Nos casos de revestimento duplo obtém-se uma divisão das cargas, que pode ser do seguinte modo: o revestimento interno suporta a carga da água. Durante a construção, o revestimento externo deverá suportar todas as cargas. Mesmo assim, ele poderá ser rígido ou articulado, enquanto que o revestimento interno apresenta tão somente uma alternativa, qual seja, a da rigidez total. Na estática se diferenciam, basicamente, dois tipos de sistemas de sustentação:

— A estrutura do túnel resiste sozinha às cargas externas. O sistema estático é o anel, com ou sem articulações, eventualmente com tirantes horizontais. Neste caso, o solo é considerado carga simples e intermediária de outras cargas.



16.22

— A estrutura do túnel trabalha em conjunto com o solo que a envolve.

As condições de compatibilidade levam à determinação dos esforços hiperestáticos internos, entre as duas partes que trabalham em conjunto. Em consequência deste trabalho em conjunto, os momentos fletôres na estrutura diminuem sensivelmente, na medida em que aumenta a dureza do solo e é reduzida a rigidez da estrutura.

Possíveis processos de cálculo e premissas das cargas atuantes

Existem várias possibilidades, sendo que num dos processos de cálculo, o solo é considerado elástico com igual comportamento em qualquer ponto ao redor do túnel.

Com referência à estrutura verifica-se neste caso uma alteração da carga no sentido de um certo alívio e até apoio oferecido pelo próprio solo. Em outros processos considera-se o apoio elástico da estrutura unicamente nos locais onde se observa uma deformação do sistema para o lado de fora.

Por outro lado, os processos de cálculo são diferenciados pelo simples fato de que, num deles consideram-se **somente** as cargas radiais, enquanto que no outro incluem-se as **cargas radiais e tangenciais**.

As cargas exercidas num túnel

As cargas sobre um túnel terminado distribuem-se, em:

- carga de corrente do peso dos terrenos adjacentes;
- cargas das construções e do trânsito na superfície (inclusive futuras construções e possíveis reduções das cargas);
- empuxo lateral do solo;
- pressão da água considerando os níveis freáticos, máximo e mínimo;
- outras cargas provenientes das condições locais.

A carga constituída pelo peso próprio da estrutura do túnel geralmente não é considerada nos cálculos.

A carga exercida pelo tráfego dentro do túnel revestido com segmentos de anel não precisa ser levada em consideração. Quando, porém, se trata do cálculo do revestimento interno de concreto em um túnel com revestimento duplo, a carga do tráfego deve ser computada. Cargas existentes durante a construção do túnel:

a) pressão provocada pela couraça durante o avanço da mesma;

b) pressão do ar comprimido;

c) pressão proveniente da injeção para enchimento das fendas.

Nos cálculos, as características do solo, particularmente o coeficiente do recalque K_s , são de importância decisiva para a determinação dos esforços resistentes.

Não se chega a conclusões mais realistas através de cálculos mais detalhados ou complicados, mas sim, através de um estudo comparativo, utilizando-se alguns dos coeficientes possíveis (coeficientes de recalques K_s , premissas da carga, valores limite de cargas, etc.).

Processo de cálculo aconselhável para várias hipóteses de cargas admissíveis e sua justificativa

A extraordinária multiplicidade de métodos de cálculos levam a resultados que poderão variar entre si, apresentando diferenças superiores a 100%. Em vista disso, é conveniente estabelecer certas normas e especificações no que se refere ao cálculo propriamente dito e às cargas consideradas para que se possa obter um dimensionamento compatível com a experiência e a economia.

A estrutura do túnel pode constituir-se de um anel rígido ou de um anel articulado. Em qualquer um destes casos, tanto num, como no outro, deve ser assegurada a possibilidade de sua execução. (Não se deve assentar por exemplo os segmentos pelo sistema dos anéis rígidos em locais calculados para anéis articulados). A carga sobreposta do solo deve ser considerada no seu valor total.

A carga total vertical (inclusive as cargas provenientes de construções existentes e futuras) todavia, não deve ser menor do que o valor mínimo de $p = 2 \cdot D \cdot \gamma$ o (t/cm^2), sendo D o diâmetro da couraça.

Por outro lado, a carga sobreposta deve ser considerada como uma carga uniformemente distribuída sobre a largura total do túnel.

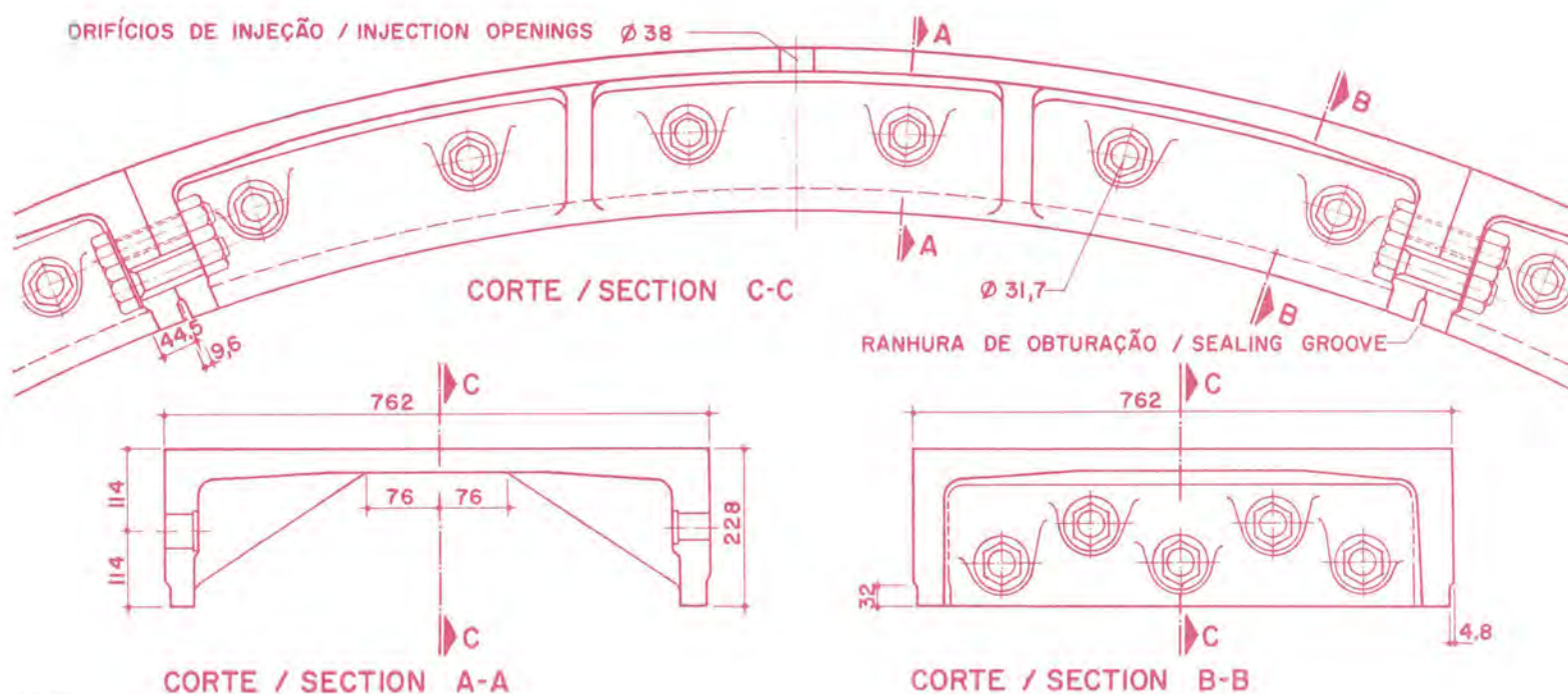
A pressão no fundo se obtém pela fórmula $\Sigma V = 0$, devendo ser considerada preliminarmente como uma pressão uniforme distribuída sobre a largura total da base, do túnel.

O empuxo lateral a ser considerado no cálculo é obtido através da carga vertical sobreposta multiplicada pelo

Fig. 16.21
Couraça Calweld totalmente mecanizada
(corte longitudinal)

Fig. 16.22
Túnel aberto pelo método da couraça,
revestido com segmentos de anel de ferro
fundido (túnel para pedestres em
Rendsburg)

Fig. 16.23
Segmentos de ferro fundido



16.23

coeficiente da pressão lateral $\lambda^0 = 0,5$. O diagrama do empuxo lateral em forma de trapézio, deverá ser convertido num diagrama retangular de área equivalente à do trapézio.

As forças de recalque criadas devido à deformação da estrutura do túnel deverão ser consideradas, desde que haja uma deformação estrutural para fora. As ditas forças de recalque são calculadas através do coeficiente de recalque K_s e do valor do módulo de elasticidade E do solo.

Além da prova de resistência de 1.^a ordem (considerando as deformações da estrutura) ou, então, uma prova de estabilidade do anel inteiro.

Conforme as condições locais poderá ser necessário limitar o abaixamento do tópo do túnel em virtude da deformação elástica a um valor máximo admissível.

Em tais casos é exigida uma prova da deformação do tópo do túnel com base nas cargas principais, quais sejam cargas sobrepostas, pressão da água e empuxo lateral exercido pelo solo.

Tensões e resistências

Cálculo de acordo com a teoria de 1.^a ordem.

Para a obtenção das tensões admissíveis devem ser consultados os regulamentos correspondentes.

Cálculo de acordo com a teoria da 2.^a ordem.

Aço:

Verifica-se que, com a carga aplicada e multiplicada por 1,7 não serão excedidas as tensões de escoamento do material.

por exemplo: $\sigma_t \leq \sigma_e$

Aço CA 24 $\sigma_e = 2,4 \text{ t/cm}^2$
Aço CA 32 $\sigma_e = 3,2 \text{ t/cm}^2$

Concretos:

Procede-se à prova de resistência à ruptura pelos processos usuais no país (Estágio III).

Ferro fundido cinzento:

Deve ser verificado que, com o dobro da carga, não são excedidas as tensões admissíveis para o material.

Para a verificação da resistência à flambagem e empenamento por simples processos de estabilidade consultam-se também, os regulamentos correspondentes.

16.2.4.2. Apresentação construtiva dos revestimentos dos túneis

Nas construções de túneis pelo método de couraça, os revestimentos são montados dentro do elemento protetor na cauda da couraça. Os mesmos são constituídos por peças pré-fabricadas de ferro fundido, aço laminado ou concreto armado, os denominados segmentos de anel. Para unir os referidos segmentos de anel são usados nas juntas, com raras exceções, parafusos de CA-24 ou de aço especial. Os parafusos de CA-24 são empregados quando os anéis do túnel, no que diz respeito à estática, deverão formar uma estrutura articulada, enquanto que os parafusos de aço especial encontram o seu uso nos sistemas rígidos ou semi-rígidos, formados pelos anéis. Esses parafusos de aço especial são atarrachados com auxílio de uma chave a ar comprimido (uma espécie de martelo pneumático), capaz de transmitir uma tensão de, até 30,0 t, nos mesmos. As juntas entre os segmentos de anel mencionados requerem especial atenção e cuidado, tendo em vista a necessidade de sua perfeita impermeabilização. É evidente, que também dos próprios segmentos de anel se exige uma impermeabilidade total, geralmente já garantida pela qualidade do material neles empregado, dos quais se exige a ausência de qualquer fissura.

Em vista da impermeabilidade desejada, pode-se fazer a diferença entre os revestimentos simples e revestimentos duplos. Nos túneis de revestimentos simples, os segmentos de anel montados na cauda da couraça constituem a única proteção contra o solo e a água subterrânea, ou infiltrada. Isto significa, que a vedação das juntas entre os segmentos deverá evitar, com a maior segurança qualquer penetração de água dentro do túnel. Esta meta é difícil e somente atingida, muitas vezes, com o decorrer do tempo.

Apesar do enchimento do espaço anelar proveniente da diferença entre a face externa da cauda da couraça e a face externa dos segmentos de anel, poderão surgir certos movimentos que resultam em infiltrações. Entre outros motivos para eventuais aberturas nas juntas podem-se citar oscilações de temperatura que influenciam os revestimentos de ferro fundido ou aço, assim como, o vazamento do ar comprimido empregado no avanço da couraça por processos pneumáticos.

O túnel de revestimento simples com segmentos de anel de ferro fundido ou

aço, oferece a vantagem de permitir uma eliminação relativamente fácil dos vazamentos nas juntas, provocados por alterações da forma, pelo simples fato de permitir retoques.

Isto não se verifica nos túneis de revestimento simples com segmentos de concreto ou concreto armado, quando estes se encontram num solo saturado de água. Nestes casos, o problema de vedação das juntas, particularmente, do retoque posterior das vedações é muito difícil, não se tendo inclusive ainda qualquer conhecimento de processos eficazes aprovados na prática. Em vista disso, por medidas de segurança, são construídos os túneis de concreto armado, em tais solos, com revestimento duplo, os quais recebem entre o fôrro interno e o revestimento externo, uma camada de material impermeabilizante.

Outro problema muito comum e encontrado nos mais diversos revestimentos de túnel, aliás mesmo nos túneis construídos a céu aberto, refere-se a eliminação das influências de correntes elétricas de fuga.

Finalmente, é de suma importância, na escolha do tipo de revestimento mais adequado, que o mesmo possa oferecer proteção contra água subterrânea ou solos particularmente agressivos.

Em resumo, deve-se considerar os seguintes pontos, durante o estudo para determinação da construção mais adequada:

- condições construtivas e estáticas
- construção de um túnel tubular impermeável
- isolamento contra correntes de fuga
- proteção do revestimento contra água subterrânea agressiva ou solo agressivo
- custo absoluto do revestimento do túnel.

Construção de túnel com revestimento simples, empregando-se segmentos de anel de ferro fundido

Trata-se aqui da forma mais antiga de revestir túneis construídos pelo método de couraça. Ela provou até hoje a sua eficiência inúmeras vezes e preenche quase que perfeitamente as exigências a) b) e d) dos pontos acima citados.

Ultimamente é empregada na Alemanha na maioria dos casos o tipo de ferro fundido GG26. O número indica a resistência à tração em kg/mm^2 , numa espessura superior a 15-30 mm. Um material de maior resistência resultará evidentemente

em dimensões menores e pesos inferiores.

A largura dos segmentos de anéis oscila entre 0,50 e 1,00 m sendo a mais comum de 0,75 m, (Figs. 16.22 e 16.23).

Os segmentos se constituem de dois flanges frontais, de dois flanges laterais e da casca.

A fim de receber a pressão das prensas de avanço, os flanges laterais deverão ser providos de reforços que trabalharão como escoras do flange contra a casca do próprio segmento.

Os flanges laterais formam as juntas dos anéis no túnel, enquanto que os flanges frontais, que servem para unir os diversos segmentos de cada anel, entre si, por meio de parafusos, formam as juntas longitudinais.

Os anéis formados de segmentos nos túneis de metrô, com um diâmetro externo de aproximadamente 6,00 m, como em São Paulo, compõem-se de 8 ou 9 segmentos e uma peça de fechamento. Por razões técnicas de fundição, os segmentos não devem ter comprimento superior a 1,70 até 2,10 m.

Para o revestimento dos túneis em curvas e para o ajuste em retas, são usados segmentos de compensação, cujos comprimentos são de 30-40 mm menores que o normal.

Ao longo dos túneis, na Alemanha e agora, também, na Inglaterra, as juntas longitudinais formadas entre os segmentos de anel são deslocadas de uma distância igual à metade do comprimento de um segmento, em relação às juntas do anel seguinte.

Correntes de fuga

Estas correntes, também chamadas correntes parasitas, somente se apresentam quando o metrô é movido a corrente contínua. É de se temer, que essas correntes prejudiquem por corrosão, por exemplo, as tubulações de aço existentes nas ruas paralelas ao túnel, assim como estruturas metálicas porventura existentes em suas proximidades.

Na Alemanha é usual, nos revestimentos de ferro fundido distribuir sobre o concreto de assentamento dos segmentos de ferro fundido na base do túnel, uma camada de asfalto arenoso, com espessura de 20 mm. O concreto cobre os flanges por cerca de 20 — 30 mm e contém rebaixos, nos quais entra a camada de asfalto para evitar qualquer deslizamento.

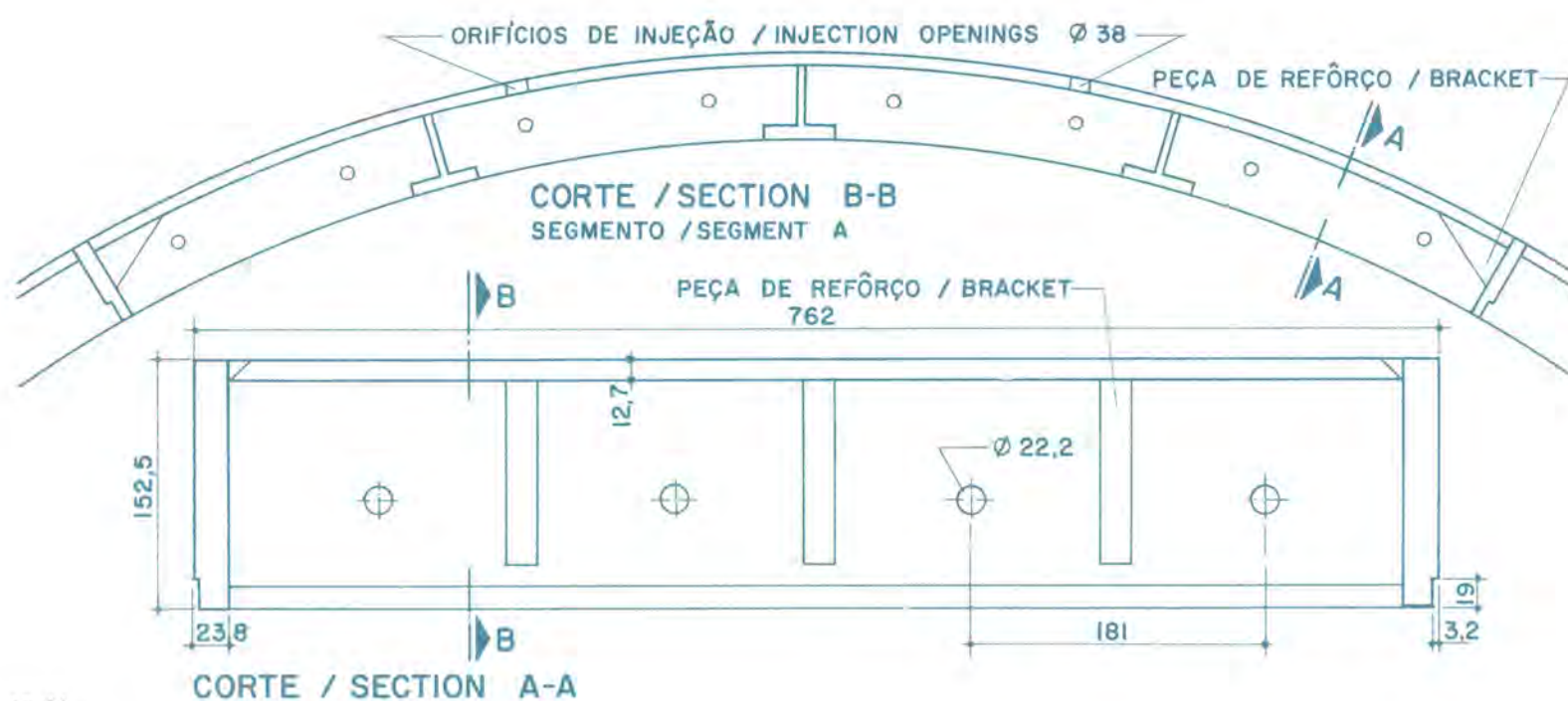


Fig. 16.24
Segmentos de aço soldados

16.24

A influência de água subterrânea ou solo agressivos

A corrosão, ou seja, o enferrujamento do material constitui um processo químico ou eletro-químico. Para a corrosão é imprescindível a presença de água, além de oxigênio. Solos coesivos geralmente tem teor de água mais elevado do que areia ou cascalho. Por outro lado, o teor de oxigênio nos solos coesivos é sempre menor. O ferro fundido é praticamente insensível aos ataques de água subterrânea de baixo Ph.

Como proteção aconselha-se:

- o emprego do material fundido em formas de areia, visto que a camada de silício formada durante a fundição chega a constituir uma proteção eficiente;

- eliminação da crosta de fundição dos segmentos por meio de jatos de areia, pois, a mesma favorece a formação de elementos elétricos;

- aplicação a quente de um revestimento betuminoso externo o mais uniforme possível. A camada assim obtida, todavia, terá que ser protegida contra qualquer danificação durante o manuseio das peças para evitar eventuais perfurações devidas à influências eletro-químicas.

Custos do revestimento

O problema financeiro, naturalmente, é de alta significação na escolha do tipo de revestimento de um túnel. Entretanto, o montante dos custos não deverá ser fator decisivo na elaboração do projeto pois, também, as ponderações sobre a segurança, a duração da obra, assim como a sua manutenção, constituem fatores essenciais que poderão, em pouco tempo compensar as eventuais economias iniciais.

Para o processamento destes estudos é dado como valor **estimativo**, que o anel em segmentos de ferro fundido tipo GGL-25 com uma largura de 750 mm, um diâmetro de 5 600 mm e de uma cobertura de túnel de 15,00 m, pesa aproximadamente 5.380 kg. Desta forma, o peso de um metro corrido do túnel é de 7,2 toneladas. É de se notar ainda, que, como meios de união, em cada anel são empregados nada menos que 85 parafusos.

Construção de túnel com revestimento simples, empregando-se segmentos de anel de aço laminado

Os segmentos de anel se assemelham à forma dos segmentos de anel de ferro fundido, constituindo-se de uma

casca de chapa de aço e de flanges, assim como de nervuras de reforço dispostas entre os flanges anelares de aço perfilado, (Fig. 16.24). As mencionadas nervuras de reforço devem suportar entre outras, a pressão total dos macacos de avanço. Os segmentos do anel de aço laminado oferecem em comparação com os segmentos de ferro fundido, as seguintes vantagens:

Enquanto que durante a produção dos segmentos de ferro fundido não se pode eliminar certos defeitos, como por exemplo a formação de bolsas de ar, a fabricação dos segmentos de anel de aço laminado permite o emprego de material homogêneo de alta qualidade.

Os esforços exigidos do material tem limites mais elevados, o que, conseqüentemente, permite reduzir as medidas da seção útil que resulta por outro lado em pesos consideravelmente mais baixos.

Todavia, existe em contraposição às vantagens enumeradas, uma desvantagem, qual seja, a menor rigidez dos flanges deste tipo de segmento, em comparação com os flanges dos segmentos de ferro fundido. Este fato obriga os construtores a empregar maior número de parafusos que são dispostos com menor espaçamento entre si.

Geralmente, os túneis executados com segmento de anel de aço laminado foram revestidos interiormente com concreto, como por exemplo no Metrô de Chicago (túnel aberto com a base situada aproximadamente 15 m abaixo da superfície do terreno).

Influências de água subterrânea ou solo agressivos

Em contraposição com opiniões antigas, ficou demonstrado em ensaios e testes prolongados através de anos, que a intensidade e a velocidade de corrosão do ferro fundido e do aço, após um tempo mais ou menos prolongado, chega a ser equivalente.

Tendo em vista que a espessura do segmento de ferro fundido é de cerca de 25 mm e do segmento de aço laminado, teoricamente, de apenas 10-12 mm, a camada eventual de ferrugem prejudica, logicamente, muito mais a espessura do segmento de aço, razão pela qual se recomenda aumentar a espessura teoricamente necessária para a casca do segmento de aço de 1,0 a 1,5 mm.

Como proteção adicional pode-se considerar a aplicação de uma camada betuminosa ou de material sintético qualquer nas superfícies externas,

como também nas superfícies internas dos referidos segmentos. Neste caso, entretanto, deverá ser eliminada previamente a crosta da laminação, tendo em vista a melhor adesão e conservação da camada protetora aplicada. Por outro lado, pelo menos a camada aplicada na superfície externa não deve apresentar qualquer defeito ou lesão, a fim de evitar a formação de elementos eletroquímicos.

Futuramente deverá ser mais conveniente aplicar em vez da camada de betume facilmente danificável, uma proteção com material sintético reforçado com fibras de vidro.

Custos do revestimento

Presume-se para efeito de cálculo dos custos, que um anel de segmentos de aço tipo CA-32-3 de uma largura de 750 mm, com um diâmetro externo de 5.600 mm e com uma cobertura de aproximadamente 15,00 m, pese 3.000 kg, obtendo-se assim, um peso de 4,0 toneladas por metro linear do túnel. Para a união dos segmentos são usados 125 parafusos por anel.

Construção de túnel com revestimento simples, empregando-se segmentos de anéis de concreto armado

Pouco antes da II Guerra Mundial, na Inglaterra, e após 1955, também na União Soviética, foi difundido o emprego de anéis formados por segmentos de concreto armado. As razões para tal fato, nestes dois países, poderão ser encontradas na economia oferecida por este material, pois, indubitavelmente, os preços são bem inferiores do que por exemplo os custos dos anéis de segmento de ferro fundido. Decisivo para a constatação da economia de um ou outro tipo, todavia, são os custos do metro linear do túnel acabado, isto é, não sejam computados apenas os preços dos materiais de construção, mas sim, entre outros, também a velocidade do avanço da obra, ou melhor, a remuneração dos trabalhadores, tão importante, quanto o tipo da vedação a ser empregada.

Mesmo assim, o revestimento simples com anéis formados por segmentos de concreto armado, geralmente, deverá sair muito mais em conta do que um revestimento com anéis formados por segmentos de ferro fundido ou aço. Entretanto, este revestimento só poderá ser considerado equivalente aos dois últimos tipos mencionados, desde que não haja água subterrânea ou de infiltração no local de sua colocação ou, desde que haja possibilidade de vedar as suas juntas tão bem como nos anéis de ferro ou aço, isto, entretanto, ainda

não se conseguiu até hoje. Os especialistas confiam na descoberta de um vedante sintético eficiente, suficientemente barato, e inalterável no decorrer dos anos.

Sabe-se, contudo, de um certo número de túneis de metrô com revestimento simples de concreto armado construídos conforme inicialmente descrito, primeiramente na Inglaterra e depois na União Soviética. As razões são convincentes, pois nos dois países, os túneis foram construídos em solos argilosos impermeáveis, de forma que a vedação das juntas não criava qualquer problema.

Na Alemanha foi fabricado no ano de 1958 o anel formado de segmentos de concreto armado em bloco e empregado pela primeira vez na construção de um túnel de esgoto de revestimento simples sob o rio Reno. O diâmetro externo deste tipo de anel era de 3,80 m, sendo o mesmo usado num trecho experimental dentro da área adjacente ao rio. A experiência provou, todavia, que estes anéis de segmento formados de concreto armado em bloco, no que se refere à impermeabilidade de suas juntas, não preenchem os requisitos essenciais e vitais para um túnel de metrô. A impermeabilidade era apenas suficiente para um túnel de esgoto. A forma de anéis de segmentos em bloco (4 segmentos e a peça de fecho) aqui apresentada, no entanto, já foi empregada na construção de túneis do Metrô de Hamburgo e Munique. Tratava-se aí, porém, de túneis de revestimento duplo e de anéis compostos em bloco (Fig. 16.25 e 16.26).

Outros tipos de configuração de segmentos são os segmentos em forma de caixa e os segmentos nervurados.

Em comparação com os anéis compostos por segmentos de ferro fundido ou aço, existe nos anéis de segmento de concreto armado o perigo maior da ocorrência de fendas provocadas pela pressão exercida pelas prensas de avanço. Tendo em vista, que estas fendas transpassam a espessura do segmento em sua totalidade, as mesmas constituem fontes de infiltrações. Devido à utilização de reforços suplementares de armadura e de cabeças de pressão extra-largas dotadas de articulação esférica, deve reduzir-se consideravelmente a possibilidade da formação de fendas. As fendas eventualmente criadas poderão ser vedadas com relativa facilidade pela injeção de nata de cimento. Os anéis compostos por segmentos de concreto armado são executados com concreto que varia de $\sigma_{28} = 300$

Fig. 16.25
Segmentos de anel, em blocos de concreto armado, empregados no Metrô de Munique (túnel com revestimento interno de concreto)



16.25

Fig. 16.26
Peças de fêcho dos segmentos de concreto armado



16.26

até 600 kg/cm². Pressupõe-se, aliás, neste caso a observação rigorosa da curva de distribuição granular dos agregados.

Nas construções de linhas de metrô nos centros das grandes cidades, normalmente não existe na frente de trabalho o espaço suficiente para a execução dos segmentos de anéis de concreto armado, particularmente, porque sempre haverá também a necessidade da manutenção de um relativo estoque de segmentos de anéis acabados, prontos para a instalação.

Em vista do acima exposto, geralmente a pré-fabricação das peças, ou seja dos segmentos, se verifica num local adequado, porém, distante da frente de trabalho propriamente dita. Na fabricação dos segmentos de anéis deverá ser observada a maior exatidão possível com as menores tolerâncias, especialmente quando se trata de anéis para túneis em revestimento simples. A moldagem se processa dentro de formas ou moldes de aço dispostos de tal modo que, a curva interna fique para baixo. Para moldagem dos segmentos de anéis de compensação empregam-se moldes especiais.

A influência da água subterrânea agressiva ou de solos também agressivos

Nas camadas subterrâneas do solo em São Paulo pode-se contar substancialmente com o ataque de ácido carbônico e solvente de cal, presente na água, numa proporção de até 81,7 mg/litro. Enquanto que proporções de 15 — 20 mg/litro são consideradas inofensivas para concreto comum de, por exemplo $\sigma_c = 28 = 200$ kg/cm² a presença de 80 mg/litro já tem que ser considerada como muito agressiva. Segmentos de anel executados com concreto armado de $\sigma_c = 28 = 300$ à 600 kg/cm² são peças altamente resistentes com superfícies correspondentemente impermeáveis, o que constitui uma das principais condições para que possam resistir ao ataque de ácido carbônico agressivo e solvente de cal. Por outro lado, a fim de aumentar ainda mais a proteção da superfície externa dos anéis, pode-se aplicar uma camada de betume ou de material sintético apropriado.

Nas pesquisas até hoje realizadas descobriram-se, outrossim, a presença de cloratos numa proporção de até 48,4 mg/litro e de sulfato numa proporção de 60 mg/litro. Isto não constitui perigo, visto que somente em quantidades superiores a 200 mg/litro chegam essas

impurezas a prejudicar o concreto. Caso sejam encontrados posteriormente locais com maior concentração de elementos prejudiciais aos anéis de concreto armado, os mesmos deverão ser executados com cimentos pobres em cal, como por exemplo, cimento de alto forno ou cimento de sulfato siderúrgico.

Construção e impermeabilização de túneis com revestimento duplo, empregando-se segmentos de anel de concreto armado

Os túneis com revestimento duplo devem sua criação à necessidade de se construir túneis através de terrenos aquíferos, com um interior completamente seco, particularmente, de túneis transitáveis e impermeabilizados internamente. Este tipo de túnel era construído no princípio somente através de rochas. No túnel construído pelo método de couraça, o revestimento externo consiste de anéis de concreto armado pré-fabricados, enquanto que o revestimento interno é concretado no local com armadura de ferro. Entre os dois revestimentos prevê-se a impermeabilização interna, a qual, na medida do possível, deverá permanecer sob pressão constante.

No revestimento duplo emprega-se preferencialmente segmento de anel de concreto armado em bloco, pois, este, uma vez assentado, oferece já uma superfície interna plana, que serve de portador para o impermeabilizante. Para a fixação deste, a referida superfície recebe ainda uma camada de "Torkret" de 20 — 30 mm de espessura, a fim de que sejam eliminados quaisquer eventuais desnivelamentos. Após a execução dos trabalhos de impermeabilização é executado o revestimento interno em concreto armado.

A construção se desenvolve do seguinte modo:

O túnel é perfurado pela couraça e revestido com anéis formados de segmentos de concreto armado em bloco. Tendo em vista, que o referido túnel se encontra abaixo do nível freático, torna-se necessária a aplicação simultânea de um processo de compressão de ar ou rebaixamento do nível da água subterrânea para que o túnel possa ser construído a seco. Assim sendo, as juntas entre os segmentos de anel não precisam ser necessariamente impermeáveis.

Quando se utiliza o processo de ar comprimido, as juntas deveriam apresentar certa capacidade de vedação, para evitar perdas excessivas do ar comprimido.

Com referência à estatística pode-se dizer o seguinte:

O revestimento externo do túnel deve ser construído de tal forma que possa suportar todas as forças externas atuando sobre o referido túnel, enquanto que o revestimento interno, de concreto armado, recebe a pressão da água e as cargas originadas pela deformação eventual do revestimento externo.

Corrente de fuga

A camada de impermeabilizante completamente contínua, conforme descrita no capítulo 16.5.2., oferece também uma perfeita proteção contra as correntes de fuga que possam atravessar as paredes do túnel. Esta proteção, entretanto, não defende a armação de ferro do revestimento interno, a qual, de acordo com alguns entendidos, continua sujeita à influência das citadas correntes. Os mesmos técnicos sugerem a interligação elétrica da armação dos diversos trechos do túnel e a sua descarga em vários pontos das seções do túnel.

Influência de água subterrânea ou de solo agressivos:

Aqui também têm validade as considerações feitas por ocasião da descrição dos túneis de revestimento simples.

Considerações críticas sobre as diversas modalidades de revestimento, tendo em vista a sua utilização específica em São Paulo

O revestimento simples de túneis com anéis formados de segmento de concreto armado não será incluído nas observações subsequentes, visto não ter sido provado ainda a sua eficiência prática na construção de linhas de metrô em solos semelhantes aos de São Paulo. Assim sendo, restará a escolha entre anéis formados de segmentos de ferro fundido, de aço, ou então de concreto armado, porém, em forma de revestimento duplo. Em sentido generalizado pode-se dizer o seguinte:

O tipo de revestimento pode ser escolhido independentemente da couraça, isto é, independente, do emprêgo de couraças abertas ou mecanizadas. Além disso, a escolha não depende, até um certo grau, do processo de retenção de água adotado, seja por meio de retenção comprimido, seja pelo rebaixamento do nível freático. Tendo em vista, que os diâmetros externos dos túneis, revestidos com

anéis de ferro fundido ou aço, de um lado e com anéis de concreto armado, de outro lado, oferecem uma diferença considerável (cerca de 72 a 78 cm), tendo, conseqüentemente, as couraças, idêntica diferença, deveria ser escolhido para a rede de metrô planejada para São Paulo, um único tipo de revestimento, de forma que as couraças possam ser empregadas várias vezes em diferentes frentes de trabalho. Isto é de particular importância, quando, no decorrer do planejamento, surgir uma série de trechos relativamente extensos, que possam ser perfurados com couraças mecanizadas.

As características dos diversos tipos de revestimento implicam nas seguintes conseqüências:

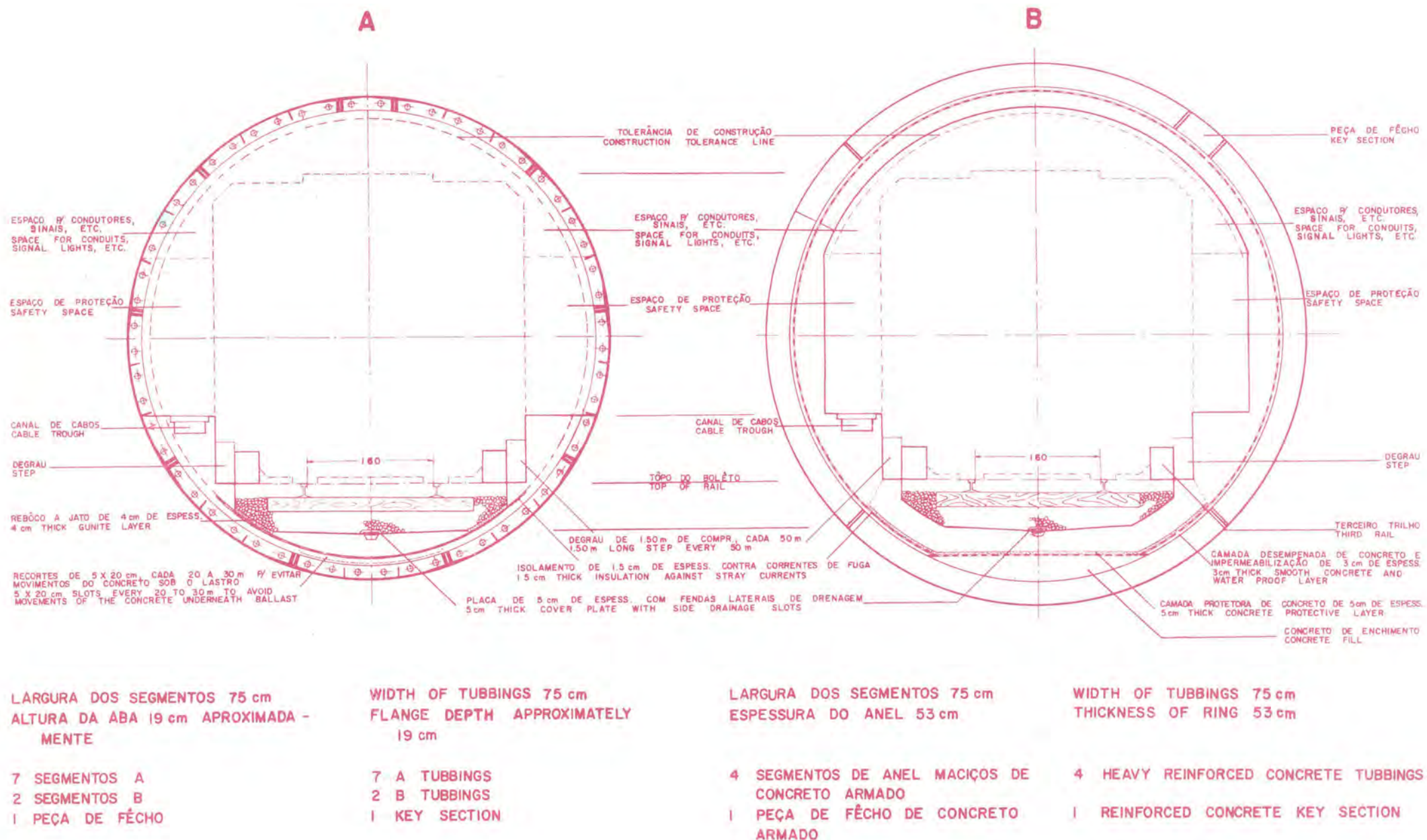
O anel formado de segmentos de aço requer um trabalho de solda de alta qualidade e de tolerâncias mínimas, desde que deva preencher os requisitos de uma completa impermeabilidade. O problema da exatidão do encaixe e ajuste por máquina é, em comparação com o anel de ferro fundido, de mais difícil solução, especialmente por causa das eventuais torções decorrentes da solda.

O anel formado de segmentos de aço deforma-se com relativa facilidade, o que constitui um inconveniente, quando o túnel passa por baixo de edificações pesadas ou prédios assentados em camadas sobrepostas de pouca espessura, ou ainda quando se verifica a ocorrência de cargas unilaterais. Pelas razões acima enumeradas dever-se-ia dar preferência aos anéis de ferro fundido ao de aço.

O anel de ferro fundido é, no que se refere às exigências técnicas, consideravelmente mais resistente.

Resta, pois, somente a comparação entre um revestimento de segmentos de ferro fundido e um revestimento duplo com anéis compostos de segmentos de concreto armado formando a parede externa.

Conforme informações prestadas por indústrias nacionais é perfeitamente viável a produção de segmentos de anéis de ferro fundido, no Brasil, com as características desejadas. Como, porém, nunca foram fabricados segmentos de anéis de ferro fundido no Brasil, e através da experiência na construção de dois túneis subaquáticos com anéis de segmentos deste tipo, pode-se dizer, que a fundição necessita de um alto gabarito para poder fornecer segmentos de anéis de ferro fundido de boa qualidade, (Fig. 16.27 A).



16.27

Comparando os problemas de produção de segmentos de anéis de ferro fundido e de execução de túneis com revestimento duplo de concreto armado de $\sigma_c = 28 - 300$ a 600 kg/cm^2 conclui-se que, especialmente, a impermeabilização depende em grande parte do cuidado e da precisão da mão de obra da construção. (Fig. 16.27 B).

Quando se compara estes dois tipos de revestimento, no que se refere a impermeabilização, chegar-se-á à conclusão, que são equivalentes.

Todavia, o túnel de ferro fundido pode ser vedado somente após um prolongado espaço de tempo através de retoques nas vedações e pela eventual drenagem das juntas enquanto que o túnel de revestimento duplo, pressupondo-se um bom trabalho durante a sua construção, fica logo impermeável.

Usando-se para a retenção da água subterrânea o processo pneumático, os anéis formados de segmentos de ferro fundido se prestarão melhor, pois as juntas (com observância das tolerâncias permitidas) são de antemão tão vedadas que não ocorrerão grandes perdas de ar.

No emprêgo de anéis formados de segmentos de concreto armado, não podem ser observadas tolerâncias tão limitadas como nos anéis de ferro fundido, de forma que ocorrem maiores escapamentos de ar comprimido. Este fator contribui para que a capacidade das estações de compressores, neste caso específico, seja aumentada. Outra vantagem do segmento de anel de ferro fundido é o seu reduzido peso de 670 kg contra 2.600 kg para o de concreto armado, para cada anel de 75 cm de largura.

Também a união dos segmentos de anel de ferro fundido, entre si é muito mais fácil do que um anel de concreto armado. Deve-se, outrossim, notar a perfuração da couraça num túnel de concreto armado ($D = 6,63 \text{ m}$) que é 25% maior do que num túnel de ferro fundido, ($D = 5,91 \text{ m}$). Esta diferença, que em seção transversal apresenta uma relação de áreas de $36,2 \text{ m}^2$ para $29,0 \text{ m}^2$ importa muito numa comparação.

Paralelamente às considerações técnicas deve-se comparar também os custos. Entretanto, para uma decisão final não deveria importar tão somente o menor custo para a construção do túnel, senão também a relação mais vantajosa entre o custo de construção e as técnicas capazes de assegurar um melhor acabamento, maior segurança e rapidez de execução, menores custos de manutenção e longevidade maior.

16.2.4.3. Poços iniciais e finais para o emprêgo da couraça

Na construção de túneis de metrô pelo método da couraça, trata-se quase que exclusivamente de túneis profundos, cuja perfuração é iniciada a partir de poços adequados.

Assim sendo, diferencia-se entre poços iniciais (também denominados poços de extração ou poços de partida) e poços finais ou terminais (poços de chegada). Na maioria das vezes, o poço inicial é formado pela própria vala a céu aberto de um trecho anterior ou pelo poço aberto para a construção de uma estação, desde que se localizem imediatamente ao lado do início de um trecho subterrâneo do traçado.

Visto que o poço de partida serve como poço de abastecimento e de extração de material durante o avanço da couraça, a existência do mesmo poderá prejudicar substancialmente o trânsito superficial, a não ser que esteja instalado junto com o canteiro de obra, num local onde há possibilidade de desviar o trânsito.

O mesmo acontece, embora em menor proporção, com referência ao poço final, pois o referido poço só terá a eventual função de servir para a retirada da couraça, podendo ficar coberto o resto do tempo. Em caso de uma extrema falta de espaço no local do poço inicial formado pela vala a céu aberto do trecho anterior, pode-se cobrir o poço inicial e instalar um outro poço, auxiliar, para extração do material, num lugar mais adequado, onde não prejudique o trânsito da superfície já existente.

A disposição lateral do poço de extração traz para os trabalhos dentro do túnel certos inconvenientes, pois, tanto o abastecimento como a extração se verificará num ângulo de 90° . Esta desvantagem porém, não será tão notada dentro do túnel, quando o transporte do material se fizer sem o auxílio de trilhos. É lógico, entretanto, que a abertura e utilização de um poço de extração lateral requeira maiores investimentos.

Os mencionados poços poderão ser construídos pelos mesmos processos das valas a céu aberto, como por exemplo, pelo sistema Berlinesse ou Hamburguês, com estacas cravadas ou colocadas em perfurações prévias; com paredes diafragma ou de tirantes de ancoragem protendidos; com escoramento de aço ou com "Benoto", com ou sem rebaixamento

Fig. 16.27
Seções típicas de um trecho em couraça executado com:
A) segmentos de ferro fundido
B) segmentos e parede interna de concreto armado

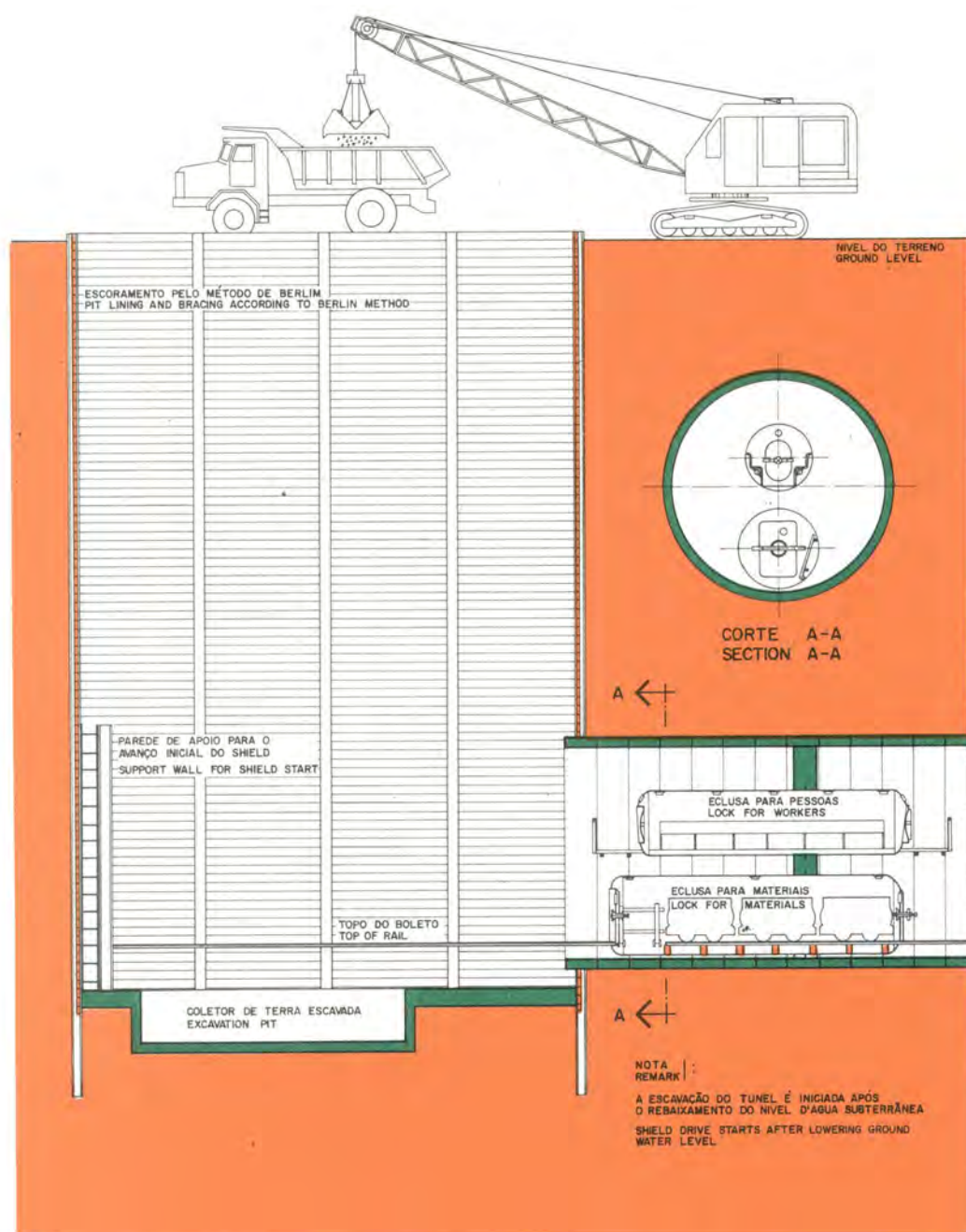
Fig. 16.28
Vala aberta executada com rebaixamento do nível de água subterrâneo para o começo do avanço do shield sob ar comprimido

Fig. 16.29
Caixão pneumático utilizado para o começo do avanço do shield

do nível freático, podendo ser empregados, em alguns casos, também caixões submersíveis pneumáticos, (Fig. 16.28).

A largura total dos poços depende da distância entre eixos dos túneis germinados. Os poços de partida são caracterizados por duas instalações especiais: a parede frontal perfurada, para passagem da couraça e a parede posterior de pressão, ou melhor, de apoio para o avanço da couraça. Os poços terminais, ao contrário, apresentam unicamente a parede perfurada.

A parede perfurada no fundo dos poços apresenta duas aberturas circulares destinadas ao início da perfuração pela couraça ou à saída da couraça, respectivamente. No poço de partida é erigida, frente à parede perfurada, a parede de



16.28

pressão, que serve de apoio para o avanço da couraça.

Conforme já foi dito, a parede de pressão se destina principalmente ao suporte do equipamento de avanço da couraça. Quando os poços são construídos pelos sistemas Berlinense ou Hamburguês, as estacas da parede frontal são apoiadas, no local da perfuração, num anel de aço cujo diâmetro interno deve ser pelo menos 200 mm maior do que o diâmetro externo da couraça. O referido anel, por sua vez, é escorado contra a parede de pressão. No início da perfuração do túnel, o revestimento dentro do citado anel é recortado e, no caso de solos arenosos, substituído por um escoramento da frente.

Quando as paredes dos poços são construídas de concreto simples ou concreto armado, a parede perfurada frontal deverá apresentar aberturas circulares ou quadradas com as mesmas medidas mínimas acima mencionadas. Estas aberturas, a título de um fechamento provisório para o isolamento do terreno adjacente recebem um anteparo de aço, ou então, um revestimento de madeira (Fig. 16.29).

A parede de pressão disposta em frente à parede perfurada deve suportar, pelo menos inicialmente, a pressão total das prensas da couraça. A pressão é transmitida por meio de um anel de pressão apoiado inferiormente em segmentos de anel colocados provisoriamente, e superiormente em uma estrutura telescópica de tubos de aço.

A parede perfurada no poço de chegada é de construção idêntica à parede perfurada no poço de partida.

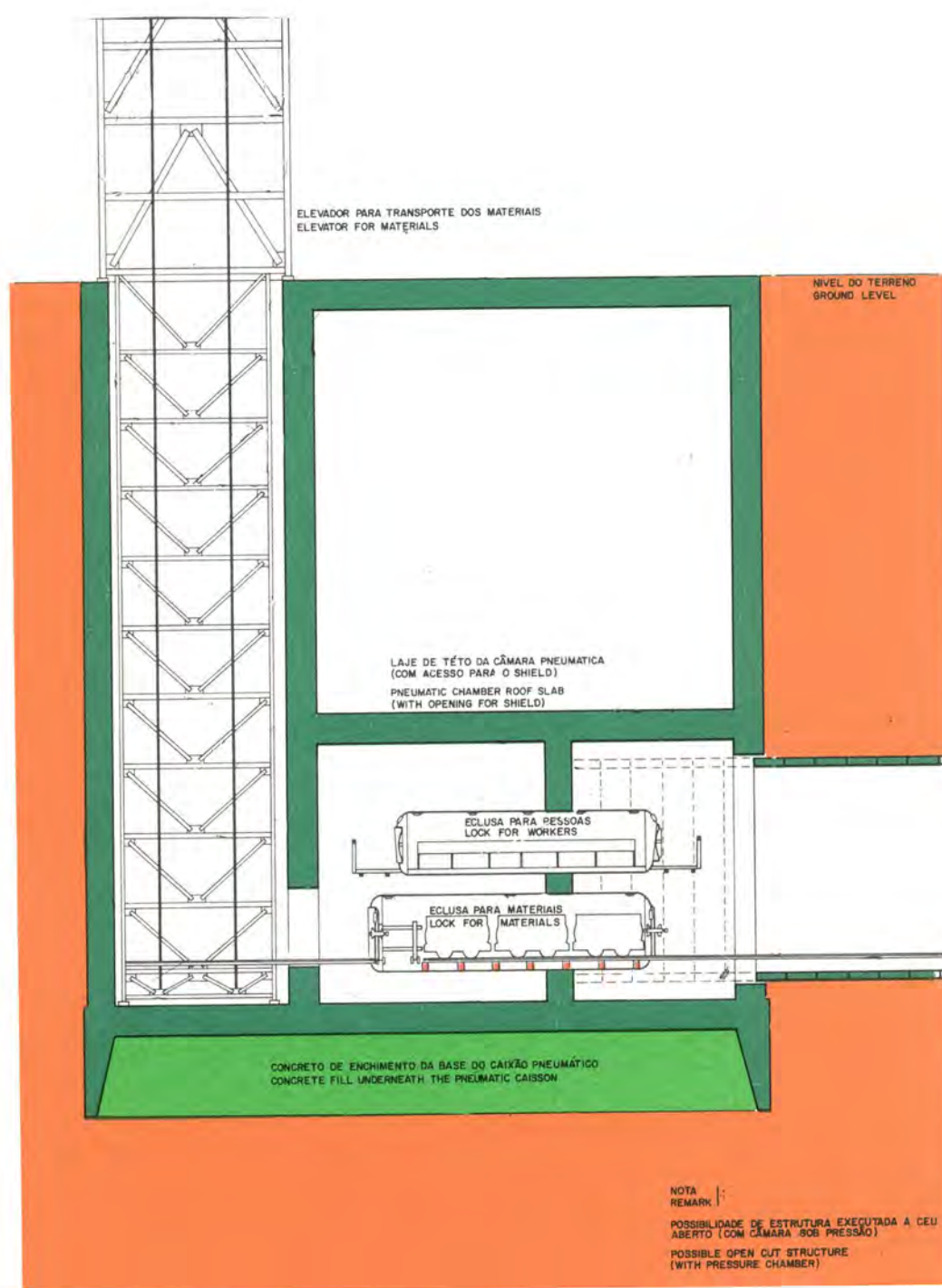
Tanto no poço de partida como no poço de chegada deverão ser previstos, nas aberturas da parede perfurada, meios para o acoplamento perfeitamente impermeável do primeiro anel dos túneis ao poço.

Esses poços, tão importantes para o avanço da couraça, poderão ser considerados como partes integrantes e permanentes das obras do metrô, servindo mais tarde como partes das estações ou, quando lateralmente dispostos, como poços de ventilação, etc.

16.2.4.4. Instalação dos canteiros de serviço

A comunicação entre o túnel e a superfície se processa através de dispositivos de extração no poço. Este pode consistir, da maneira mais simples possível, de um guindaste giratório, o qual, por meio de uma caçamba com garras, apanha a terra depositada lateralmente na base do poço para levá-la diretamente aos caminhões basculantes, ou para amontoá-la para posterior remoção. A capacidade de carga deve ser suficientemente para, durante a construção do túnel com segmento de anéis de concreto armado, movimentar esses elementos do túnel com peso de até 3,5 toneladas e para trazer os acumuladores da locomotiva elétrica para recarregamento na superfície.

Muitas vezes emprega-se também um elevador com armação de aço que preencha as mesmas exigências, além de servir para o pessoal da obra. Para a montagem da couraça, entretanto, é necessária a utilização de um guindaste giratório, enquanto que para o descarregamento e a



16.29

colocação das peças da couraça dentro do poço, a solução mais prática é o aluguel temporário de um guindaste móvel com capacidade de carga pelo menos 30 toneladas.

Na superfície encontra-se um depósito para os segmentos de anéis com o guindaste e, ao lado das instalações normais e comuns de qualquer canteiro de obras, quando for empregado um processo pneumático, a estação dos compressores, além de um ambulatório médico com todos os recursos de emergência, em caso de pressões mais elevadas (Na Alemanha com uma pressão acima de 1,3 atm).

Nos casos de rebaixamento do nível freático, as instalações de controle e acionamento são distribuídas sobre toda área ao longo do trecho a ser trabalhado. No poço é instalado também um ventilador para o arejamento do túnel.

As instalações no túnel incluem substancialmente um ou dois carros-andaime com pórtico de aço e acoplados à couraça. Estes carros transportam, em conjunto com a couraça aberta, as correias transportadoras do desatérro e as câmaras de pressão para o enchimento pneumático das juntas, servindo, outrossim, como andaimes para a colocação dos segmentos dos anéis de revestimento.

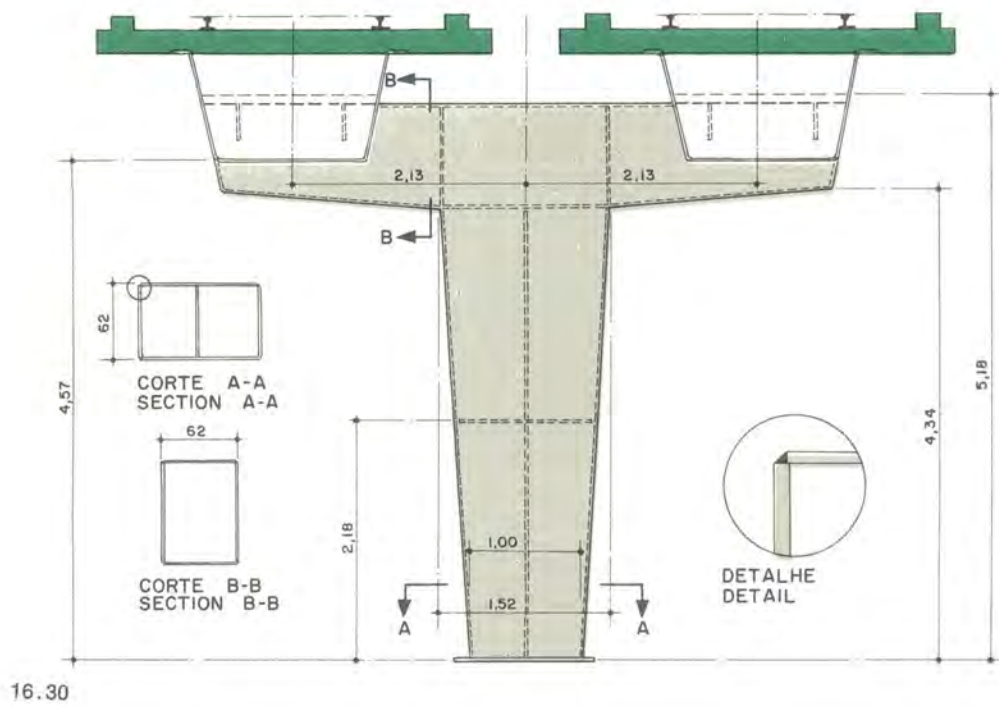
Nos casos de utilização de couraças mecanizadas, as instalações incluem ainda vagonetas para o transporte dos segmentos até o eretor; para a sua colocação, assim como, eventuais transformadores para a propulsão da perfuratriz. Muitas vezes, tanto no emprego de couraças abertas quanto

de couraças mecanizadas, os macacos hidráulicos para o avanço da couraça e para o eretor de segmentos de anel são levados juntos com a couraça propriamente dita. A retirada do desatérro e o fornecimento dos segmentos de anel com acessórios se processa sobre trilhos por meio de locomotivas elétricas de acumuladores ou, sem trilhos, com carros elétricos.

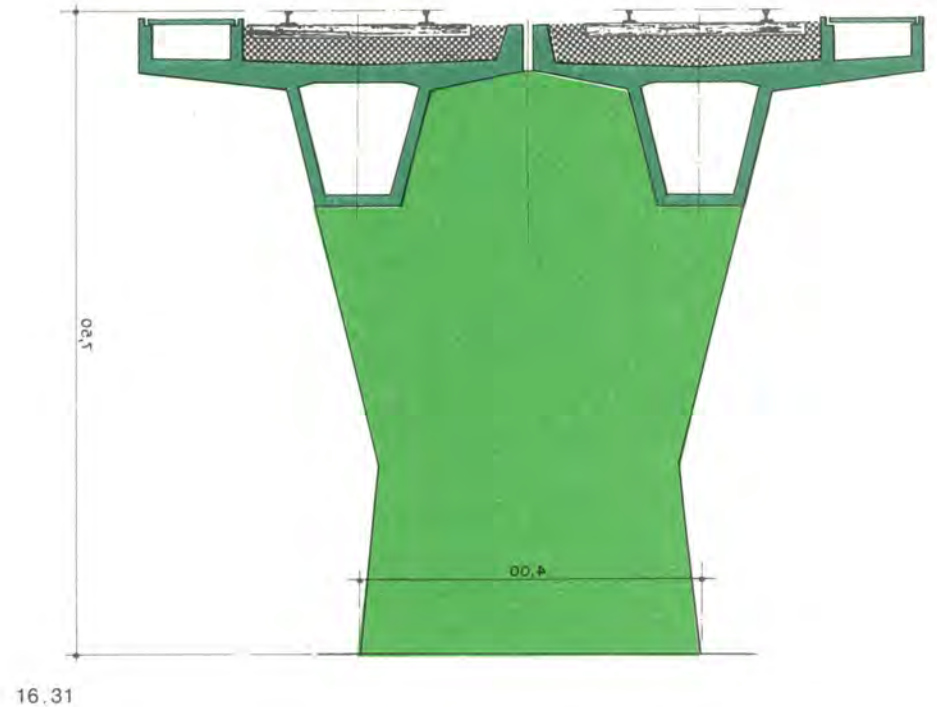
Nos túneis de revestimento duplo, após a perfuração, são empregados, além disso, "carros-andaime" para a aplicação do revestimento de "Torkret", de impermeabilizante interno e para a colocação da armadura. No final segue a instalação para o acabamento ou melhor, o carro com qual é aplicado o revestimento interno de concreto armado.

16.2.5. Apreciações críticas às construções de couraças e sua possível aplicação em São Paulo

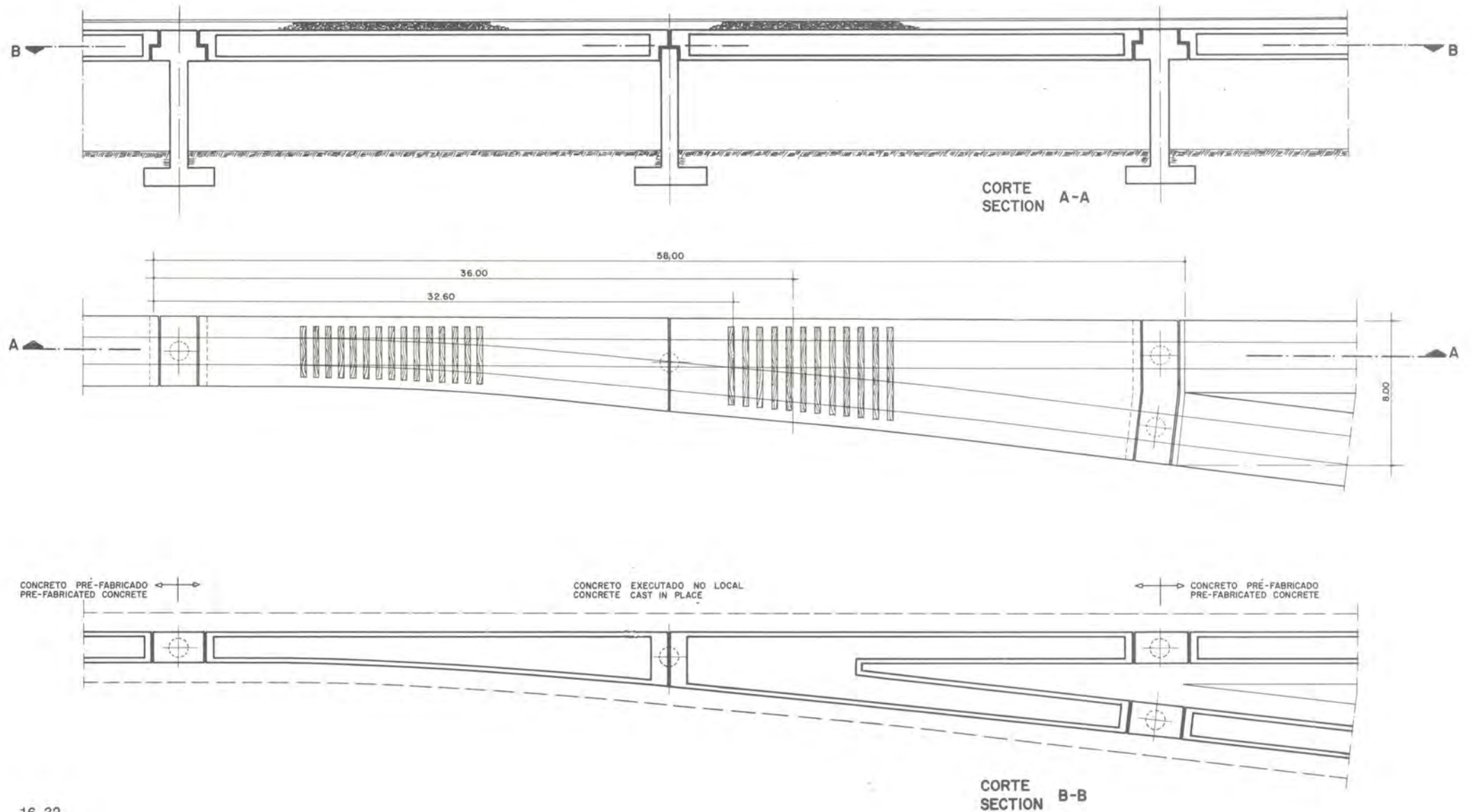
O acima exposto demonstra que no decorrer da última década houve grande progresso no campo da mecanização parcial e total das couraças. As couraças totalmente mecanizadas sempre obtiveram bons resultados em sub-solos firmes e homogêneos. Isto vale para a maioria das couraças soviéticas e inglesas, mas também para a couraça Calweld em Munique, na medida em que a argila ou sílex permanece seco ou é ressecado por meio de ar comprimido. Isto vale ainda para sub-solos essencialmente arenosos, — conforme prova a couraça Bade de Hamburgo — que exigem nas couraças abertas um reforço frontal, mas provavelmente também a aplicação simultânea de ar



16.30



16.31



16.32

comprimido. Os sub-solos com camadas variadas, como por exemplo o de São Paulo, conforme pode ser constatado por meio dos resultados das sondagens e dos testes de granulometria, representam um caso-limite no que diz respeito à utilização de couraças mecanizadas, pois não é certo que as areias finas e muito finas possam ser drenadas para o avanço mecânico com suficiente rapidez e perfeição. Isto vale também para a aplicação do ar comprimido, se bem que em menor escala, o qual de resto em São Paulo conduzirá ao objetivo com maior segurança.

Assim sendo, propõe-se o seguinte:

O planejamento da Linha Norte-Sul, que deverá ser executada em primeiro lugar, mostra que só serão executados trechos subterrâneos relativamente curtos pelo método couraça.

Para êsses pequenos trechos não podem ser aproveitadas as vantagens de uma mecanização total, que exigiria um tempo de adaptação relativamente longo e que necessita de difíceis trabalhos para montagem e desmontagem.

A isto acrescenta-se o alto custo de uma couraça totalmente mecanizada, que se torna mais dispendiosa nos trechos pequenos em virtude da elevada amortização.

Aconselha-se, portanto, iniciar os serviços com uma couraça aberta, todavia, com instalação parcial mecânica. Para tanto, estão previstas pequenas escavadoras com acionamento hidráulico, que ficarão suspensas numa viga transversal na metade inferior da couraça, descarregando o solo escavado numa esteira e que poderão

também fazer em parte os trabalhos da escavação, se o sub-solo fôr suficientemente rijo.

De resto, a couraça deverá ser provida de um equipamento comum de couraça com escavação manual (plataformas, prensas frontais, etc).

Nesses trechos poderão ser colhidas experiências com a couraça aberta, dependendo dos tipos de solos existentes e do comportamento do rebaixamento do lençol freático e do ar comprimido.

Através dessas experiências deverá ser possível desenvolver uma couraça totalmente automática para eventuais futuros trechos maiores, que levará a resultados satisfatórios nas condições geológicas e hidrológicas reinantes em São Paulo.

16.3 Métodos de construção para vias elevadas

No projeto da rede do Metrô São Paulo estão previstos alguns trechos em elevado, os quais constituirão importante elemento arquitetônico dentro da paisagem urbana.

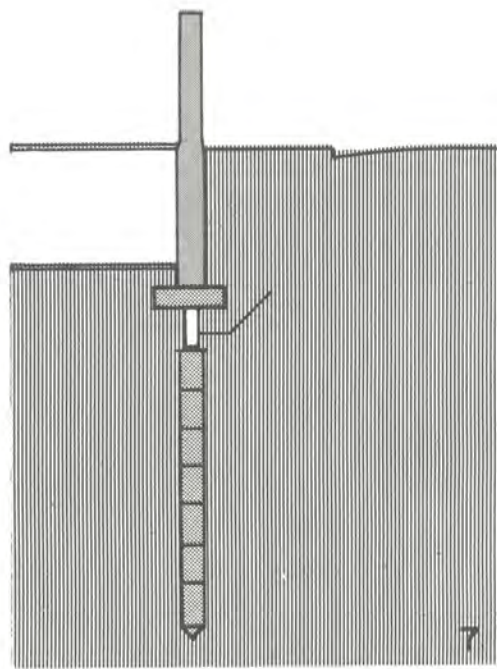
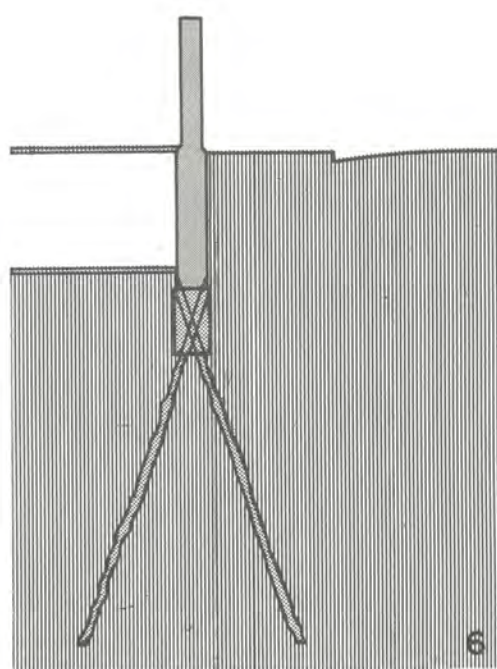
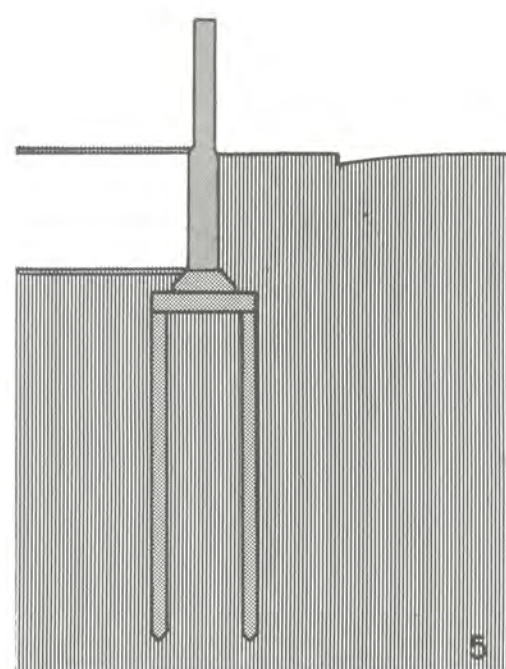
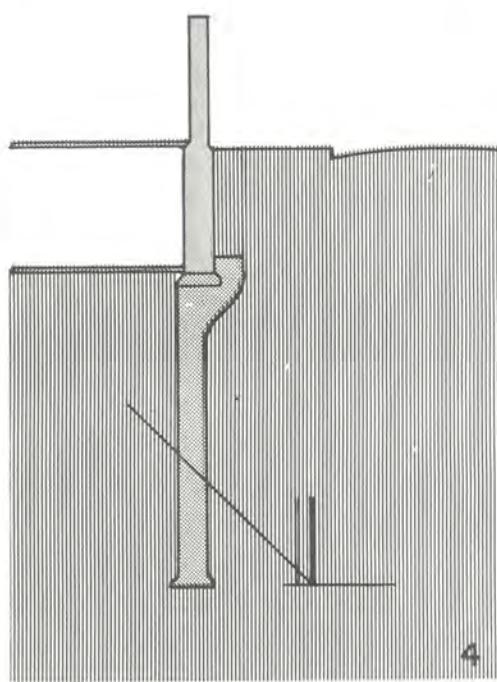
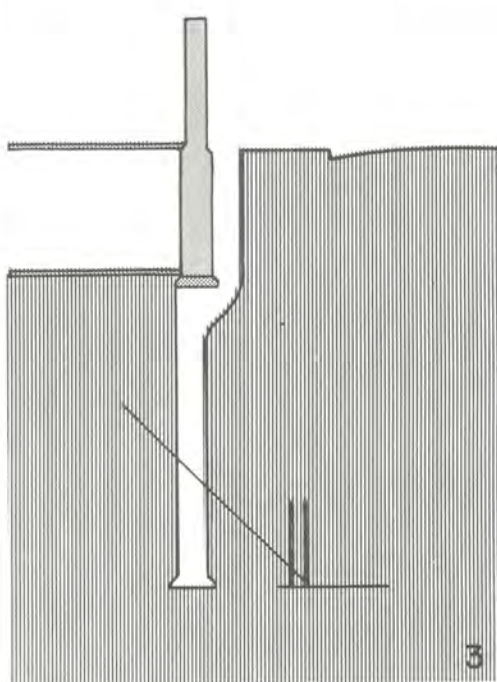
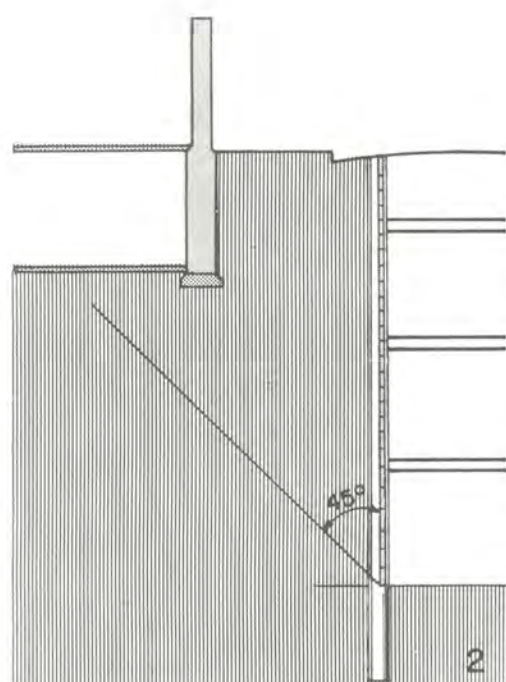
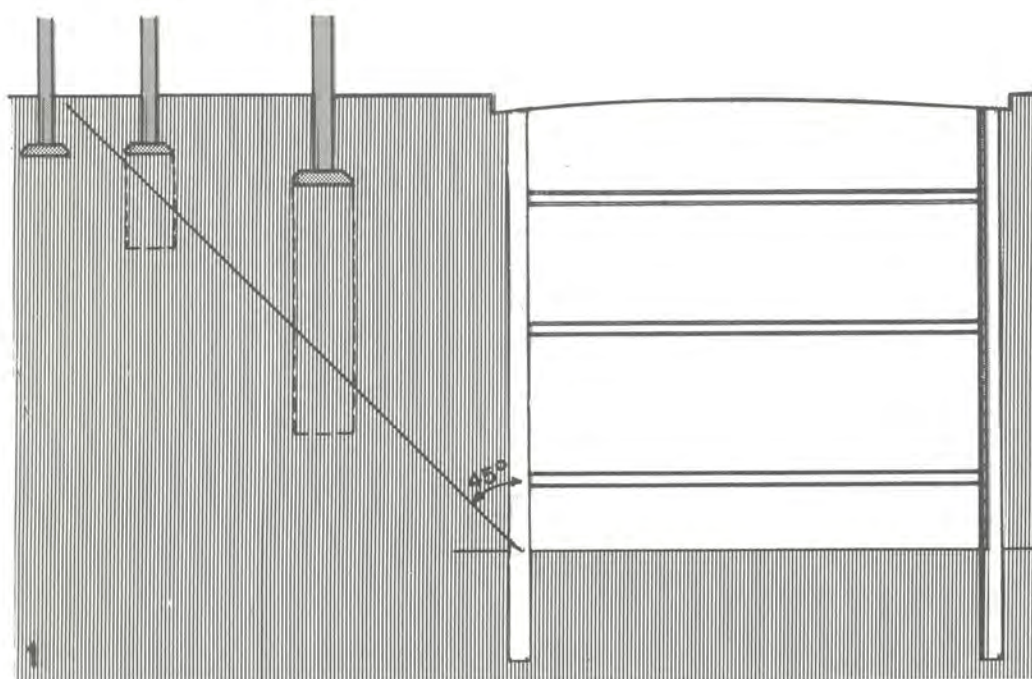
A escolha de uma forma de construção satisfatória, tanto do ponto de vista estético como do técnico, a qual depende do método de construção, representa uma das mais importantes decisões do projetista. Desde as primeiras construções de vias elevadas, o progresso da técnica desenvolveu três métodos que se distinguem entre si pelos respectivos materiais utilizados e que a seguir serão submetidos à apreciação crítica.

Fig. 16.30
Trecho elevado: estrutura mista
aço-concreto

Fig. 16.31
Trecho elevado: estrutura de concreto armado

Fig. 16.32
Trecho elevado com desvio de linha

Fig. 16.33
Recalçamento de estruturas



16.33

16.3.1. Vias elevadas construídas de aço

Os elevados mais antigos, na Europa e nos E.U.A., foram construídos de aço. Pela técnica de então, somente uma construção em aço podia atender às grandes exigências de um sistema elevado; oferecia-se uma solução alternativa por viadutos de alvenaria.

Em parte, porém, esses métodos foram substituídos por novas modalidades de construção, mais vantajosas, tanto pelas suas possibilidades estéticas, como do ponto de vista técnico-econômico.

Como uma das desvantagens principais da construção de aço, destaca-se seu poder de transmissão de ruídos, trazendo desconforto aos passageiros e aos moradores das vizinhanças.

Além disso, os custos da construção em aço somente se tornam competitivos com as da construção de concreto armado, em países com parque manufatureiro próprio, onde se possa contar com um amplo programa de produção de aço e onde exista um correspondente nivelamento de preço. Não são estas as condições atualmente vigentes no Brasil.

Sobre a construção de aço recaem, além disso, custos periódicos de manutenção com limpeza e renovação da pintura, bem como pela inspeção dos elementos de conexão.

Outro fator que freqüentemente resulta em custos adicionais, é o difícil acesso aos elementos de aço para a manutenção, devendo, portanto, ser utilizados aços altamente resistentes à corrosão.

16.3.2. Vias elevadas de construção mista de aço e concreto (Composite Steel Concrete System)

Um tipo de construção que satisfaz tanto as exigências estéticas como as técnicas, é o sistema composto de aço e concreto, o qual tem sido aplicado nos últimos dez anos, principalmente em pontes e em elevados; esse método futuramente também encontrará justificativa nos casos em que puder competir economicamente com os sistemas modernos da construção de concreto. (Fig. 16.30).

Nesse sistema de construção, estruturas mistas de concreto e aço formam conjuntamente a estrutura de sustentação, sendo que, em geral, vigas de aço fechadas sustentam uma via de rolamento de concreto.

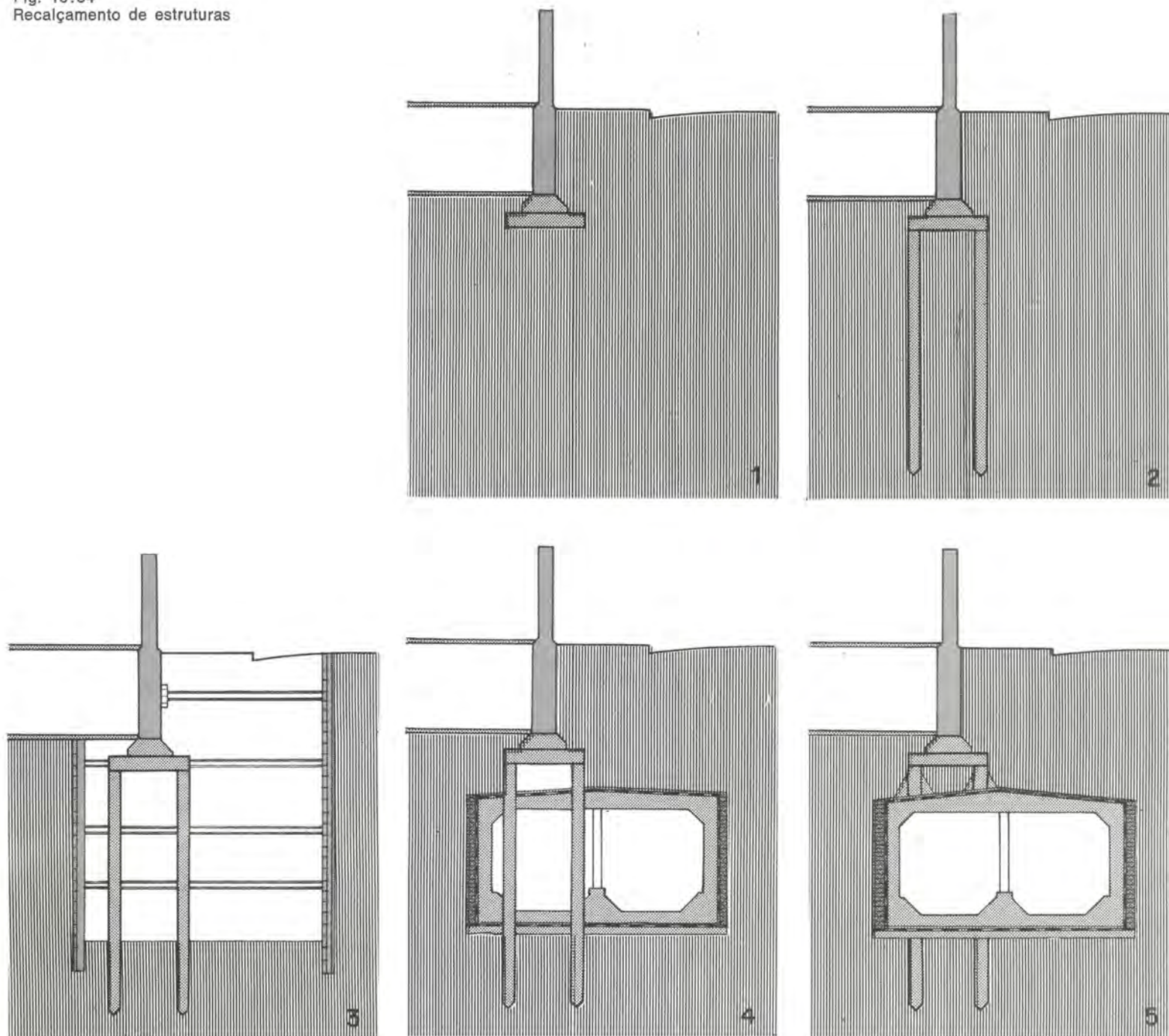
Essas estruturas têm pesos próprios menores, possibilitando maiores vãos livres, e assim permitem maior flexibilidade ao projeto. Além disso, nesse tipo de construção, a estrutura poderá acompanhar devidamente a curvatura do traçado.

A viga de aço fechada possibilita uma forma nítida e alongada da via elevada, mantendo-se uma altura de construção das mais reduzidas.

A superfície fechada e lisa dessa viga pode ser facilmente protegida por pinturas duráveis e assim os custos de manutenção, comparados com os da construção em perfis de aço, podem ser diminuídos consideravelmente.

Por outro lado, é praticamente eliminado o problema da transmissão de ruídos.

Fig. 16.34
Recalçamento de estruturas



16.34

16.3.3. Vias elevadas de concreto armado

A técnica de construção em concreto, hoje altamente desenvolvida, com os seus processos de protensão, possibilita a execução de construções de elevados com maiores vãos livres inclusive com desvios que preenchem inteiramente as exigências de planificação e técnica de execução. (Figs. 16.31 e 16.32).

O sistema de construção sugerido no pré-projeto e descrito no capítulo 31.2.1.1., no qual elementos pré-fabricados de concreto protendido são montados em pilares moldados no local, atende perfeitamente aos critérios estéticos e técnicos, tendo em vista as condições existentes no Brasil e em São Paulo.

- A construção do elevado proposto, tem uma forma bem definida e esbelta, que é salientada através da redução máxima possível da altura das vigas de sustentação e da altura dos trens.
- Os elementos de construção em concreto protendido são, de todos os citados, os de menor poder transmissor de ruído; o índice de ruído previsto é muito reduzido.
- Os custos de construção deste tipo de estrutura são os mais baixos de todos os outros sistemas anteriormente descritos.
- Esse sistema de construção quase não requer custo de manutenção da estrutura.
- As distâncias entre apoios alcançadas com esse sistema de construção são suficientes para as

exigências de planificação; através de medidas especiais podem ser ainda aumentadas em caso de necessidade.

16.4. Processos para proteção e reforço de construções

Durante as construções para o metrô, muitas vezes será necessário tomar providências prévias, para evitar recalques dos edifícios adjacentes às valas de construção ou das edificações sob as quais forem feitas escavações pela máquina de perfuração com couraça.

Além disso, quando parte das construções do metrô passarem por baixo de fundações de edifícios, estes últimos deverão ser devidamente escorados.

Em vista do exposto, passam a ser descritos os métodos técnicos mais usados para proteção e reforço de construções.

16.4.1. Proteção de edificações junto a valas de construção

Na via livre, a largura das valas de construção vai de 11,00 até 14,00 m, sendo que nas áreas das estações aumenta para mais de 20,00 m.

Conforme a largura da rua, a profundidade da vala de construção e o tipo de fundação das edificações laterais, poderão ser necessárias providências para impedir recalques e a conseqüente formação de trincas

nos edifícios adjacentes, (Fig. 16.33). Correm perigo, principalmente, os edifícios com fundações diretas. As construções com estruturas de concreto armado resistem melhor a pequenos deslocamentos do que as construções mais antigas, de alvenaria.

Em muitos casos, principalmente nas edificações baixas, basta como medida de segurança um cuidadoso escoramento da vala de construção com uma eventual compressão das estroncas por meio de macacos. No método Hamburguês, isto poderá ser feito sem dificuldades.

Se, em virtude de edificações laterais muito altas ou pouco sólidas, a flexibilidade das paredes da vala precisar ser reduzida a um mínimo, será preferível aplicar o método de construção Milanês. Devido à grande rigidez das paredes-diafragma e a reduzida deformação elástica das lajes do teto que servem como escoramento, esse método ocasiona um deslocamento lateral mínimo do subsolo.

16.4.1.1. Aprofundamento das fundações

Na escavação das valas a céu aberto, principalmente havendo edificações laterais com fundações pouco profundas, ocorre às vezes que essas valas penetram a zona de influência de tais fundações.

Se as edificações laterais forem sensíveis a recalques, e não sendo instaladas paredes de vala resistentes a deformações — tais como paredes -diafragma — o risco de recalque poderá ser reduzido através do aprofundamento das fundações dos

Fig. 16.35
Impermeabilização do solo por injeções

Fig. 16.36
Impermeabilização do solo por injeções

próprios edifícios até um nível adequado.

Esse novo nível das fundações deverá ficar a uma tal profundidade, que sua zona de pressão chegue a atingir apenas uma pequena parte da vala do túnel, ou, até mesmo, nem chegue a atingi-la.

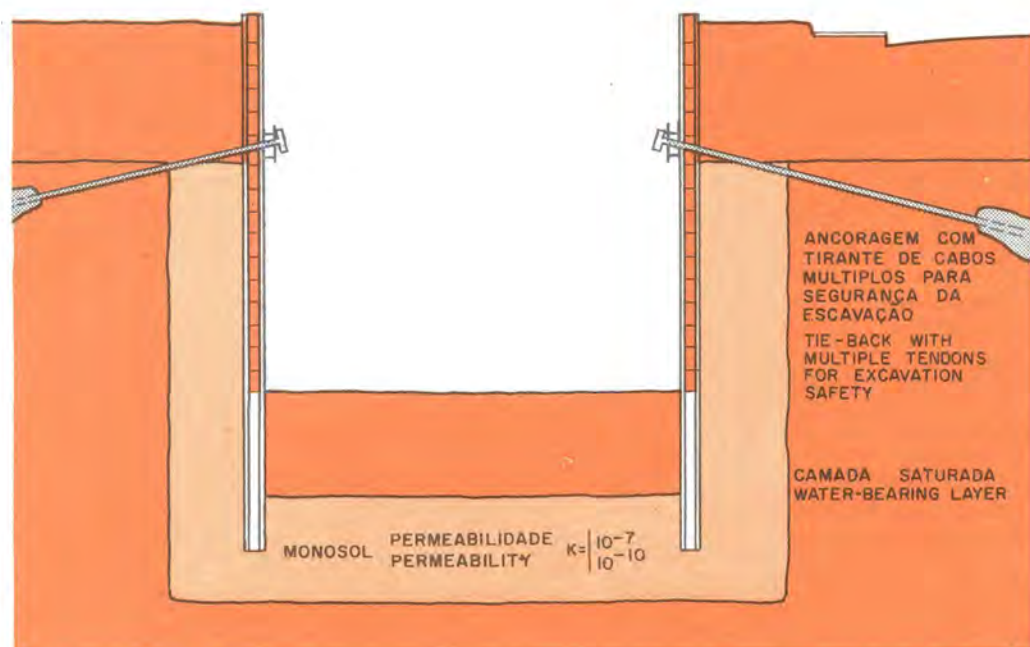
16.4.1.2. Fundação através de colocação posterior de estacas

Havendo grandes cargas de edifícios e, em maior profundidade, camadas de sub-solo com capacidade de carga, ou então, existência de águas subterrâneas no sub-solo, serão utilizadas estacas prensadas ou moldadas para suportar as cargas no local. Estacas de ambos os tipos necessitam de pouco espaço de trabalho, sendo, portanto, muito adequadas para este serviço.

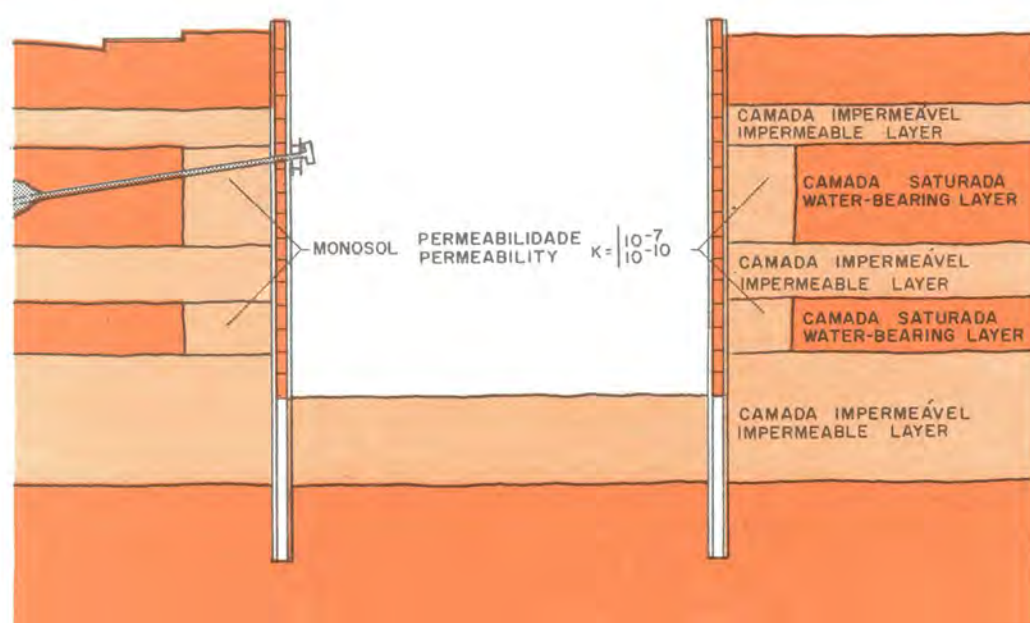
Nas fundações de estacas moldadas no local, freqüentemente uma série destas é colocada a partir da calçada e uma outra dentro do edifício, utilizando-se de preferência as áreas dos porões eventualmente existentes.

As cargas dos edifícios são transferidas para essas estacas através de vigas transversais acima das cabeças das estacas, (Fig. 16.34). Para impedir recalques e uma eventual formação de trincas, antes de receber a carga dos edifícios, as estacas são submetidas a provas de carga e colocadas sob uma pressão correspondente à sua futura condição de trabalho.

Em alguns casos apropriados, procede-se também à perfuração das fundações, de forma que as estacas moldadas no local sejam colocadas



16.35



16.36

diretamente abaixo das fundações a serem escoradas. Não serão mais necessárias então as vigas transversais para apoio da fundação. Esse método se aplica principalmente para escoramento de edifícios mais antigos, que já apresentam danos provenientes de recalques.

As estacas cravadas por pressão estática, muito usadas nos E.U.A., consistem quase sempre em seções pré-fabricadas de concreto armado, cravados sucessivamente por meio de macacos hidráulicos apoiados no próprio edifício existente. As partes das estacas, que quase sempre têm forma circular, possuem um tubo de guia central; seu comprimento varia de 0,50 m a 3,00 m. Para aplicação do macaco, deverá ser aberta uma fenda lateral abaixo da fundação, exigindo, eventualmente um escoramento provisório através de estroncas inclinadas. As estacas assim cravadas por simples pressão sempre foram de grande eficiência, principalmente havendo águas subterrâneas. Na construção do Metrô de Nova Iorque foram utilizadas também seções de tubos de aço em vez dos elementos pré-fabricados de concreto armado. As seções desses tubos têm cerca de 1,20 m de comprimento e seu diâmetro varia entre 25 e 45 cm. Após alcançar a camada resistente do sub-solo, a terra no tubo é removida do interior do tubo por garras múltiplas, aparelhos especiais de perfuração ou por processo hidráulico, procedendo-se então à concretagem do tubo. Após a cura do concreto a estaca completa é carregada novamente com 1 1/2 vezes sua carga prevista de trabalho e o espaço entre a cabeça da estaca e a fundação existente é preenchido com uma sapata de concreto.

16.4.2. Segurança dos edifícios sob os quais passará o metrô

Geralmente não serão necessárias medidas especiais de segurança para proteger os edifícios contra recalques, quando a profundidade dos túneis é suficientemente grande. Como não será possível evitar desagregação do solo na frente da couraça durante a escavação, dever-se-á contar com pequenos recalques, que, todavia, não representam perigo. A situação se torna mais crítica, quando a distância entre o topo da couraça e as fundações dos edifícios — fundações diretas ou ponta das estacas — diminui de tal forma, que alcança a zona de influência das tensões transmitidas ao solo. Neste caso, serão necessárias via de regra, providências para consolidação do terreno, que dependerão primeiramente das condições locais do solo e do nível freático.

Os princípios referentes a estas medidas de segurança — processos químicos ou congelamento — para o método de avanço com couraça estão tratados pormenorizadamente nos capítulos 16.4.2.1. e 16.4.2.2.

A passagem, sob edifícios existentes, com construção em vala aberta não será usada em São Paulo, já que o traçado escolhido seguirá geralmente o traçado das ruas, ou passará por áreas pouco edificadas — onde nenhuma demolição será muito dispendiosa — ou passará a suficiente profundidade sob edifícios de alto valor, para que o uso de um método de construção "fechado" (método de couraça) seja possível.

Nos poucos casos de exceção, aplicam-se os mesmos métodos de

escoramento e segurança, que foram descritos no capítulo 16.4.1.

16.4.2.1. Consolidação do solo por meio de injeções

Nas construções de metrô é freqüente o uso de injeções de material fluido nas camadas do solo, para reforço de fundações, vedações e execução de passagem sob construções existentes. Denomina-se injeção o processo de introduzir por pressão, calda de cimento ou solução de silicato no solo, na zona de trabalho, por meio de perfurações — (Figs. 16.35 e 16.36). Estas suspensões ou soluções penetram no solo e endurecem, fazendo com que ele se consolide. Como esta consolidação depende muito de uma boa dispersão no solo, o material injetado deverá ter boa penetrabilidade e viscosidade adequada. Os materiais para injeção têm viscosidades entre 3 000 cP para a calda de cimento e 3—5 cP para as soluções de monodur. O limite mínimo para injeções está na permeabilidade de $k = 10^{-4}$ cm/s.

Caso seja necessária somente uma impermeabilização, havendo forte pressão de água, recomenda-se o uso da solução Monosol. Esta solução tem a viscosidade de 1,2 cP, o efeito impermeabilizante é perto de $k = 10^{-7}$ cm/s.

Existem boas condições para injeções, quando a curva de distribuição granulométrica em escala logarítmica se apresenta bastante inclinada e a porcentagem dos grãos procedentes de zonas silíticas for inferior a 20% (Tamanho dos grãos menor que 0,60 mm).

A presença de argila (com granulometria menor que 0,002 mm) em geral não permite o uso do processo de injeções (vide distribuição granulométrica logarítmica).

A disposição variável de camadas sedimentares de curvas granulométricas muito diversas e os diferentes graus de compacidade de sedimentação influem também na consolidação homogênea, porém não oferecem nenhum impedimento considerável, se as condições acima forem satisfeitas.

Como demonstram as curvas de distribuição granulométrica das amostras das sondagens n.º A 1 até D 11 na área do Metrô de São Paulo, 40% das camadas encontradas, devido ao seu conteúdo mínimo de silte, poderão ser consolidadas por meio de injeções. A presença de argila em várias amostras parece entretanto diminuir esta porcentagem. Porém, não se deve afastar a possibilidade de, em condições favoráveis do solo, consolidar ou reforçar fundações, localmente, com auxílio de injeções, sem maiores problemas. Uma decisão acertada neste sentido só poderá ser tomada depois da análise de amostras retiradas do próprio local a ser tratado.

16.4.2.2. Processo de congelamento

O processo de congelamento é uma medida que se toma, para consolidar temporariamente o solo, visando à formação de uma espécie de abóbada, na região do corte transversal do túnel. Essa abóbada congelada tem o objetivo de impedir desmoronamentos indesejáveis; atritos laterais exagerados na couraça; escorregamentos na frente de trabalho

e, principalmente, recalques inadmissíveis.

O comprimento dos trechos congelados é limitado pela distância em que os furos horizontais podem ser executados na direção de avanço. Tendo em vista as características dos solos de São Paulo, que apresentam boas condições para execução de perfurações e boa penetrabilidade, este limite deverá alcançar cerca de 50,00 m.

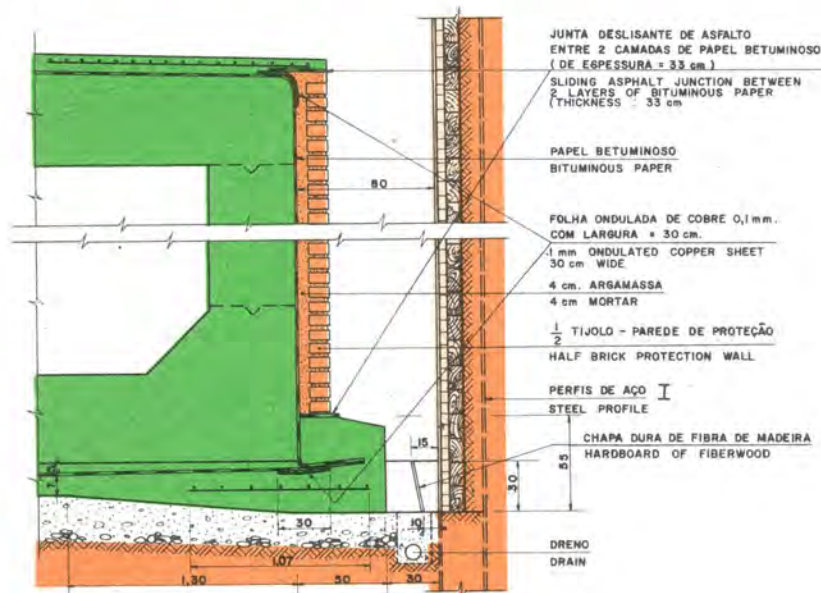
A abóbada congelada consiste num segmento circular. Apesar de, por motivos estáticos, uma forma parabólica ser mais adequada, as razões técnicas (distância pequena do teto do túnel até à ponta das estacas e maior escavação do teto do túnel para a câmara de perfuração) recomendam, para congelamento, uma seção circular para iniciar as perfurações. Os tubos de congelamento (segundo experiências anteriores, recentemente fabricados com 100 mm de diâmetro) serão colocados em distâncias de aprox. 1,25 m em forma de arco, numa distância radial da borda externa do túnel, de cerca de 1,00 m. Uma abóbada congelada numa extensão de arco $r \cdot \pi$ sendo r o raio da seção mestra do túnel é formada por 12 desses tubos de congelamento.

O avanço da couraça será interrompido, à uma determinada distância de onde se prevê existirem fundações, de forma a evitar tensões adicionais no solo, as quais dificultariam o alargamento e a segurança da seção transversal da câmara de perfurações (dependendo do ângulo de atrito e da posição das estacas, cuja localização poderá eventualmente ser determinada por ultrassom). A câmara de perfuração deverá exceder em cerca de 1,00 m o raio do círculo definido pelos elxos dos tubos de congelamento, e ter um comprimento aproximado de 4,00 m. O diâmetro da escavação para a câmara de perfuração alcançará assim 10,60 m, tornando-se necessária uma estrutura de aço reforçada. A frente de trabalho terá que ser escorada contra o empuxo de terra. A câmara de perfuração, eventualmente, poderia ser adaptada como eclusa intermediária do túnel, sendo a única a permanecer sob elevada pressão de ar. Desta forma ficaria facilitada a eclusagem no início da escavação do túnel, e a vedação na penetração das tubulações do equipamento congelador. Além disso, a climatização da galeria seria menos problemática (ar quente e úmido, para compensar o esfriamento causado pelos tubos de congelamento). O aparelho gerador de frio é uma instalação pequena, facilmente transportável, podendo eventualmente ser instalado no próprio túnel, o que dispensaria volumosas instalações para perfurações; somente seria necessário então instalar as canalizações de água para refrigeração.

O tempo de congelamento depende, em princípio, da espessura da abóbada congelada que se pretende formar. O conteúdo natural da água das camadas do solo, seu coeficiente de condutibilidade térmica e eventuais movimentos da água subterrânea são fatores que influem, igualmente, no processo de congelamento. As águas analisadas em São Paulo não apresentam propriedades restritivas ao processo de congelamento. A propagação da congelação ao redor de um tubo de congelamento depende da duração do congelamento e obedece a uma



16.37



16.38. A

lei logarítmica. Calcula-se que para congelar uma abóbada semi-circular de 2,00 m de espessura, sejam necessários aproximadamente 40 dias; todavia, serão possíveis variações de até 50%, pois nos solos argilosos a propagação do congelamento é lenta.

Conforme foi mencionado anteriormente, a combinação do processo de congelamento com uma couraça mecanizada, não é aconselhável. Uma couraça comum, reforçada, construída de forma que possa ser ligado à câmara de perfuração e, mais tarde, avançada, após o congelamento do solo, é mais adequada.

Os trabalhos de avanço provavelmente serão dificultados, devido a ocorrência de partes congeladas do solo, que entram no perfil da couraça e deverão ser partidos a picareta. Deverão ainda ser considerados os empuxos nas juntas e no fundo da galeria, e nesse sentido, seria conveniente iniciar com o assentamento de um segmento especial na base do túnel. Se possível, o avanço não deverá ser interrompido, para evitar que a aderência da água congelada à face externa da couraça impeça ou dificulte o avanço.

Em solos que, por serem sensíveis a este tratamento, sofrerem empolamento, o degelo poderá causar recalques. Por este motivo, ao lado dos tubos de congelamento, que permanecerem no solo, (depois de concluído o processo de congelamento, esses tubos serão fechados com argamassa de cimento), deverão ser instalados tubos especiais, através dos quais poder-se-á injetar, continuamente, material adequado durante o processo de degelo.

Como alternativa, os tubos de congelamento (não fechados com argamassa de cimento) poderão ser perfurados a tiro, servindo então como tubos para injeções. O comprimento útil de alcance de um trecho congelado, é calculado em 35 a 40 m. Nos casos em que o congelamento precise ser executado num trecho maior, deverá ser instalada uma nova câmara de perfuração, em local ainda protegido pelo primeiro congelamento, dando-se assim início a um novo trecho de congelamento.

Apesar de parecer vantajoso o uso do processo de congelamento para se obter segurança temporária de algumas estruturas o mesmo não é aconselhável, pois o processo de congelamento e posterior degelo provocam alterações volumétricas. Nestes casos, recomenda-se uma ancoragem, conforme está descrito no capítulo 16.1.6.

16.5 Impermeabilização dos túneis

Sempre que as linhas subterrâneas passem por zonas de águas subterrâneas será necessário encontrar métodos que impeçam a invasão das obras por essas águas. O método convencional e mais eficiente para a obtenção dessa proteção é a colagem de feltro betuminoso de vedação sobre a face externa da construção. Novos processos, aliás, ainda não suficientemente experimentados na construção de metrô, prevêm o emprego de laminados plásticos em vez de feltro betuminoso.

Além disso, nos últimos anos, foram realizadas diversas obras de metrô — maior parte fora das estações — com concreto impermeável à água, onde a execução duma impermeabilização externa foi dispensada.

16.5.1. Impermeabilização de galerias construídas a céu aberto

Os materiais utilizados para a impermeabilização são em geral o feltro embebido em betume, mantas de tecido de juta também embebidas em betume ou laminados de fibra de vidro. Em lugar do feltro alcatroado anteriormente utilizado, usa-se hoje feltro betuminado e betume como material impermeabilizante, pois esse produto amolece mais facilmente e é menos quebradiço. Assim é que a matéria prima mais utilizada hoje é o papelão-feltro de lã não recoberto, de cerca de 500 g/m² de peso. Esse feltro é embebido no mínimo com o seu próprio peso, de betume. O perigo de apodrecimento é assim eliminado e aumentadas a resistência à tração e a elasticidade. Feltro betuminoso só deve ser trabalhado com material colante betuminoso, pois a capacidade de aderência do betume é diminuída por óleos à base de alcatrão. Os métodos de execução da impermeabilização dependem consideravelmente do método escolhido para a abertura do túnel.

16.5.1.1. Impermeabilização de galerias construídas pelo método Berlinesse

A impermeabilização da laje inferior da galeria se faz estendendo-se três ou quatro camadas de feltro

Fig. 16.37
Impermeabilização de paredesFig. 16.38 A
Detalhes de impermeabilização

betuminoso com o respectivo número de camadas de impermeabilizante aplicadas por pintura. Neste caso, a matéria colante betuminosa deve ajustar-se perfeitamente aos requisitos da obra e às condições climáticas. Finalmente, o isolamento da laje inferior será protegido contra estragos por uma camada de concreto. Passo seguinte será a colocação de uma fina parede de concreto contra os pranchões de madeira laterais. Depois de passar uma mão de pintura sobre esta, será colado o impermeabilizante das paredes laterais.

O processo adotado aqui é o de derramar o material colante e comprimir com rolo (Fig. 16.37). Este método diferencia-se do processo usual de pincelar, pelo fato de se comprimir o feltro betuminoso com o rolo, de baixo para cima e, ao mesmo tempo, derramar uma cola betuminosa especial, entre o feltro e o concreto.

Deve-se cuidar em arredondar suficientemente todos os cantos da obra a fim de se conseguir uma boa colagem do impermeabilizante no concreto. Além disso deve-se superpor uma tira de cobre corrugado de 0,8 cm de espessura como reforço.

Entre a laje inferior e a camada protetora de concreto das paredes deve ser prevista uma junta de deslizamento, de modo que, uma vez retirado o escoramento, a pressão da terra comprime a camada protetora contra a parede, submetendo o impermeabilizante à compressão necessária.

O impermeabilizante do teto do túnel será colado por processo de pintura e protegido com uma camada de

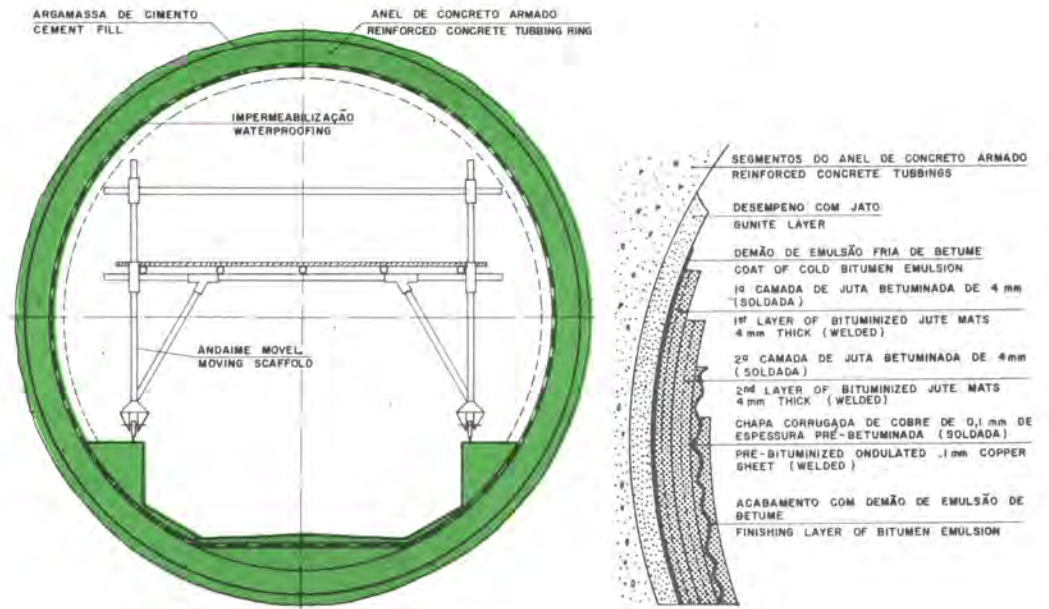
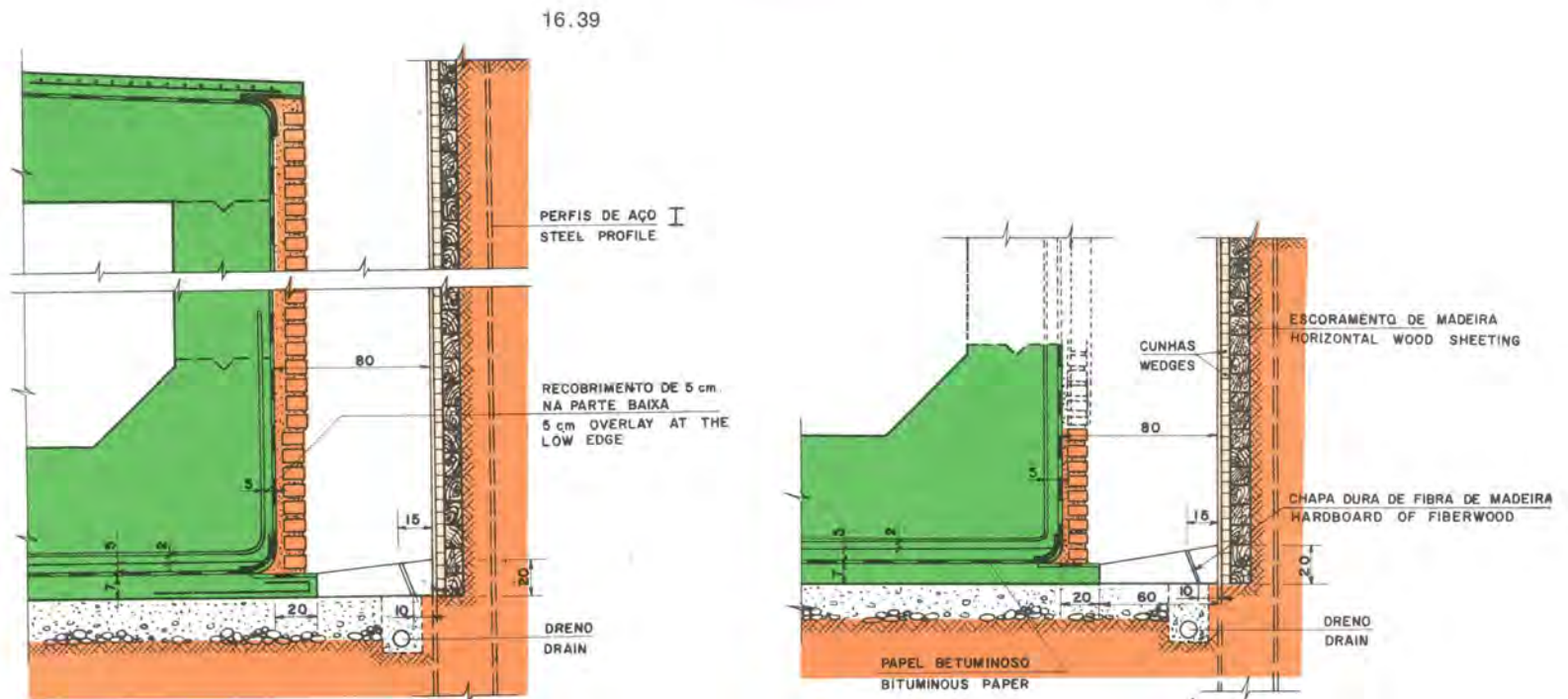


Fig. 16.38 B
Detalhes de impermeabilização

Fig. 16.39
Detalhes de impermeabilização



16.38 B

concreto contra danificações mecânicas.

16.5.1.2. Impermeabilização de galerias construídas pelo método Hamburguês

Esse processo é realizado com área lateral de serviço, de modo que foram desenvolvidos métodos especiais para a execução da impermeabilização das paredes e sobretudo para a junta de impermeabilizante da laje inferior com o impermeabilizante das paredes.

A execução da impermeabilização da laje é feita da mesma maneira que no método Berlinense. Na junção entre as vedações da parede e do fundo são utilizados dois processos: por intermédio de junta invertida ou com construção auxiliar em forma de caixaõ.

Como mostra a fig. 16.38 A para a execução da junta invertida a impermeabilização da laje inferior é prolongada cerca de 40 cm para fóra.

Essa faixa para fóra da obra propriamente dita é coberta com uma camada protetora especial. Depois de acabada a concretagem das paredes e do teto, a camada protetora é retirada e feito um cuidadoso exame das possíveis danificações do impermeabilizante. Somente então é executada a impermeabilização das paredes exteriores diretamente sobre a obra acabada, começando-se pela conexão com a faixa exterior da laje do fundo.

Neste caso utiliza-se o método dito de derrame e compressão com rôlo. Para proteção da impermeabilização constrói-se então uma parede de

meio tijolo. Entre essa parede protetora e a parede de concreto impermeabilizada deve ficar uma junta de mais ou menos 4 cm de espessura cuidadosamente preenchida com argamassa.

A figura 16.38 B mostra a segunda possibilidade, ou seja a formação de um caixão na base das paredes exteriores. Após à execução da primeira camada de concreto sobre o terreno, eleva-se na junção uma parede de cêrca de um metro de altura, rebocada por dentro. Entre o concreto do fundo e a parede deixa-se uma junta de deslizamento. Segue-se então a impermeabilização do fundo e das paredes até à altura da parede protetora, colocando-se no canto uma tira do refôrço de cobre corrugado.

Depois da execução da nova camada protetora de concreto sobre a impermeabilização da laje inferior e do rebôco das paredes, pode-se iniciar a execução do corpo da galeria. É indispensável o escoramento cuidadoso da parede de proteção contra a pressão exercida, durante a concretagem das paredes da galeria.

Para se executar a junta de impermeabilização das paredes, demole-se então a parte superior da parede protetora, soltando-se assim 40 a 50 cm da camada isolante a ela colada. Limpa-se e testa-se cuidadosamente a faixa de junção e procede-se à colocação da impermeabilização das paredes externas diretamente sobre o obra acabada, pelo método de derrame e compressão com rôlo. A construção da parede protetora de tijolo executa-se da maneira usual. Ambos os processos, quando

executados com cuidado deram bom resultado. Como vantagens para o processo de impermeabilização com junta invertida podemos enumerar:

a) possibilidade de controle perfeito da superfície das paredes externas em toda a sua altura, antes de assentar a impermeabilização.

b) nenhuma danificação da impermeabilização das paredes ao serem colocados a armação e o concreto.

c) a retração do controle da laje inferior já está praticamente terminada, de modo que não poderá haver mais nenhuma diminuição da compressão do isolamento das paredes.

A favor do processo com construção auxiliar em forma de tina pode-se citar:

a) melhor proteção da junta de impermeabilização antes do prosseguimento do serviço de impermeabilização.

b) Certa economia na colocação do concreto da base.
A impermeabilização do teto da galeria é processada da mesma maneira que no método Berlinense.

Últimamente, num trecho de ensaio em Hamburgo, prescindiu-se da cortina de tijolo protetora da impermeabilização das paredes. Para proteção da impermeabilização, colou-se uma camada suplementar de feltro betuminoso do lado exterior ou então uma folha de alumínio betuminado em uma das faces. Para enchimento do espaço entre a impermeabilização da parede e a parede da escavação foi utilizada

areia lavada, cuidadosamente socada. Embora até hoje nenhum reparo tenha sido exigido, a economia obtida parece pequena demais em comparação com o risco de danificações em escavações posteriores, de modo que esse processo não deve ser aconselhado.

16.5.1.3. Impermeabilização com emprêgo de paredes-diafragma

Com relação à sequência dos trabalhos, neste caso o primeiro serviço de impermeabilização é a vedação do teto do túnel logo depois de sua concretagem. Uma vez feita a escavação subterrânea e executada a concretagem de base, pode ser colocada a impermeabilização do piso. As paredes-diafragma servem de camada protetora para a impermeabilização das paredes do túnel. Desde que essas paredes estejam secas, basta eliminar as irregularidades e executar uma camada de rebôco sobre a qual se coloca a impermeabilização pelo método de derrame e compressão com rôlo.

Devido à grande rigidez das paredes diafragma é duvidoso que elas cedam o bastante sob a ação da terra e da água exteriores, para exercer uma suficiente pressão sobre a impermeabilização. É, pois, necessário que, em lugar de feltro betuminoso, normalmente utilizado em outros casos, se empregue aqui outra espécie de material impermeabilizante que não necessite de compressão constante. Com esse intuito foram desenvolvidas mantas especiais com impermeabilizante feitos de tecido de juta. Esse material não é colado com betume quente, mas com o betume da manta amolecido com maçarico.

Além disso, é acrescentado um pouco de betume quente de modo que a camada de betume da manta de juta esquentar-se o suficiente para se ligar com a pintura da superfície. Na segunda camada — com essa matéria prima bastam em geral duas camadas — o amolecimento é feito da mesma maneira. O mesmo se faz com as juntas de trabalho. No caso de qualquer infiltração de água através das juntas da parede-diafragma, deve-se instalar um dispositivo de drenagem, no intuito de se obter a secagem necessária para o prosseguimento da impermeabilização.

16.5.1.4. Impermeabilização quando há emprêgo de paredes de estacas justapostas

A substituição das paredes-diafragma por paredes de estacas justapostas

não exige nenhuma mudança no processo de impermeabilização. Também neste caso é duvidoso que se obtenha a compressão necessária, devido à rigidez da parede. Deve-se pois prever o emprêgo de impermeabilização com manta de juta.

A fim de se obter uma parede de estacas sêca, para o prosseguimento do trabalho, pode ser necessário um dispositivo de drenagem cuidadoso devido às numerosas juntas verticais.

16.5.2 Impermeabilização de túneis executados pelo método da couraça

No caso de emprêgo de anéis de ferro fundido obtém-se, em geral, uma impermeabilização suficiente com tratamento das juntas e respectiva vedação com chumbo, de maneira

que não se torna necessário uma impermeabilização suplementar. Se, contudo, o túnel fôr construído com anéis de concreto armado, torna-se necessário uma impermeabilização suplementar sobretudo nas juntas.

Os túneis que atravessam lençóis de águas subterrâneas exigem uma impermeabilização interna. Esta impermeabilização será protegida por um anel interno de concreto.

Devido ao processo de retração do concreto, o diâmetro desse anel diminuirá, ao passo que, o anel rígido externo não comporta nenhuma possibilidade de deformação.

Faltaria então, no caso de emprêgo de impermeabilizantes de feltro betuminoso, a indispensável compressão permanente. É preciso, pois, que se escolha um processo de

impermeabilização que dispense essa compressão.

Para isso dispõem-se de mantas especiais de tecido de juta e fôlhas de metal.

Para a eliminação de irregularidades, aplica-se uma camada de rebôco na superfície interna dos anéis (Fig. 16.39 e 16.40). Segue-se uma pintura a frio sôbre a qual é colada a primeira camada de manta de tecido de juta com sua camada externa de betume suficientemente aquecida.

Para o trabalho na parte superior do túnel é útil um andaime móvel. Justamente para a impermeabilização do tópo do túnel, o processo por aquecimento deu resultados particularmente bons. As mantas colam-se bem ao concreto, ao passo que o feltro betuminoso normal tende

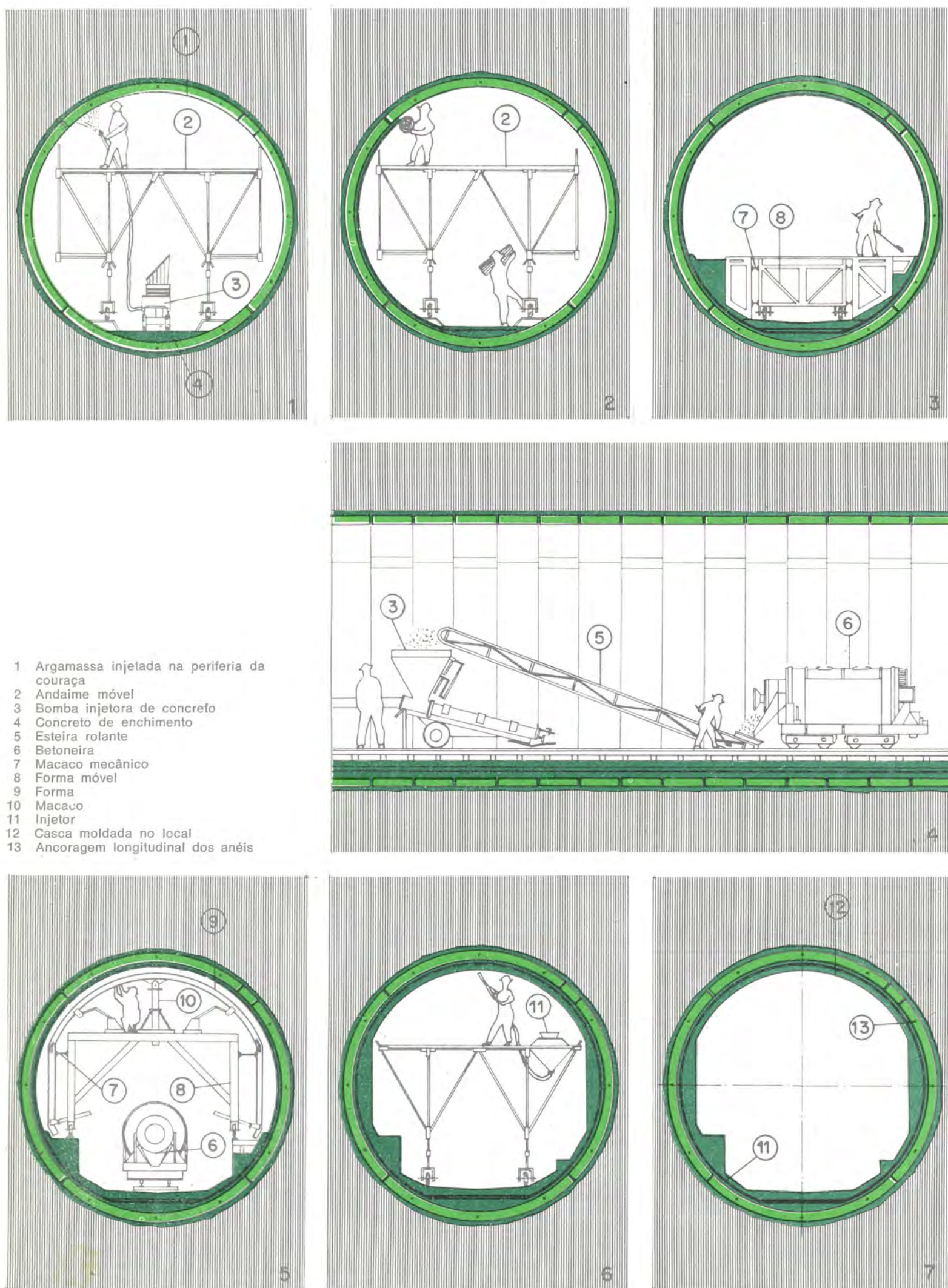


Fig. 16.40
Revestimento interno do túnel

- 1 Desempeno com jato
- 2 Impermeabilização
- 3 Concretagem dos acessos laterais
- 4 Concretagem
- 5 Concretagem da abóbada
- 6 Injeção no tópo
- 7 Túnel terminado

a formar bolhas devido ao próprio peso. A segunda camada é colada sobre a primeira pelo mesmo processo.

Da mesma maneira serão coladas as juntas de impermeabilizante. Este método foi empregado com êxito em um túnel do Metrô de Munique.

No intuito de proteger a impermeabilização contra danificações durante a execução da armação e concretagem do anel interno, na perfuração de um túnel do Metrô de Berlim, colou-se na superfície da camada impermeabilizante uma chapa contínua corrugada de cobre de 0,1 mm de espessura. Essa chapa foi pré-betuminada na fábrica em uma das faces. A junção da impermeabilização de um trecho de túnel com mantas de tecido de juta, à impermeabilização de um trecho de galeria "a céu aberto" com feltro betuminoso, foi realizada sem dificuldades.

Na abertura de um túnel pelo método da couraça, em Hamburgo, foi feita a impermeabilização com folhas de metal coladas. Sobre a argamassa de regularização da superfície foi aplicada a camada usual de pintura, sobre a qual estendeu-se uma camada de feltro betuminoso pelo método de derrame e compressão com rolo, recoberta por uma folha corrugada de alumínio de 2 mm de espessura também pelo mesmo método. Sobre esse revestimento metálico, finalmente foram colocadas mais 2 camadas de feltro betuminoso que completam a impermeabilização. As impermeabilizações descritas de túneis abertos pelo método da couraça foram todas executadas nos últimos anos.

16.5.3. **Emprego de outros materiais impermeabilizantes**

Os laminados de plástico que podem ser empregados para a impermeabilização de túneis são feitos de poli-isobutileno ou então de cloreto de polivinila — PVC.

Na colagem das juntas com tiras de poli-isobutileno constataram-se por vezes deficiências, sobretudo no caso de existência de subpressões de água. Além disso, esse material deve ser protegido com uma camada de feltro contra a ação da argamassa fresca da camada protetora, ou contra o anel de concreto interno no caso de túnel aberto pelo método da couraça.

No caso do emprego de folhas de PVC se pode realizar a colagem das tiras umas com as outras por meio de ar quente. A verificação das juntas soldadas pode ser feita com aparelhos especiais de teste de porosidade.

Nesse processo, as folhas de PVC são coladas sobre o concreto com uma cola plástica e ar quente. As folhas de PVC já são preparadas na fábrica com uma camada protetora externa. Depois do teste com o aparelho de controle da impermeabilidade de todas as juntas coladas, é possível reforçá-las com uma tira suplementar de proteção.

Em lugar de feltro e folhas coladas, existe outro processo de impermeabilização possível, por meio da aspersão de impermeabilizantes. A aspersão de betume, contudo, não deu resultados, pois as fendas inevitáveis de camada protetora provocaram fendas, também, na camada de betume. A resina de poliéster com reforço de fibras de vidro proporcionou bons resultados.

A impermeabilidade da camada aspergida pode ser testada com o aparelho de controle de porosidade. Outra vantagem deste método é que não é necessária uma base regular para a aspersão da resina.

Em razão do alto custo só se escolhem folhas de plástico e aspersão de resina em casos especiais, quando as impermeabilizações usuais à base de betume ou de mantas de tecido de juta não podem ser aplicadas.

16.5.4. **Emprego de concreto impermeável sem impermeabilização especial**

A evolução da tecnologia do concreto e os progressos na mecanização da produção, foram as razões que levaram à adoção do concreto impermeável e à dispensa dos impermeabilizantes colados externamente para as construções de obras de metrô.

Assim é que, na construção do Metrô de Munique, foi executada experimentalmente em trechos livres da via, a construção do corpo da obra em concreto impermeável, sem nenhuma impermeabilização especial. Para melhor controle, o trabalho foi executado com área de serviço lateral como em Hamburgo. Nas áreas das estações não se dispensou, contudo, uma impermeabilização colada externamente.

Em Hamburgo usou-se também concreto impermeável em alguns trechos que só parcialmente mergulhavam no lençol de água subterrânea. Neste caso foi fixado à parede de sustentação de madeira, um leve fôrro de táboas contra o qual

foi executada a concretagem sem deixar espaço de serviço. Outro exemplo é o Metrô de Toronto, onde a utilização de concreto impermeável permitiu igualmente a economia de impermeabilizante externo.

As experiências nas construções acima descritas de concreto impermeável, mostram, além disso, que com este método — no qual é de suma importância executar uma concretagem impermeável e juntas à prova de água — é necessário que se exija das firmas contratadas para sua execução, alta qualificação técnica, instalações mecânicas modernas e absoluta idoneidade.

De maneira alguma deve-se, contudo, dispensar uma impermeabilização externa no caso de água subterrânea agressiva. E este é o caso de muitas zonas por onde deverá passar o Metrô de São Paulo.

17. Isolamento acústico das instalações de metrô

Os ruídos produzidos pelos veículos do metrô em marcha deverão ser reduzidos ao menor nível possível, para que passageiros e moradores das cercanias não sejam molestados. Para que isso seja possível é preciso prever medidas de proteção acústica, que possam manter os ruídos em seus níveis mais baixos.

As ondas sonoras se propagam no ar ou nos sólidos com velocidades proporcionais à densidade do meio.

Ondas sonoras que se chocam contra as superfícies de um aposento, são total ou parcialmente refletidas, retransmitidas ao aposento anexo ou absorvidas pelas paredes.

17.1. Possibilidades de isolamento

A melhor proteção acústica seria evitar a propagação das vibrações produtoras de som. Não sendo isso possível, se deve partir dos seguintes princípios para combate aos ruídos:

- na medida do possível, o ruído já deve ser reduzido na sua origem (superestrutura)
- Deve ser formada uma barreira entre a fonte dos ruídos e os passageiros ou moradores das cercanias (veículo e construção).
- Deve ser absorvido o máximo dos ruídos (revestimentos acústicos).

De acordo com o tipo de propagação do som, através dos sólidos ou do ar, diversas são as providências a serem tomadas.

A propagação nos sólidos, pode ser amortecida ou deve ser impedida.

O amortecimento é obtido, aplicando ao corpo vibratório massa que, por suas propriedades físicas, transforma a energia vibratória em calor. A propagação do som é impedida por interposição de elementos apropriados que interrompem a propagação da onda.

Na propagação pelo ar procura-se moldar as superfícies atingidas pelo som segundo formas capazes de favorecer a difusão do ruído ou revesti-las de materiais, hoje altamente difundidos, capazes de absorver a energia das vibrações.

Na maior parte dos casos, as medidas acima citadas são aplicadas conjuntamente. Um exemplo notório são os chamados fôrros acústicos,

onde, por meio de disposições apropriadas da superfície, a reflexão do som é reduzida, sendo amortecida a sua propagação, através dos sólidos, mediante o emprego de materiais adequados.

17.2. Processo de isolamento acústico

Processos para redução do nível de ruídos são dispendiosos, motivo pelo qual exigem um planejamento cuidadoso.

Deve distinguir-se, no caso, as medidas a serem tomadas imediatamente durante a construção, visto que mais tarde seriam muito onerosas ou mesmo impossíveis, e medidas realizáveis posteriormente, sem maiores despesas.

De acordo com esses pontos de vista e com os princípios básicos anteriormente apresentados, deverão ser estudados os elementos de construção, tanto para a via (infra-estrutura), como para o material rodante. Nos capítulos seguintes, a respeito da construção da infra-estrutura (Cap. 30.1) e do carro (Cap. 40.3), o problema do combate ao ruído será tratado pormenorizadamente, motivo pelo qual uma descrição detalhada aqui não é necessária. Uma manutenção cuidadosa da superestrutura e dos veículos garante o baixo nível conseguido através da construção. A uma velocidade de 333 m/s o som produzido num trecho de túnel é refletido de 50 a 500 vezes/s no espaço entre o veículo e a parede do

túnel. Seria, pois, conveniente revestir as partes inferiores do túnel, isto é, nas proximidades das principais fontes de ruído entre rodas e trilhos, com material acústico adequado.

Nas estações, os passageiros estão diretamente expostos aos ruídos produzidos pelas rodas e trilhos, em contraposição com os passageiros que se acham nos veículos fechados. É verdade que nas áreas das estações a velocidade dos trens é menor e portanto também o ruído correspondente. Em contrapartida são produzidos ruídos suplementares provenientes da frenagem e do arranque. As sólidas paredes de concreto armado das estações refletem esses ruídos quase que sem amortecimento algum, de maneira que também aqui é aconselhável o emprego de revestimento absorvente de som.

17.3. Exemplos de isolamento acústico adotados por empresas de metrô

Nos anos de 1963-64 a pedido da agência norte-americana "National Capital Transportation Agency" foi efetuada uma pesquisa comparativa sobre os ruídos e vibrações que se produzem nos trens operando em subterrâneos. Entraram nesse confronto linhas de metrô da América do Norte e inúmeras linhas européias.

Nessas pesquisas foram obtidas as seguintes intensidades de ruído, medidas em "phon" no interior de trens subterrâneos correndo a uma velocidade de 48 km/h:

Filadelfia	103	Toronto	90
Nova Iorque	98	Paris (com pneumáticos)	89
Chicago	98	Hamburgo	87
Boston	97	Berlim	85
Londres	93		
Estocolmo	92		

Acham-se, pois, os metrô dos E.U.A. entre os mais ruidosos, enquanto que os de Toronto, Hamburgo, Berlim e os das linhas de trens montados sobre pneumáticos, em Paris, são os mais silenciosos. É de se notar que o processo adotado em Paris, rodas pneumáticas sobre faixas de concreto, processo este de realização e manutenção, sem dúvida dispendiosas, não oferece nenhuma vantagem, no que tange ao ruído, sobre as instalações normais com rodas de aço sobre trilhos, como em Toronto, Berlim e Hamburgo.

Nas estações foram medidas a intensidade de ruído, em "phon", na chegada e partida dos trens.

	Chegada	Partida
Nova Iorque	108	103
Lisboa	110	109
Chicago	106	99
Paris com rodas de aço	108	106
Paris com pneumáticos	101	93
Estocolmo	103	100
Hamburgo	105	95
Berlim	98	92
Toronto	96	93

Também aqui os Metrô de Berlim e de Toronto acham-se entre os menos ruidosos. Cumpre, portanto, investigar quais foram as medidas especiais adotadas nessas cidades para o combate ao ruído, com a finalidade de adotá-las no Metrô de São Paulo.

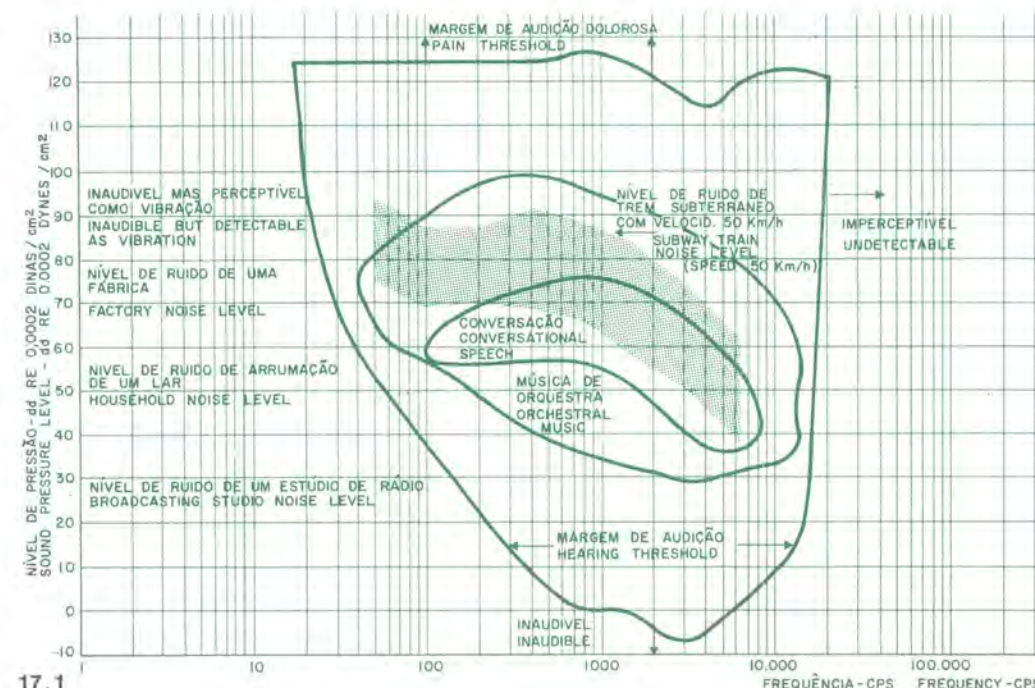
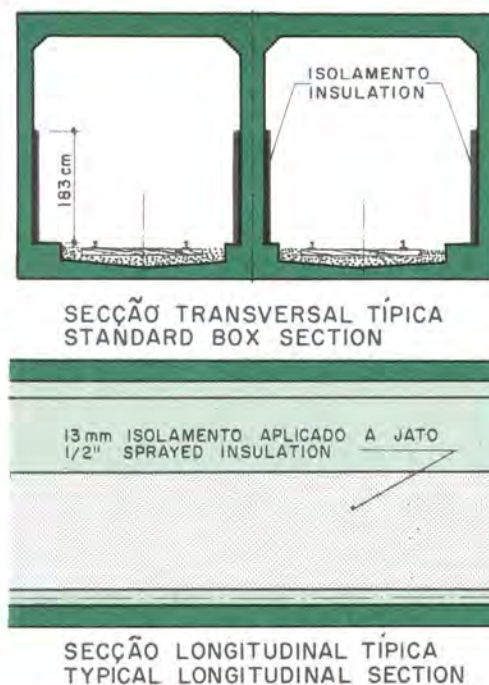


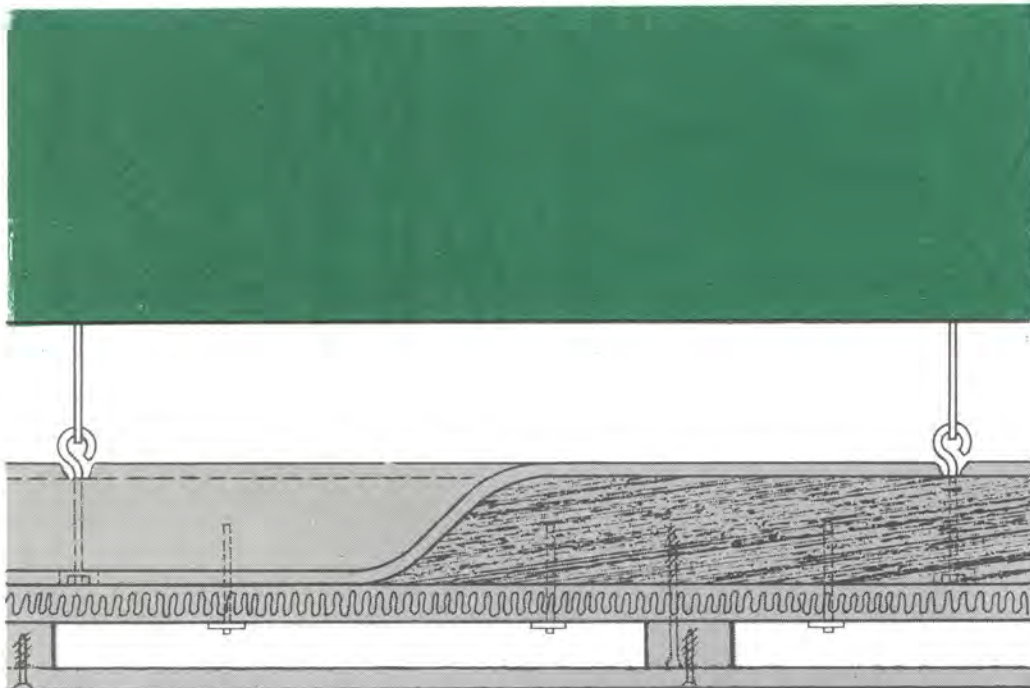
Fig. 17.1
Ordens de grandeza de nível sonoro

Fig. 17.2
Construções acústicas

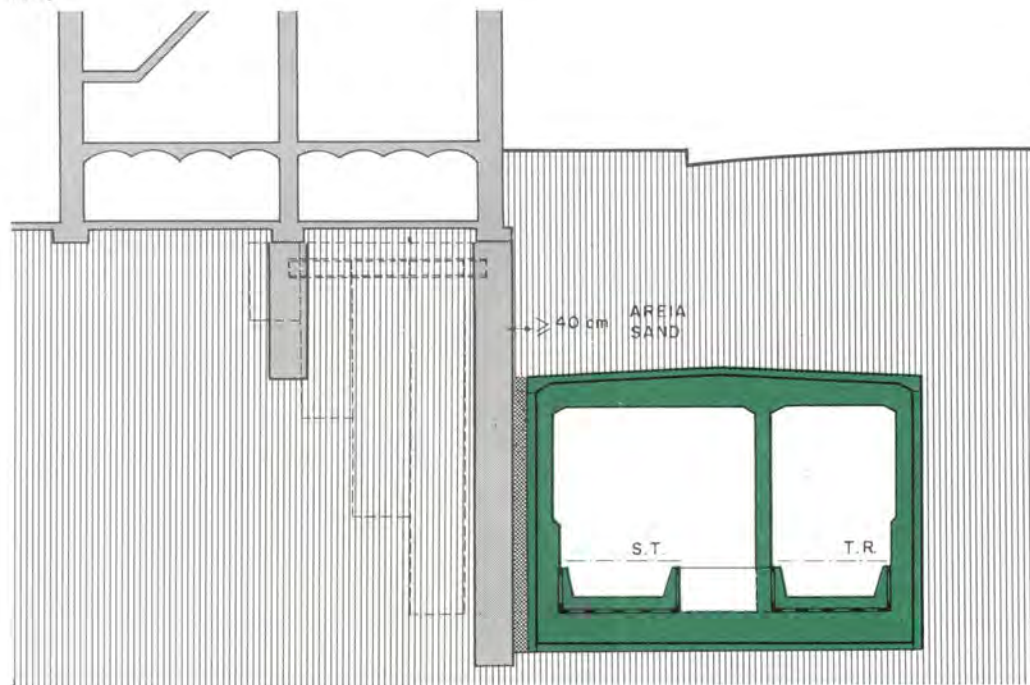
Fig. 17.3
Fôrro falso para absorver ruídos



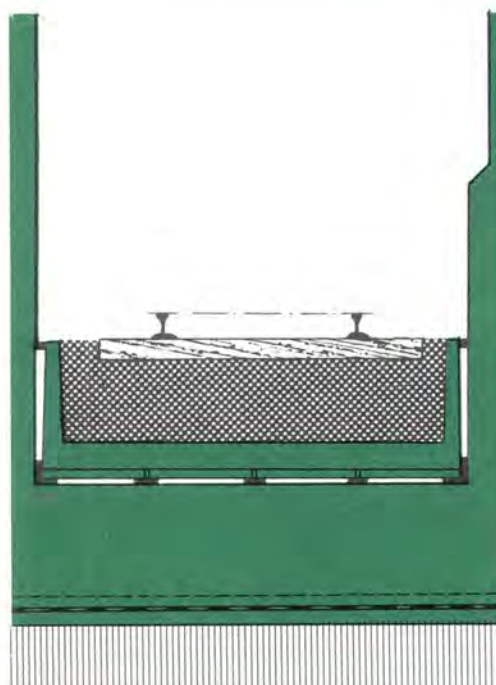
17.2



17.3



17.4



17.5

Fig. 17.4
Construção especial para absorver ruídos e vibrações

Fig. 17.5
Detalhe da Fig. 17.4

17.3.1. Isolamento acústico no Metrô de Toronto

No intuito de minimizar os ruídos na sua origem, se utilizou, amplamente, a soldagem dos trilhos e providenciou-se a retificação freqüente das rodas para garantir uma superfície de rolamento uniforme. Além disso, os patins dos trilhos foram assentados sobre placas de borracha de meia polegada para atenuar as vibrações transmitidas à infra-estrutura das vias.

Como barreira entre as fontes de ruído e os passageiros, isolou-se o pavimento dos veículos por meio de placas de compensado, recobertas de alumínio, e com chapas de amianto vinílico. Paredes e teto não foram isolados. As janelas não podem ser abertas. Ar condicionado é fornecido por um sistema especial de ventilação.

Na redução do ruído transmitido pelo ar seguiu-se o princípio fundamental de que os materiais absorventes de som devem ser instalados o mais próximo possível da respectiva fonte.

Assim, as paredes dos túneis foram revestidas até a altura de 1,80 m com uma camada de meia polegada de espessura de fibra de amianto aplicada a pistola. (Fig. 17.2). Nas áreas das estações o revestimento foi aplicado até a altura da face inferior da plataforma e na parte inferior do balanço das plataformas.

17.3.2. Isolamento acústico no Metrô de Berlim

Em princípio, no Metrô de Berlim não foram tomadas medidas anti-ruído em plena via no corpo da obra propriamente dito. Não há, pois, nesses trechos, nenhum revestimento absorvente de som. A produção de ruídos é diminuída pela manutenção cuidadosa da superestrutura de dormentes de madeira sobre lastro de pedra britada, cujas facetas, irregulares, concorrem para a difusão das vibrações e pela soldagem dos trilhos. Os veículos se distinguem pelo amplo emprêgo de suspensão e amortecedores de borracha, bem como por um cuidadoso isolamento dos vagões com aplicação de placas isolantes e revestimentos de amianto e cortiça aplicados a pistola.

Nas estações foram tomadas diferentes medidas para absorção do som. Em alguns casos as paredes e o teto foram tratados com um produto amortecedor de som à base de betume. Em outros casos se revestiram as partes inferiores das plataformas, como foi feito em Toronto. A título de experiência, foram colocadas, ainda, entre as linhas, blocos absorventes de som, de concreto poroso. Num trecho, recentemente construído ao sul da cidade, foram instaladas em parte ou na extensão total das estações, fôrros sobrepostos para absorção de som, feitos de lâminas leves de madeira e folhas de fibra (Fig. 17.3).

17.4. Propostas de isolamento acústico para o Metrô de São Paulo

Mediante uma construção adequada e cuidadosa manutenção da superestrutura e dos veículos, não será necessário um revestimento adicional com material acústico nos trechos em túnel. As paredes deveriam, entretanto, ser construídas de tal maneira, que no caso de um

nível de ruídos muito elevado, seja possível a aplicação posterior de materiais absorventes.

As medidas aplicadas na superestrutura e nos veículos exercerão sua influência, também, nas áreas das estações; nesses recintos, entretanto, existirão ruídos adicionais provenientes das frenagens e arranques, bem como da circulação dos passageiros. O revestimento com produtos especiais hoje altamente difundidos aplicados com pistola nas partes inferiores das plataformas em balanço, como foi feito em Toronto, amortecerão os ruídos produzidos pelas rodas e trilhos, não, porém, o ruído do público circulando. Neste caso poderiam ser eficientemente utilizados os revestimentos para absorção de ruídos, como se fez em Berlim. Contudo, como o resultado dessas providências depende do efeito de conjunto das medidas aplicadas nos veículos e na superestrutura, bem como da disposição das instalações nas estações, será necessário experimentar diversas variantes de proteção contra o ruído. Isto será possível, pois trata-se, no caso, apenas, de revestimentos de parede ou de fôrros sobrepostos que podem ser aplicados posteriormente sem grandes despesas. Aconselha-se, por isso, a título de experiência, equipar uma estação com revestimento anti-ruído como em Toronto; uma segunda com fôrros sobrepostos, como em Berlim, e uma terceira com os dois dispositivos. As medidas gerais a serem adotadas posteriormente para as estações seriam assim estabelecidas após prolongados testes e observações com vários materiais de alta eficiência já produzidos no país.

17.5. Isolamento acústico na infra-estrutura e nas construções adjacentes

Em geral a criação de uma descontinuidade, a mais eficiente possível, entre os materiais de construção desde os trilhos, considerados como fonte de ruídos, até o leito de concreto, considerado como transmissor do som para o solo, é suficiente para manter o ruído decorrente do tráfego dentro de níveis aceitáveis. Dormentes de madeira e lastro de macadame dão resultados mais seguros do que placas de borracha, de cuja resistência não se possui ainda experiência suficientemente longa. Além disso é adequado preencher as áreas de serviço laterais, quando empregado o método de construção de Hamburgo, com areia grossa pura, e não com argilas plásticas ou siltosas.

Contudo, caso a distância entre as obras do túnel e edifícios adjacentes seja muito pequena, impor-se-ão medidas de proteção especiais.

Berlim e Viena podem ser consideradas como exemplos nesse sentido. Para evitar a irradiação do ruído através da parede do túnel para as edificações vizinhas, em alguns casos particulares, recorreu-se à construção de paredes duplas; o lastro, em outros casos, foi colocado em um côcho de concreto armado, que por sua vez se apoia contra as paredes do túnel, através de amortecedores de borracha.

18. Mercado e análise de preços

18.1. Mercado de construção civil

18.1.1. Materiais de construção

Para a observância dos prazos previstos para a realização das obras conforme o capítulo 33.5, serão necessárias consideráveis quantidades de materiais de construção, dentro de um espaço de tempo relativamente curto. Outras obras de vulto, em execução durante o mesmo período, poderão eventualmente contribuir para ocasionais carências de material.

Os materiais que serão predominantemente usados são os seguintes:

Cimento: Da capacidade de produção anual da indústria brasileira de cimento, num total nominal de cerca de 6,5 milhões de toneladas métricas, 32% são produzidos no Estado de São Paulo. Na mesma área, todavia, são absorvidos 45% da produção total brasileira, sendo a diferença entre produção e demanda coberta por fornecimentos vindos principalmente de Minas Gerais.

O consumo de cimento previsto na construção do Metrô de São Paulo deve atingir, anualmente, por estimativa aproximada, 5% da capacidade de produção do Estado.

Seria, pois, indispensável, tomar as providências cabíveis para, que, através de contratos adequados, ficasse assegurado com certa antecedência, o fornecimento pontual de quantidades suficientes deste material.

Areia: Areias fluviais apropriadas para a produção de concreto são extraídas particularmente do rio Paraíba, no Nordeste do Estado de São Paulo, por meio de dragas de sucção. A capacidade das extratoras é suficiente. Um sensível aumento de consumo, poderá requerer instalações adicionais de extração.

Agregados para concreto: Devido à falta de cascalho fluvial, utilizam-se como materiais adicionais para confecção do concreto pedra britada de rocha, principalmente granitos ou gnaisse.

As pedreiras geralmente se encontram ao redor da cidade de São Paulo num raio de 25 — 35 km, onde existe material aproveitável em grandes quantidades. A capacidade de produção destas pedreiras poderá ser facilmente ampliada com equipamentos adequados.

Concreto usinado: Atualmente existem



18.1

em São Paulo duas empresas fornecedoras de concreto usinado, das quais cada uma mantém 3 usinas. A capacidade mensal atual das duas companhias gira em torno de 30 a 40 000 m³ e está sendo ampliada.

Ferro redondo: O ferro redondo empregado na construção civil é produzido pelas usinas brasileiras, cuja capacidade anual atinge presentemente cerca de 480 000 t. As necessidades anuais na construção do Metrô de São Paulo não deverão ultrapassar 5% da capacidade de produção nacional, de forma que um planejamento oportuno poderá evitar qualquer eventual dificuldade de fornecimento.

Malhas de ferro: Fabricam-se no Brasil malhas de ferro com varetas de espessura até 7 mm.

Acredita-se que seria interessante uma ampliação do programa de fabricação das respectivas indústrias no sentido de produzir também as malhas de varetas duplas com diâmetro de 12 mm ou mais, a serem empregadas na construção de túneis de metrô (vide fig. 18.1)

Perfis de estacas-pranchas para cortinas: Estes, com exceção de perfis menores, não são produzidos no Brasil. Sugere-se, caso haja necessidade, a importação pelo contratante da obra, inclusive para poder gozar de uma isenção de direitos alfandegários.

Produtos de ferro fundido: Incluem-se aqui principalmente os anéis de segmentos de ferro fundido empregados em túneis construídos pelo método da couraça. As grandes fundições nacionais dispõem da capacidade necessária para produzir

esses anéis dentro das especificações técnicas estabelecidas, isto é, com as características metalúrgicas previstas e nas medidas exatas.

Além dos investimentos financeiros substanciais que a preparação de um programa de produção destes anéis exigirá e da instalação do equipamento adicional das fundições, as empresas necessitarão, de acordo com o que informam, de um prazo de, pelo menos, 8 meses até o início da fabricação. Caso seja decidido, portanto, o emprego de anéis de segmentos de ferro fundido no revestimento dos túneis de Metrô de São Paulo, é de suma importância assinar os contratos de fornecimento com a devida antecedência, garantindo, também, a compra do material das fundições.

É de se esperar que o preço de fornecimento dos anéis de segmento seja determinado pela quantidade adquirida, uma vez que a amortização do maquinário adicional exerce grande influência sobre este preço.

Materiais de impermeabilização: Feltro betuminoso com um peso mínimo de 0,500 kg/m² é produzido no próprio país.

A fim de satisfazer às qualidades técnicas exigidas dos materiais de impermeabilização, é aconselhável combinar as especificações correspondentes com os responsáveis pela produção, com a devida antecedência. Estas medidas também deverão ser tomadas com referência ao material de vedação das juntas. Tecidos impermeabilizantes especiais com base de juta ou laminados metálicos não são ainda produzidos, normalmente no Brasil. Entretanto,

Fig. 18.1
Malhas de aço

esses tipos encontram, eventualmente, sua aplicação em impermeabilizações não sujeitas à pressão, como por exemplo na construção pelo método Milanês, pelo método de estacas justapostas ou no revestimento de túneis perfurados pela couraça e revestidos com anéis de segmentos de concreto.

Outros materiais: Todos os outros materiais auxiliares empregados na execução das obras são fornecidos pela indústria local em quantidades praticamente suficientes.

18.1.2. Máquinas de construção

Para a construção das instalações do metrô, será imprescindível empregar inúmeras máquinas especiais de construção que se adaptem aos métodos aplicados na execução desse tipo de obras. De modo geral, é de se esperar que, mesmo com uma fusão de diversas firmas empreiteiras para constituição de um grupo de trabalho, não se consiga formar um parque de máquinas suficientemente grande e adequado.

Ao contrário, se pode contar, desde já, com a necessidade de substanciais aquisições de equipamentos comuns e especiais suplementares os quais deverão ser, em grande parte, importados.

A indústria de máquinas de construção nacional tem atualmente um programa de produção muito limitado, concentrando-se na fabricação de máquinas convencionais, em virtude da situação do mercado de capitais e de construção civil, particularmente dedicados à construção de grandes obras no setor hidrelétrico e

rodoviário, que não favoreceram, nos últimos anos, qualquer expansão do ramo.

As possibilidades de importação e de obtenção de crédito no setor de máquinas de construção permitem, no momento, a importação da maquinaria necessária sem maiores complicações.

18.1.3. A indústria de construção civil

Em São Paulo existe um grande número de firmas que se dedicam à construção civil. Entretanto, somente poucas possuem a experiência, o pessoal adequado, os equipamentos e, particularmente, o capital de investimento necessário para a execução de obras difíceis e de grande vulto.

Por outro lado, as empresas nacionais de construção civil, devido às condições peculiares do mercado de trabalho, não se especializaram tanto nos diferentes setores, como nos Estados Unidos ou na Europa, mantendo-se dentro do ecletismo indispensável aos dois campos principais anteriormente citados. Nos anos passados, a demanda no mercado da construção civil se manteve parcialmente bastante abaixo do limite da capacidade da indústria de construção. Espera-se, porém, um aumento considerável do mercado de construção devido aos financiamentos concedidos pelo "Banco Nacional de Habitação" e aos programas de investimento estabelecidos.

18.2. A situação do mercado no setor da indústria eletro-mecânica

Desde a II Guerra Mundial a indústria eletro-mecânica nacional se vem empenhando em satisfazer à demanda de outros ramos industriais. A fim de poder julgar melhor a capacidade de produção do mercado nacional, para a construção do Metrô de São Paulo, os técnicos do Grupo de Estudos visitaram diversas fábricas nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Guanabara. Primeiramente, foram visitadas fábricas de produtos que serão utilizados na construção do metrô, tais como automotrizas elétricas, equipamentos de ventilação, elevadores de carga, elevadores de pessoas, escadas rolantes, materiais de superestrutura, anéis de túnel (tubbings) e peças de alumínio de todos os tipos. No setor elétrico:

instalações de alta tensão, instalações de baixa tensão, transformadores e chaves de todos os tipos, motores elétricos, instalações elétricas de comando, instalações de sinalização, cabos, fios, etc.

O setor da indústria mecânica, com o devido equipamento técnico, apresenta suficiente capacidade de produção, podendo essas indústrias fornecer a maior parte dos equipamentos necessários para o metrô.

A maioria do equipamento básico para instalações de alta e baixa tensão, incluindo transformadores, disjuntores, painéis, cabos, etc., poderá ser fabricado no Brasil. Será necessário importar o seguinte: disjuntores automáticos rápidos, chaves magnéticas de alta tensão, componentes para retificadores e para comando interno das automotrizas, instalações de sinalização e comando dos trens.

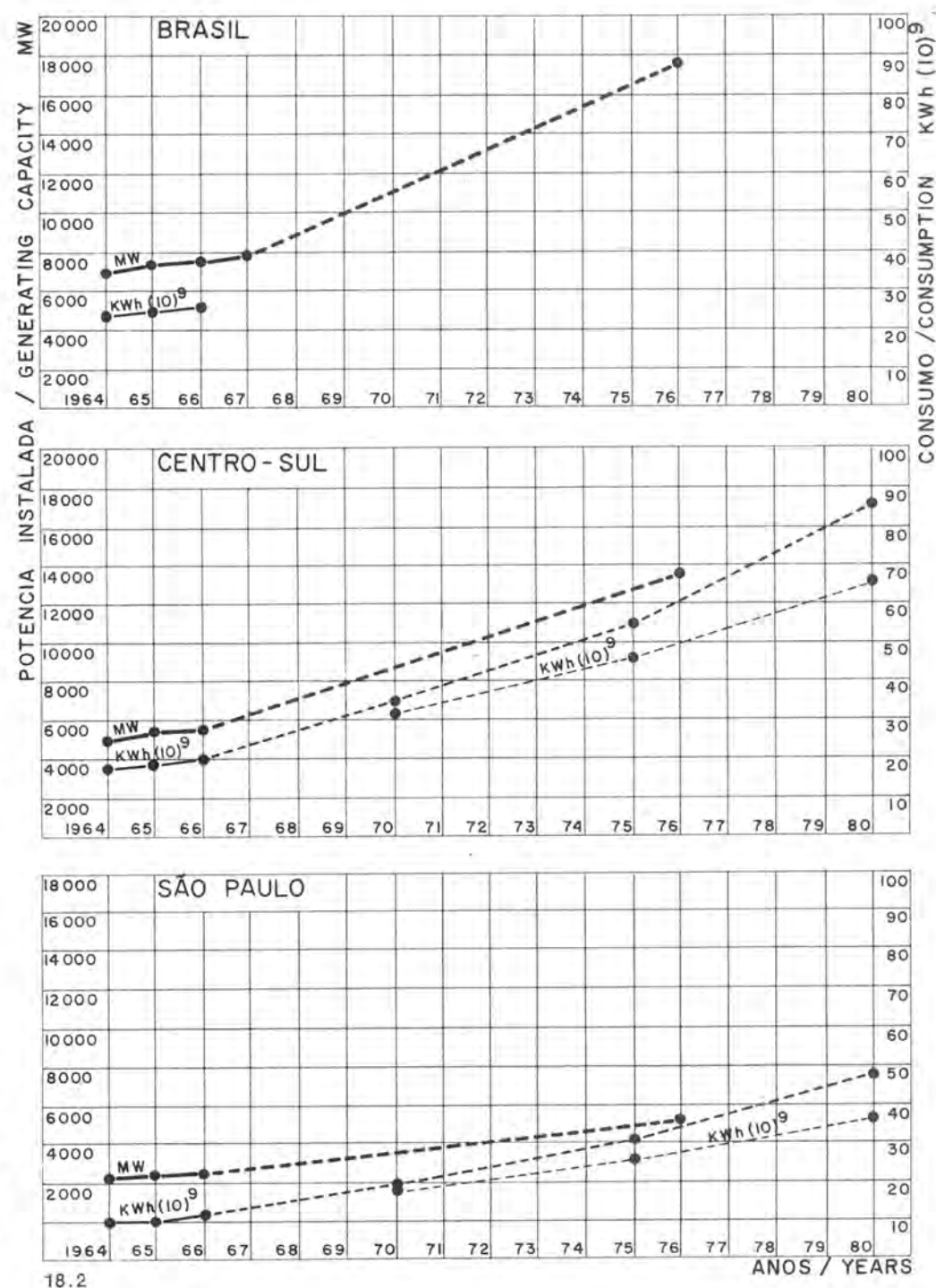
Como a produção nacional de máquinas de construção e instalações de ventilação ainda se encontra em formação, uma grande parte desses equipamentos deverá ser importada.

18.3. O mercado de mão de obra

A construção das instalações do metrô em regime de urgência deverá trazer como consequência uma considerável procura de mão de obra especializada, o que poderia constituir um problema mais sério, no caso de se verificar, paralelamente, um aumento dos investimentos em outros campos de atividades.

Assim sendo, poderão surgir dificuldades desta espécie nos primeiros anos de execução do projeto, de forma que, por escassez de mão de obra especializada, talvez sejam influenciadas também as possibilidades de desenvolvimento e expansão das principais indústrias metalúrgicas, elétricas e mecânicas.

No ramo da construção civil, haverá habitualmente uma procura mais elevada de mão de obra das mais diversas especialidades, como, por exemplo, de encarregados de máquinas, pessoal especializado em construção de túneis, carpinteiros de fôrmas de concreto e outros, os quais, pelo menos em parte, deverão ainda ser formados profissionalmente pela indústria de construção civil. Neste setor entretanto, o citado problema não assumirá proporções mais graves devido à adaptação e



familiarização mais rápida do pessoal empregado ao serviço.

Dados estatísticos documentam uma queda das atividades locais de construção depois de 1964, que atingiu particularmente a mão de obra não especializada, da qual existe uma substancial reserva em São Paulo.

A formação de pessoal adicional deverá, portanto, aumentar o potencial de mão de obra especializada, contribuindo, assim para um melhoramento da estrutura social local.

— Potência instalada
 - - - Potência projetada
 — Consumo
 - - - Consumo máximo previsto
 - - - Consumo mínimo previsto

Fig. 18.2
Crescimento da potência instalada e do consumo de energia