

TÚNEIS

Trecho Oeste Rodoanel de São Paulo

POR GERSON RODRIGUES DE CASTRO*/JORGE TAKAHASHI**
LUIZ ADOLFO DO MARCO**/VICTOR SAMARA**/ROBERTO KOCHEN***



Túnel 1 - Emboque Vista Alegre.



Túnel 1 - Emboque Gramado.

Ao longo dos 32 km de extensão aproximada do Trecho Oeste do Rodoanel de São Paulo, a rodovia passa por três regiões de topografia elevada em que a travessia foi prevista para ser feita por meio de túneis. Esses túneis foram designados de Túnel 1, Túnel 2 e Túnel 3, respectivamente no sentido da Rodovia Régis Bittencourt para a Rodovia dos Bandeirantes.

O Túnel 1 está localizado em parte no município de Embu das Artes e no município de Cotia, entre as rodovias Régis Bittencourt e Raposo Tavares e atravessa uma região rural, ocupada por chácaras e residências com baixa densidade de ocupação habitacional, onde predominam bosques e pastagens. O Túnel 2, localizado no município de Osasco na divisa com Barueri, atravessa a região urbana do Bairro Parque Imperial, ocupada por edificações de pequeno porte. O Túnel 3, situado no município de São Paulo, na divisa com Osasco, atravessa o Morro Doce, região coberta por uma reserva florestal e pastagens da Fazenda Itahyê.

A pista de rolamento de cada túnel mantém a continuidade das 4 faixas de tráfego da rodovia, possuindo

3,60m de largura cada e ainda abriga um refúgio de veículos e um passeio de pedestres. Para cada pista de rolamento, seja a pista externa ou a pista interna, foi previsto um túnel de modo que se tratam de túneis duplos, paralelos e curvos.

As principais características geométricas desses túneis são apresentadas na tabela 1.

Verifica-se pelas dimensões da escavação que se trata de túneis de grande porte e sem precedentes na história rodoviária do País.

Portanto, apresentamos os princípios gerais que nortearam a concepção do método construtivo adotado para esses túneis de grandes dimensões.

ASPECTOS GEOLÓGICOS

Do ponto de vista lito-estratigráfico, os túneis atravessam uma região de domínio das rochas cristalinas de

origem metamórfica, com idade do pré-cambriano.

O Túnel 1 se situa na região do Complexo Embu, onde predominam rochas do tipo de gnaisses. O Túnel 2 e o Túnel 3 se situam em regiões do Grupo São Roque onde ocorrem rochas do tipo de filonitos, xistos, metabasitos, metarenitos e metassiltitos.

Do ponto de vista estrutural a região é influenciada tectonicamente pelas falhas de Caucaia e de Taxaquara, tendo sido encontrada no Túnel 2 uma zona de falha de pequena extensão contendo material milonitizado.

A ocorrência de solo é encontrada apenas nos emboques, sendo os túneis na maior parte do trecho escavados predominantemente em maciço rochoso de rocha de boa qualidade, exceto o Túnel 2, que em cerca de pouco mais da metade de sua exten-

Tabela 1 - Características geométricas dos túneis.

Túnel	Extensão média	Largura de escavação	Altura de escavação	Seção de escavação		Cobertura máxima
				Solo	Rocha	
Túnel 1	470m	19,50m	10,99m	221,96m ²	180m ²	72m
Túnel 2	650m	19,63m	14,10m	215,54m ²	180m ²	59m
Túnel 3	1.730m	19,25m	11,59m	219,56m ²	180m ²	181m



Túnel 2 - Emboque Tamboré.



Túnel 3 - Emboque Itahyê.



Túnel 2 - Escavação em side-drifts.



Túnel 2 - Emboque Imperial.



Túnel 3 - Emboque Jesus.



Túnel 3 - Perfuração.

são o filonito e o xisto apresentam características de maciços pobres.

O lençol freático se encontra, acima da abóbada, a uma altura máxima de 32m para o Túnel 1, 35m para o Túnel 2 e 150m para o Túnel 3.

ASPECTOS GEOTÉCNICOS

A caracterização dos maciços atravessados pelos túneis foi feita a partir de um plano de investigação geológico-geotécnico realizado em diversas etapas. Inicialmente, na etapa de projeto, foram executadas sondagens mistas verticais e inclinadas, sondagens geofísicas, ensaios de perda d'água e ensaios em sonda multitest. Em seguida foram feitos ensaios de compressão simples em testemunhos de sondagens e numa terceira etapa, já durante a escavação da obra, especificamente para os filonitos do Túnel 2, foram executados provas de carga em placa, ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em blocos retirados durante a escavação das galerias laterais.

Classificação geomecânica

Os maciços rochosos foram analisados pelas classificações de Barton e Bieniawsky, de utilização consagrada para uso corrente em escava-

ções subterrâneas, e agrupados em compartimentos segundo as várias classes de maciço propostas pelos autores das classificações.

Modelo geomecânico

Para cada túnel foi concebido um modelo geomecânico, resultante do estudo de todas as investigações e análises geológico-geotécnicas realizadas, o qual viesse representar o comportamento futuro da escavação, e orientasse a escolha do método construtivo a ser adotado. Para os túneis em solo, levou-se em conta na concepção do modelo geomecânico os tipos de solos presentes, a posição do lençol freático e as estruturas reliquias. Já para os túneis em rocha, o modelo foi condicionado pela classe dos maciços, pelas atitudes dos planos de fraturamento e pelos trechos das zonas de falha.

Foi possível concluir, pelas análises geológico-geotécnicas realizadas associadas à experiência de obras anteriores e consulta a referências bibliográficas, que o maciço de filonito do Túnel 2 se comporta como material "desplacável" (*ravelling ground*) perante a escavação, ou seja, possui um tempo de auto sustentação (*stand-up-*

time) definido, após o qual inicia-se o processo de escamação e depois deslocamento, comportamento semelhante ao de maciços granulares interligados por material cimentante. O tempo de auto-sustentação poderá ser maior ou menor, de acordo com a qualidade do maciço, de modo que nas zonas de falha, devido a ocorrência de planos de fraqueza lisos (*slicken-sides*), com preenchimento argiloso e quase sempre associadas com a presença de água acumulada, esse tempo é de algumas horas, enquanto que para o maciço restante será maior que um ou mais dias.

MÉTODO CONSTRUTIVO

O método construtivo adotado no projeto foi o resultado de um consenso entre as partes envolvidas na obra: órgão contratante, projetistas e empreiteiras. O método construtivo procurou otimizar os aspectos relativos de meio ambiente, segurança, custos, prazos de execução e a capacitação dos equipamentos disponíveis das empreiteiras.

No Túnel 2, no trecho de filonito, devido as características desfavoráveis desse maciço, a posição elevada do nível d'água e a densa ocupação

de moradias na área (situadas em uma sela topográfica com baixa cobertura), levaram à preferência por um método construtivo que resultasse em boas condições de estabilidade e menores recalques na superfície.

Disso resultou para esse túnel a escolha do método de escavação com galerias laterais (*side-drifts*) por apresentarem as seguintes vantagens:

a) possibilidade de se construir um apoio eficiente para o pé direito do túnel, junto das paredes definitivas da galeria lateral, para dar melhor condição de estabilidade à abóbada por ocasião da escavação da calota principal; b) possibilidade de obter a drenagem completa do maciço; c) possibilidade de permitir o mapeamento geológico da escavação facilitando a determinação mais precisa dos trechos do maciço a receberem os tratamentos de estabilização previstos para a abóbada; d) permitir a observação do comportamento da escavação mediante o acompanhamento da frente e da instrumentação instalada, assim como a obtenção dos parâmetros de deformabilidade do maciço mediante cálculos de retro-análise a fim de aferir os parâmetros geomecânicos adotados no projeto; e) possibilidade de execução de ensaios "in-situ" e retirada de blocos indeformados para ensaios especiais e aferição dos parâmetros de projeto antes da escavação da calota.

Ainda, para o caso do Túnel 2, no trecho de filonito, foram adotados os diversos procedimentos apresentados a seguir, como linhas de defesa para uma segurança adicional, a fim de que a escavação da calota do túnel, considerada a fase mais crítica da obra, fosse feita com a segurança indispensável, sem necessidade de tratamentos sistemáticos de estabilização. Os procedimentos foram os seguintes: 1) Escavação somente em maciço drenado; 2) Escavação somente em trecho de maciço previamente classificado a partir da realização de furos exploratórios no centro da calota; 3) Rebaixamento prévio do lençol freático por meio de sistema de drenagem a vácuo; 4) Escavação em seção e altura pequenas; 5) Utilização de cambotas metálicas treliçadas; 6) Utilização de concreto projetado aplicado imediatamente após a escavação; 7) Passo de avanço limitado a 0,80m; 8) Utilização de pregagem sistemática na frente da escavação; 9) Preservação no núcleo central como berma de equilíbrio.

Para os túneis em rocha, o método construtivo adotado foi o da escavação com desmonte a fogo em duas fases, ou seja, em calota/bancada, com uma defasagem mínima de 20m entre ambas, ficando sob responsabilidade da empreiteira, por razões contratuais, o plano de fogo e o decorrente controle das sobre-escavações (*over-breaks*) e a parcialização da seção em função de seus equipamentos. Assim, a calota vem sendo feita com parcialização por túnel piloto central de menor ou maior dimensão em cada túnel, dependendo do porte e do número de braços dos jumbos de perfuração que cada empreiteira possui. Entre a frente do túnel piloto e a dos alargamentos laterais foi previsto uma defasagem com cerca de 15m.

Apresentam-se a seguir, apenas como exemplo, as fases de escavação do Túnel 2:

Galerias laterais (side-drifts)

São de seção ovóide com 6,00m x 7,00m (largura x altura), localizados na região do pé direito das cambotas metálicas principais. As frentes de escavação entre as galerias laterais mantêm uma defasagem entre si sempre maior que 15m.

Apoios do pé direito da abóbada

Consistem de um trecho de parede e de arco invertido de concreto armado moldado com um enrijecimento próximo dos rins, de cada um dos lados definitivos das galerias laterais, onde a espessura do revestimento de 1ª fase foi aumentada. Pretendeu-se com esse recurso favorecer que a interação solo/revestimento ocorresse no campo elástico, evitando a plastificação do maciço acima da abóbada. Este método substitui com vantagens

o método de escavação parcializada em calota/bancada tradicional, pois elimina a fase de escavação sob o apoio da calota, considerada a mais crítica, que é em geral a causa de excessivos recalques na superfície, e de parte dos acidentes relatados na literatura.

Abóbada central

É constituída de cambotas treliçadas e concreto projetado, sendo os pés das cambotas aparafusados nas cambotas das galerias laterais já executadas. A escavação para essa operação consiste de uma escavação vertical acompanhando o contorno da abóbada, para a instalação da cambota e o lançamento do concreto projetado de 1ª fase da abóbada.

Arco invertido provisório

É constituído de concreto projetado armado com tela metálica executado a partir de escavação de sucessivas trincheiras de comprimento limitado, executado após o vazamento da calota.

SUPORTE PROVISÓRIO

Para os túneis em solo, o suporte provisório foi previsto em cambotas metálicas treliçadas e concreto projetado. As cambotas foram calculadas para suportar um carregamento geostático de altura equivalente ao semi-espacamento entre elas.

O passo de avanço e a seção máxima de escavação foram avaliados por meio dos métodos clássicos da teoria da plasticidade, delimitando-se os limites inferior e superior das configurações de ruptura. Verificou-se que as seções de escavação escolhidas para as galerias laterais (43m²) e calota (32m²) eram estáveis para o passo de avanço de 0,80m, em condições de maciço drenado, sem necessidade de tratamentos adicionais para o suporte da abóbada.

Foram feitas verificações do estado de tensões e deslocamentos no maciço pelo método das diferenças finitas utilizando-se os programas FLAC e UDEC, e pôde-se constatar para todas as fases de escavação, e

para a faixa prevista de variação do módulo de deformabilidade, que o maciço se comporta no estado elástico, notando-se apenas pequenas regiões soladas com plastificações.

Para os túneis em rocha previu-se para o suporte provisório um sistema constituído de ancoragens metálicas com resina e concreto projetado armado com tela metálica. Estas ancoragens deveriam ser executadas o mais próxima possível da frente de escavação. As ancoragens receberam aplicação de torque, quando necessária, em função da classe do maciço e da parcialização da seção adotada pela empreiteira.

REVESTIMENTO DEFINITIVO

O revestimento definitivo foi previsto em concreto moldado em forma metálica. O dimensionamento foi feito para a condição de longo prazo, considerando a atuação do empuxo hidrostático e uma degradação parcial do maciço. Uma vez que foi considerada nos cálculos a incorporação de parte da espessura do concreto de 1ª fase no revestimento final, o dimensionamento do concreto armado foi feito no estado limite último, utilizando o método dos elementos finitos, para permitir no cálculo a consideração das duas camadas de concreto distintas em resistência e idade, assim como a aderência parcial entre elas.

O revestimento foi calculado para um carregamento imposto que variou até a carga geostática máxima. Houve a compatibilidade de deformações entre o concreto e a armadura em todos os elementos discretizados e a abertura de fissuras ficou dentro dos valores limites recomendados pelo CEB para o carregamento geostático máximo e o empuxo hidrostático correspondente ao lençol freático de 10m acima da abóbada. Neste caso, como segurança adicional, caso o lençol freático venha a se recuperar ao longo do tempo com uma altura superior à anterior-

mente admitida, foram previstos drenos de alívio de subpressões no arco invertido definitivo.

TRATAMENTOS DO MACIÇO

Para os trechos de túnel em solo foram utilizados, na fase de escavação, principalmente os seguintes tratamentos para o maciço: a) rebaixamento do lençol freático na frente da escavação por meio de drenos sub-horizontais a vácuo, com pequena inclinação positiva/negativa e desvio lateral, dispostos nas paredes das galerias laterais, de modo sistemático, sempre que a escavação



Túnel 3 - Emboque Jesus.

era feita abaixo do lençol freático original. Caso viesse a se verificar a recuperação do lençol freático, em altura significativa por ocasião da escavação da abóbada, os dispositivos de rebaixamento seriam reativados para executar a escavação em condições de maciço drenado; b) pregagem horizontal eventual na face frontal da escavação das galerias laterais, porém de uso sistemático na face da abóbada, no trecho de ocorrência de filonito; c) enfilagens injetadas com tubo "schedulle" para a abóbada nos emboques, nas zonas de falha e nas transições bruscas solo/rocha abaixo do lençol freático. Para as galerias laterais foram previstas enfilagens injetadas com tubo "schedulle" ou com vergalhão, ambos de aplicação eventual e em trechos localizados, em função do comportamento do maciço perante a escavação.

Ressalta-se também que foram previstos de modo particular e localizado em um dos emboques do Túnel 3, pregagens de frente com colunas tipo CCP horizontal e enfilagens tipo bulbo contínuo, como alternativa à pregagem e enfilagem convencional.

Para os túneis em rocha, foi previsto nos emboques um tratamento de injeção de calda de cimento para diminuir as infiltrações de água e forçar a sua concentração em pontos localizados a fim de facilitar a captação e condução das águas de infiltração para as canaletas do sistema de drenagem principal do túnel.

INSTRUMENTAÇÃO

Para os emboques dos túneis em solo e o trecho de filonito do Túnel 2, foi previsto um programa de instrumentação para a monitoração do maciço durante a escavação, consistindo de marcos de recalque, tassômetros, indicadores de nível d'água, piezômetros, inclinômetros, pinos de deslocamento e pinos de convergência. Para os túneis em rocha, foi previsto apenas pinos de convergência em seções mais espaçadas que as dos túneis em solo.

COMENTÁRIOS FINAIS

De maneira geral, o comportamento do maciço durante a escavação, avaliado pela inspeção visual da frente e instrumentação instalada, está dentro do previsto. Salienta-se que vem sendo estudada a adaptação do projeto do revestimento definitivo dos túneis para concreto projetado armado com tela metálica e/ou concreto projetado com fibras metálicas, a fim de diminuir o custo e o prazo de execução da obra. ■

*DERSA - DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A.

**VETEC ENGENHARIA S/C LTDA.

***CONSULTOR DA DERSA - DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A., E DIRETOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÕES CIVIS DO INSTITUTO DE ENGENHARIA.