Aspectos Construtivos da Estação Chácara Klabin da Expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo

Francisco Ribeiro Neto, Cybele de Azevedo Vasconcellos e Orlando Ferreira Filho
Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô, São Paulo, Brasil

Rogério Martinati
Núcleo Projetos e Consultoria / Estra Engenharia, São Paulo, Brasil

RESUMO: O presente trabalho descreve aspectos construtivos para implantação da Estação Chácara Klabin da Expansão da Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo. A estação prevê a futura ampliação para atender o fluxo da Linha 5 que se desenvolverá em sentido ortogonal. A obra situa-se ao longo da rua Vergueiro, próximo ao Colégio Liceu Pasteur e Hospital Sepaco. O corpo principal da estação é enterrado, executado em VCA (vala a céu aberto) pelo método invertido. A partir da estação foram construídos 4 túneis de plataforma pelo método NATM - New Austrian Tunnelling Method. São apresentados aspectos geológicos e geotécnicos, desempenho das escavações, detalhes dos métodos construtivos empregados, singularidades observadas em campo, cuidados com a impermeabilização dos túneis do corpo da estação, monitoração dos túneis e das edificações lindeiras, assim como ensaios de integridade das estruturas de fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Metrô, Túnel, Parede diafragma, Vala à céu aberto.

1 INTRODUÇÃO

A Linha 2 – Verde do Metrô de São Paulo planejada para ser implantada entre Vila Madalena e Vila Prudente com extensão de 17,6km, tem atualmente 7,9km em operação entre as estações Vila Madalena e Ana Rosa. O novo trecho da Linha 2 – Verde vai ligar a Estação Ana Rosa a outras cinco estações: Chácara Klabin (foco deste trabalho), Imigrantes, Alto do Ipiranga, Sacomã e Tamanduateí. A primeira etapa de 3,4km está em fase final de obras, passando pelas estações Chácara Klabin, Imigrantes e Alto do Ipiranga.

A inauguração está prevista para 2006 e beneficiará cerca de 90 mil novos usuários por dia. Na segunda etapa será construído 3,4km restantes e as estações Sacomã e Tamanduateí, elevando o número de passageiros transportados diariamente pela Linha 2 – Verde dos atuais 280 mil para 774 mil. Futuramente esta linha continuará até a Vila Prudente.

2 EMPREENDIMENTO

A Estação Chácara Klabin, além do atendimento dos usuários lindeiros, permitirá uma futura ampliação para atender o fluxo da Linha 5 que se desenvolverá em sentido ortogonal. A obra situa-se ao longo da rua Vergueiro, próximo ao Colégio Liceu Pasteur e Hospital Sepaco. A Tabela 1 apresenta dados gerais da Estação Chácara Klabin da Linha 2 – Verde e a Figura 1 a planta de implantação de obra.

A estação será enterrada, executada em VCA pelo método invertido e NATM, exceto as salas técnicas e operacionais que ficarão em prédio adjacente (Fig. 2 e Fig. 3). As paredes diafragmas possuem profundidade de até 44m, espessura variando de 0,80m até 1,20m e largura de até 7,0m, executadas nas formações São Paulo e Resende do Terciário de São Paulo, sendo pioneira a escavação nesta profundidade na Formação Resende.

A concepção da Estação Klabin prevê a implantação da plataforma da estação da Linha 5 cruzando no sentido nordeste, abaixo do nível da plataforma da estação da Linha 2 que cruza no sentido noroeste. As plataformas da Linha 1 e 5, ambas centrais, são ligadas por escadas rolantes e fixas a um mezanino intermediário comum às duas linhas, permitindo efetuar as transferências, além de propiciar o acesso dos usuários lindeiros.

Tabela 1. Dados Gerais da Estação Chácara Klabin

Capacidade	77.690 passageiros/ dia
Área construída	13.285,20 m²
Extensão em NATM:	4 x 37m = 148m
Seção de Escavação NATM	102m²
Diâmetro equivalente do túnel em NATM	11,4m
Escavação em trincheiras e estações subterrâneas	10.660,00 m³
Escavação de túnel e estação pelo sistema "mineiro"	15.100,00 m³
Enfilagem tipo Jet Grouting	0000 m³
Concreto	17.000 m³
Formas	0000 m²

Orlando: favor complementar

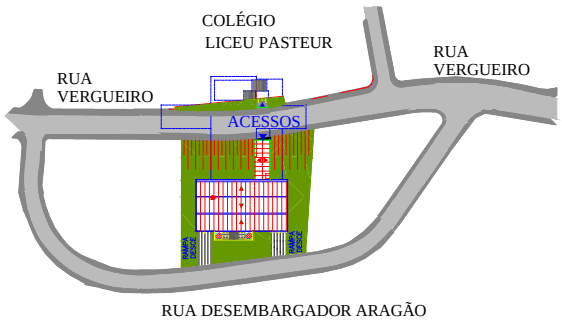

Figura 1. Implantação da Estação Chácara Klabin.

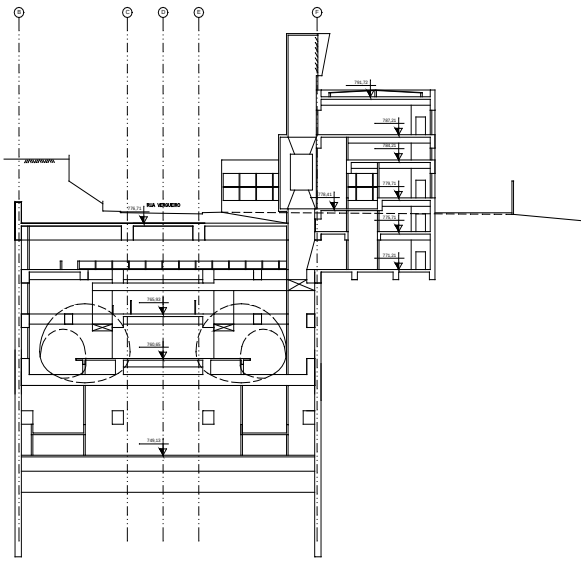

Figura 2. Corte Esquemático da Estação Chácara Klabin.

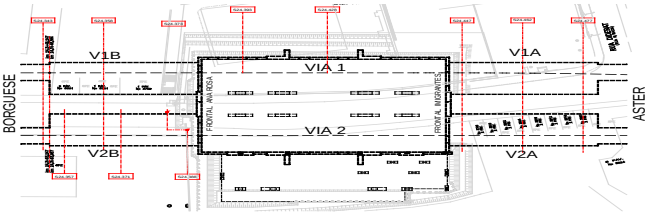

Figura 3. Planta da Estação Chácara Klabin.

3 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

3.1 Geologia Regional e Local

A geologia regional da cidade de São Paulo pode ser sintetizada em três grandes unidades geológicas: o embasamento pré-cambriano, os sedimentos terciários e os depósitos sedimentares modernos. A seção geológica simplificada do trecho esta apresentada na Figura 4.

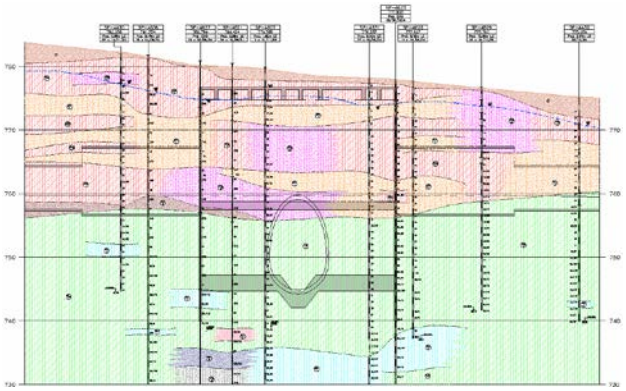

Figura 4. Seção Geológica da Estação Chácara Klabin.

Figura x. Foto aérea antes do início da obra

Na área da Estação Klabin, a menos de coberturas tecnogênicas (aterros), o maciço de escavação é constituído por sedimentos

terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo (BSSP). Os sedimentos terciários desta bacia, de modo simplificado, são formados por argilas rijas e areias compactas, estas últimas ocorrendo seja como horizontes contínuos seja como lentes confinadas, apresentando porcentagem variável de fração fina e, portanto com permeabilidade não uniforme. Os ensaios realizados em furos de sondagem indicam fração argila elevada nas areias, o que resultam em permeabilidades baixas, entre 10^{-4} e 10^{-6} cm/s. De acordo com a sistematização da estratigrafia da BSSP, privilegiando a representação de um determinado evento ou ambiente de deposição apresentada por Riccomini (1989) e Ricominni & Coimbra (1992), os solos sedimentares na região da Estação Klabin pertencem ao grupo Taubaté, constituído pelas formações Resende e São Paulo.

O local de construção da Estação Klabin é uma região típica da ocorrência de sedimentos da formação São Paulo, onde sua principal exposição se desenvolve no espigão central da cidade, entre as avenidas Heitor Penteado, Paulista, Vergueiro e Domingos de Morais. Os sedimentos da Formação São Paulo situam-se, em geral, acima da cota 750m, atingindo até a cota 820 m. Nos solos desta formação predominam cores variegadas e vermelha.

Os sedimentos da Formação Resende ocorrem sobre o embasamento cristalino, e são originários de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados e situados aproximadamente abaixo da cota 750 m.

Em geral apresentam elevada consistência e compacidade, com pré-adensamento pronunciado. As argilas cinza-esverdeadas desta formação, conhecidas como "Taguá", apresentam consistência muito rija e são excelentes materiais, tanto para apoio de fundações rasas ou profundas, como para escavação subterrânea. Os sedimentos da formação Resende foram encontrados na obra abaixo da cota 755m. Devido a sua elevada resistência, estes materiais apresentam ótimo comportamento como elementos de fundação, entretanto são de difícil remoção com os equipamentos tradicionais de execução de fundações profundas, ora disponíveis no mercado. O lençol freático antes do início da execução dos túneis e do rebaixamento por poços injetores profundos era subsuperficial, entre 2,0 e 3,0 metros abaixo da superfície.

3.2 Parâmetos Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos adotados em projeto para os cálculos das paredes diafragma de contenção do VCA da estação e dos túneis do corpo da estação foram baseados em função da caracterização da geologia local, dos resultados dos ensaios SPT e de dados da bibliografia, além de relatórios da Companhia do Metrô, com parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade para os diferentes tipos de solo de relevância para o túnel ou VCA, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos adotados para o projeto

Solo	**SPT**	**γ (kN/m^3)**	**c' (kPa)**	**ϕ' (º)**	**E (MPa)**	**K_h (kN/m^3)**	**Ko**
Aterro	2 a 7	16	10	20	8	7500	0.65
Areia Terciária	< 10	19	3	27	40	15000	0,54-0,87
	10 a 20	19	5	30	50	20000	0,54-0,87
	> 20	19	10	35	60	50000	0,54-0,87
Argila Terciária	mole	18	15	22	20	7500	0,8 a 1,0
	média	18	20	22	30	10000	0,8 a 1,0
	rija a dura	18	50	22	40	50000	0,8 a 1,0
	dura a muito dura	20	50 a 100	22	60	65000	0,8 a 1,0

Obs.: γ = peso específico natural, c' = coesão efetiva, ϕ' = ângulo de atrito, E = módulo de deformabilidade, K_h = coeficiente de reação horizontal do solo, Ko = relação entre tensões horizontais e verticais no repouso.

4 PROCESSOS CONSTRUTIVOS

4.1 Vala a céu aberto em sistema invertido

Face à sua profundidade e tendo em vista que era possível conviver temporariamente com o fechamento da rua Vergueiro, a estação foi executada em vala à céu aberto (VCA) em sistema invertido, com escavação sob a laje de cobertura até a cota de fundo da estação, e concretagem das lajes intermediárias em definitivo, que serviram de travamento para as paredes laterais.

Para permitir as escavações do VCA com dimensões de 70m x 40m até a cota 757,30 m (laje de fundo da Linha 2), o maciço foi condicionado através do rebaixamento dos níveis d'água por 24 poços profundos com bico injetor (PBI) na profundidade aproximada de 20m e ponteiras filtrantes à vácuo para a escavação dos taludes das salas técnicas e operacionais. A vazão estimada por poço PBI em regime estabilizado foi da ordem de 0,5m^3/h.

As cargas nas fundações são oriundas do peso próprio da estrutura de concreto, das cargas de revestimentos e reaterros, cargas acidentais, além das cargas móveis oriundas do tráfego dos trens, simuladas através de trens-tipo definidos em Norma. A fundação é composta por 8 estacas barrete centrais e 10 estacas incorporadas à parede lateral com carga entre 1.000 e 4.500 tf. As lamelas no contorno da Estação também são portantes e estão submetidas a cargas entre 100 e 1.000 tf.

Figura 5. Foto da Estação com túnel ao fundo.

4.2 Fundação: Estacas Barrete

A definição do tipo de fundação partiu das seguintes premissas:

- A metodologia executiva da Estação previa a implantação de VCA em sistema invertido;
- As fundações deveriam ser executadas a partir da cota de fundo da laje de cobertura (cota 776 m);
- A Estação seria construída inicialmente até o nível da laje da Linha 2 do Metrô, mas os elementos de fundação deveriam ser dimensionados para a ampliação da Estação, incorporando as lajes da Linha 5 (mais profunda), e mantendo a Linha 2 em serviço;
- O esquema estrutural a ser adotado deveria levar em consideração o fechamento lateral no entorno do corpo principal da estação e o cruzamento das linhas em sentido ortogonal, o que limitava o espaço interno para implantação dos pilares.

De acordo com estas premissas, o projeto resultou em:

- Implantação de parede diafragma contínua ao redor da Estação com a função de contenção e de apoio das lajes, e de 8 pilares centrais que suportam a maior parte das cargas. As lajes são em geral vazadas, formadas por uma grelha de vigas.
- Com profundidade e cargas elevadas, a escolha do tipo de fundação recaiu no âmbito das fundações profundas, já que se pretendia transferir as cargas para os substratos mais resistentes encontrados abaixo da laje da linha 5 (abaixo da cota 745 m).
- Devido a peculiaridade de se operar a Linha 2 antes mesmo da execução da Linha 5, a maior parte das cargas, quer seja de origem permanente, quer seja acidentais e de utilização, já estariam incorporadas às fundações quando se atingisse a cota final de escavação. Neste caso, as fundações foram dimensionadas já num primeiro momento para suportar as cargas totais, com comprimento efetivo considerado somente abaixo da cota da Linha 5 (cota 745m).

Com cargas elevadas e considerável profundidade de execução das fundações, optou-se por estacas escavadas de grande capacidade de carga, executadas com auxílio de lama bentonítica. Neste campo, se enquadram as estacas escavadas do tipo Estacões (formato circular) ou Estacas Barretes (formato retangular). Para se aproveitar os elementos de fundação como pilares definitivos, já que existiam restrições impostas pela arquitetura, e também para homogeneizar o tipo de fundação a ser utilizado, optou-se por Estacas Barrete.

As paredes da Estação foram projetadas em paredes-diafragma de 0,80m de espessura, e nos locais onde as paredes são portantes, foram projetadas estacas barretes com espessura de 1,20m incorporadas à parede de contenção. Os apoios internos foram projetados em estacas barrete de 1,00m de espessura, com 6,0, 6,5 e 7,0 m de largura. Conforme o dimensionamento das contenções, a ficha mínima para

estabilidade das paredes resultou em 5,0 m a partir do fundo da laje da Linha 5. O rebaixamento do lençol freático atuando externamente às paredes diafragma auxiliou no alívio das pressões hidrostáticas na fase construtiva, permitindo maiores vãos entre as lajes de travamento.

O fuste das estacas barrete foi aproveitado como pilares definitivos, o que exigiu um maior controle executivo quanto à resistência e homogeneidade do concreto da estaca, além de um controle rigoroso de excentricidade e desaprumos.

4.3 Túneis do Corpo da Estação

A partir do VCA da estação foram construídos 4 túneis que visam acomodar parte da plataforma de acesso, com extensão de 36,90m cada um e seção escavada aproximada de 102 m^2 (diâmetro equivalente de 11,4m). Os túneis foram escavados pelo método NATM com escavação parcializada em calota e rebaixo, executando-se arco invertido provisório (AIP) para fechamento da seção da calota e arco invertido definitivo para fechamento da bancada. (Fig. 6)

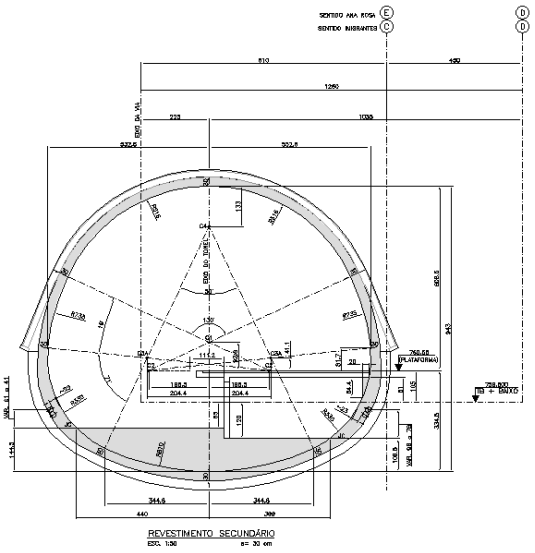

Figura 6. Seção Típica dos túneis do Corpo da Estação.

O revestimento primário (suporte temporário) dos túneis é constituído de concreto projetado e cambotas treliçadas com espessura de 0,25m, enquanto que o revestimento secundário é de concreto armado moldado com tela de aço com espessura de 0,30m.

Para permitir as escavações dos túneis, o maciço foi condicionado nas camadas de areias finas e médias que predominaram na porção superior dos túneis com colunas de solo-cimento horizontais (CCPh). Cada lance de tratamento foi adequado às condições observadas nas frentes de escavação. Também foram utilizados drenos horizontais profundos à vácuo (DHPs) sempre posicionados de forma a interceptar as camadas mais permeáveis reduzindo o afluxo de água na frente de escavação.

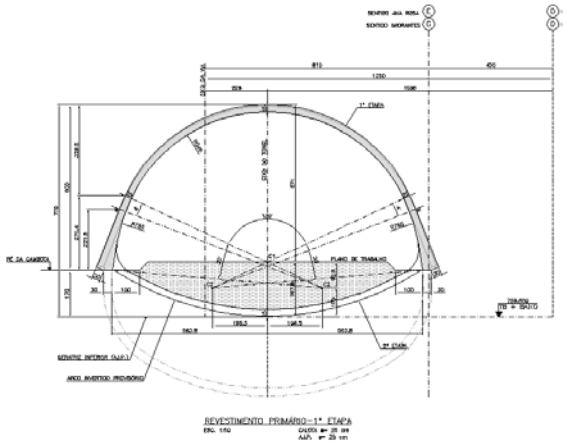

Figura 7. Escavação da calota do túnel.

5 IMPERMEABILIZAÇÃO

Os túneis do corpo da estação, a cobertura do VCA e a lateral das Salas Técnicas e Operacionais da estação Chácara Klabin contemplam conceitos e inovações tecnológicas distintos das técnicas usuais no Brasil, no que se refere à impermeabilização de estruturas subterrâneas. A diretriz que norteou a escolha do sistema impermeabilizante destas estruturas, foi a de impedir o aparecimento de eventuais pontos de infiltração, minimizando intervenções de manutenção e ações corretivas no sistema metroviário, reduzindo assim custos de manutenção e transtornos aos usuários, além de propiciar um melhor aspecto estético e visual das estruturas.

No caso dos túneis do corpo da estação adotou-se geomembranas de PVC com espessura de 2 mm em função das características hidrogeológicas do maciço. A geomembrana de PVC foi instalada entre as camadas do suporte temporário, em concreto projetado, e o revestimento definitivo em concreto moldado. No dimensionamento, o revestimento definitivo foi considerado em

última análise para trabalhar de forma independente do suporte temporário, ou seja, sem contribuição deste. Entretanto, a presença do revestimento primário resistindo aos esforços do maciço, isolado do revestimento secundário pela camada de PVC ("casca de cebola") resistindo às pressões hidrostáticas, foi simulado nos programas computacionais e auxiliou no dimensionamento da seção.

O sistema de impermeabilização utilizado foi o de Impermeabilização Parcial (abóbada e laterais) aberta ou também chamada "guarda-chuva", com drenagem longitudinal nos limites da impermeabilização no pé da paredes laterais da estrutura. No sistema "guarda-chuva", a água é forçada a percolar por um geotêxtil posicionado entre a geomembrana e o suporte temporário do túnel, sendo captada por drenos longitudinais e transversais.

Nesta solução de impermeabilização parcial, a funcionalidade da drenagem deverá ser mantida ao longo do tempo, necessitando de uma equipe de conservação para a limpeza periódica do sistema de drenagem.

Figura 8. Manta termoplástica de PVC instalada e armação do revestimento secundário.

6 DESEMPENHO DA CONSTRUÇÃO

6.1 Túneis do Corpo da Estação

O desenvolvimento das escavações dos túneis do corpo da estação foi acompanhado através do monitoramento dos deslocamentos do maciço, do revestimento primário do túnel e das edificações, além do mapeamento de cada avanço da frente de escavação.

O monitoramento foi efetuado através de placas superficiais e tassômetros instalados no maciço, bem como pinos instalados no revestimento do túnel e nas edificações lindeiras, com nivelamento óptico de precisão.

A produtividade média de escavação dos túneis foi de 1,0m/dia. (confirmar c/Orlando)

Os recalques mais acentuados não ultrapassaram 30mm e pequenas trincas foram originadas nas edificações lindeiras menos estruturadas. O passo de avanço de escavação foi de 0,80m e localizamente foi diminuído para 0,60m, de forma a minimizar os recalques nas edificações. Velocidades de recalque mais acentuadas eram observadas durante à execução do tratamento de colunas de CCPh, devido a baixa cobertura. Procedimentos foram adotados e os recalques minimizados.

Figura 9. Revestimento secundário concluído.

6.2 Lamelas das Paredes Diafragma e Barretes

6.2.1 Dificuldades construtivas

A escavação foi através de "clam-shell" mecânico pendurado em cabo de aço. O furo escavado foi estabilizado com uso de lama bentonítica. Devido a profundidade elevada e resistência dos materiais a serem escavados, principalmente abaixo da cota 755 m (solos da formação Resende), a metodologia e os equipamentos de perfuração foram dimensionados de maneira a permitir avanços em solos sedimentares com índices SPT acima de 50 golpes, utilizando inclusive técnicas de pré-furo, trepanação e curetagem, além de contar com equipamentos para pré-furo em estacas tipo raiz, mesas com sistemas pull-down de elevado torque (acima de 22 tfxm), e trados especiais.

A concretagem foi submersa através de tubo tremonha, sendo que a garantia de desempenho da fundação foi realizada de maneira subjetiva através do acompanhamento e controle dos inúmeros itens que compõe o serviço, que vão desde o acompanhamento das escavações e comparação com os dados de investigações, acompanhamento dos controles de campo, como procedimentos de limpeza, controle da lama, característica do concreto e controle de concretagem, até a realização de ensaios comprobatórios de integridade, como furos com

extração de amostras do concreto, ensaios "cross hole", e aferição com ensaios "pile integrated test".

Figura 10. Vista da plataforma da Estação Chácara Klabin.

6.2.2 Ensaios "Cross-hole"

Internacionalmente, a avaliação da integridade de elementos enterrados tem seguido uma tendência do uso de métodos indiretos e não-destrutivos, com base em fundamentos de emissão e recepção de ondas acústicas. Seguindo esta tendência foi utilizado o ensaio "cross-hole" que é uma tecnologia recente no controle de qualidade quanto a integridade estrutural de elementos fundações, integrando informações de vários ensaios, o que resulta numa "tomografia".

Para possibilitar a execução dos ensaios foram instalados tubos de PVC fixados nas armaduras das lamelas e barretes antes da concretagem. Além disso, foram tomados cuidados especiais durante a concretagem para não ocasionar problemas nos tubos, tais como preenchê-los com água logo após a concretagem. Para o procedimento executivo foi utilizada a norma NBR-6122 - "Projeto e Execução de Fundações" e ASTM D6760-02 - "Standart Test Methods for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing". Sua aplicação em lamelas e barretes da Estação Chácara Klabin, juntamente com os dados de acompanhamento, confirmaram a integridade das estruturas de fundação.

7 COMENTÁRIOS FINAIS

Em função das limitações impostas pela arquitetura e das peculiaridades e ineditismo em vários aspectos da engenharia de fundações e túneis, a obra da Estação Klabin pode ser considerado um empreendimento de sucesso. Dentre os desafios enfrentados, estão:

- A presença de solos terciários da formação Resende com índices SPT acima de 60 golpes, exigiram o uso de equipamentos e procedimentos suplementares para garantir a escavabilidade das estacas barrete. Foram utilizadas escavações parcializadas, pré-furos, telescopagem, trepanação, curetagem, e o uso de mesas rotativas de torque elevado e sistema "pull-down", além trados mecânicos;
- Era fundamental a garantia de verticalidade das estacas, já que as estacas são utilizadas como pilares no corpo da estação. Foram medidos desaprumos pequenos e em pontos localizados em função do uso de "clam-shell" mais pesados e compridos, chapas-guia, e procedimentos de garantia da verticalidade durante os avanços da escavação;
- O concreto das estacas deveria ter trabalhabilidade adequada para concretagem submersa, e ainda, atender os parâmetros de resistência e durabilidade de uma estrutura convencional (Pilar). Os resultados do controle tecnológico e das amostras retiradas das estacas / pilares indicaram que o concreto atendeu satisfatoriamente às exigências de projeto;
- As paredes diafragma foram utilizadas como parede definitiva da estação. A vedação entre lamelas se mostrou eficiente, mesmo após o desligamento do rebaixamento do lençol freático, necessitando apenas reparos localizados;
- O uso do ensaio "Cross-hole" em lamelas e barretes da Estação Chácara Klabin se mostrou uma ferramenta útil e comprovou a integridade das estruturas de fundação;
- As escavações dos túneis em NATM, apesar do baixo recobrimento em alguns pontos, resultaram em pequenas deformações superficiais em função do acompanhamento "pari-passu" das escavações (ATO) e dos procedimentos utilizados para garantia da estabilidade, como o uso de dispositivos auxiliares de condicionamento do maciço, avanços controlados, e monitoramento contínuo das estruturas.

- O uso de impermeabilização em PVC nos túneis da Estação Klabin mostra uma tendência em obras metroviárias. O projeto e execução dos revestimentos e da própria impermeabilização exigiram adequações no dimensionamento e na execução da obra, já que se trata de um procedimento pioneiro em túneis metroviários até aquele momento. Os resultados iniciais mostram que o sistema de impermeabilização instalado é eficiente.

Concluiu-se que a implantação da Estação foi um empreendimento bem sucedido devido aos cuidados executivos durante a obra e ao bom entrosamento entre a projetista, a construtora, e a equipe de ATO, fiscalização e projeto do Metrô.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos à Companhia do Metropolitano de São Paulo pela autorização para divulgação do trabalho desenvolvido e a empresa “In Situ” pela realização dos ensaios Cross-hole sem custos para a Cia do Metrô.

REFERÊNCIAS

Clemente, L.G.; Ferreira, A. A.; Gramani, D. R.; Rocha, H.C. e Yazbek Jr, R. (2004). O Prolongamento da Linha 2–Verde: Geologia e Métodos Construtivos, *Revista Engenharia*, Engenho, Nº 564, p. 140-144.

Riccomini, C., (1989). O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, IGUSP, São Paulo, SP.

Rocha, H.C.; Ribeiro Neto, F.; Nunes, N. L. e Silva, M. A. A. P. (2005). Concebendo Estruturas Impermeáveis para o Metrô de São Paulo. *Simpósio Internacional de Estruturas Subterrâneas*. ITA, ABMS e CBT. São Paulo, São Paulo, Brasil, 13p.