

ESCAVAÇÃO DOS TÚNEIS DA PISTA DESCENDENTE DA RODOVIA DOS IMIGRANTES, SP

Luís Rogério Martinati¹; Mário J. Motidome², Juan Küster³ & Cíntia C. Schultz⁴

Resumo - A construção da pista descendente da Rodovia dos Imigrantes entre a cidade de São Paulo e a Baixada Santista envolve a escavação de 8.230m de túneis com seção escavada de até 160m². O trabalho busca apresentar as principais características dos túneis e as principais inovações metodológicas adotadas na escavação desses túneis.

No trecho em solo, a parcialização da escavação prescindiu da execução de Arco Invertido Provisório utilizando-se cambotas com larga base de apoio e melhoria das fundações com o agulhamento de micro-estacas injetadas. A estabilidade de teto e frente é reforçada com enfilagens armadas e pregagens de barras de fibra de vidro. O acompanhamento da frente e da instrumentação permitiu a rápida intervenção quando houve necessidade de reforço nos dispositivos auxiliares de escavação.

Nos trechos em rocha, escavado em “drill and blast”, utilizaram-se equipamentos de perfuração computadorizados, robôs de concreto projetado, concreto projetado com fibra, utilização eventual de chumbadores “Swelllex” e utilização de formas auto-portantes de grande diâmetro para o concreto moldado. O controle sobre a operação dos “Jumbos” resultou em índices de sobrescavação planejados e possibilitou inferir, através da velocidade média de perfuração dos furos da carga, a qualidade do maciço rochoso a ser escavado.

Abstract - The construction of a new road link between São Paulo city and the Santos seaside involves the excavation of 8,230m of tunnels of 160m² section in some stretches. The paper presents the main features of the tunnels besides some of the most important technological and design improvements used in the excavations.

On the soil stretches, the stability of the heading excavation was assured by injected micro-piles that provided additional support to the bracketed ribs thus avoiding the need of closing the temporary inverted arch. Face stability was attained by soil nailing using fiber glass rods. The constant face mapping and instrumentation follow-up allowed fast decision-making regarding the necessity of additional micro-piles.

On the rock stretches the “drill and blast” routine used computer aided perforation equipment, robots to apply shotcrete, fiber reinforced shotcrete, Swellex bolts and large diameter formworks. The strict control of the jumbos operation reduced the overbreak to minimum levels and also allowed to foresee the rock mass quality through the monitoring the mean penetration rate when perforating the blast holes.

Finally, due to the scarcity of previous investigations, the original design had to be constantly updated, thus emphasizing the importance of a proactive technical assistance to the work.

Palavras-Chave – Túneis, Metodologia Construtiva, Modelo Geomecânico

INTRODUÇÃO

A ligação entre a cidade de São Paulo e a Baixada Santista está sendo complementada com a construção da Pista Descendente da Rodovia dos Imigrantes. A construção dessa pista, a cargo do Consórcio Imigrantes (Construtora CR Almeida e Impregilo), envolve investimentos de R\$ 600 milhões (valores de 06/99) e possibilitará a ampliação da capacidade de tráfego no Sistema Anchieta-Imigrantes dos atuais 8.500 veículos/hora para 14.000 veículos/hora.

A obra é marcada por diversos desafios, desde os naturais – vencer uma íngreme encosta; aos ambientais – executar a obra com mínimos impactos ao meio ambiente e, finalmente geotécnicos – enfrentar uma ampla gama de materiais de distintos comportamentos.

Nos túneis, em particular, todos esses fatores se manifestaram de forma aguda. Em face do pequeno nível de investigações prévias, em decorrência das dificuldades de acesso e das limitações impostas pela legislação ambiental, o projeto original foi sendo constantemente adaptado à realidade que as escavações mostraram, enfatizando a necessidade de um rígido e criterioso acompanhamento da obra.

CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

A Serra do Mar é uma feição marcante do sudeste brasileiro, com extensão de cerca de 1000 km. *Grosso modo*, a Serra do Mar no trecho das obra é representada por um relevo montanhoso, geralmente recoberto pela Mata Atlântica, onde predominam amplitudes de 600m e declividades entre 30% e 100%. As cristas, controladas pela disposição das camadas geológicas, orientam-se com atitude média N50E, sendo rompidas por vales transversais de rios que entalharam profundamente a Serra como, os rios Pilões e Marcolino que foram cruzados no traçado dos túneis. A rede de drenagem, de alta densidade e condicionada por diversas estruturas regionais, forma vales fechados e interflúvios de topos agudos e dirige-se diretamente ao mar, fato que marca e define a Província Geomorfológica Costeira.

1 Engenheiro Geotécnico - Consórcio Imigrantes/ATO

2 Geólogo - Consórcio Imigrantes/ATO

3 Engenheiro - Impregilo

4 Engenheira – Consórcio Imigrantes/ATO

No sopé dos taludes e em bolsões localizados, principalmente na metade inferior da Serra, podem ocorrer espessos depósitos de tálus, que são marcados por uma notável quebra de relevo.

Geologia

Os túneis da Pista Descendente da Imigrantes se desenvolvem principalmente no Bloco Tectônico Juquitiba (IPT, 1981), que é separado do Bloco Tectônico Costeiro pela falha de Cubatão. Nesse último bloco predominam rochas metamórficas de grau médio a elevado, cortadas por rochas graníticas relacionadas ao Complexo Piaçaguera (Hasui e Sadowski, 1976; Sadowski e Motidome, 1985). As rochas na encosta (Bloco Juquitiba) são xistos, gnaisses e granitos relacionados ao Grupo Paraibuna (Hasui et al., 1994) cortados localmente por diques de rochas ígneas básicas. Na porção inferior da encosta, associadas ao Sistema de Falhamento de Cubatão, ocorrem camadas de filitos, quartzitos e calcários dolomíticos de grau de metamorfismo mais baixo, além de filonitos e milonitos.

A grande extensão dos túneis implica na ocorrência de rochas distintas ao longo das escavações assim, enquanto os túneis TD-01 e TD-02 desenvolvem-se francamente no Bloco Juquitiba (Grupo Paraibuna), o TD-3/4 intercepta rochas associadas à Zona de Cisalhamento de Cubatão e do bloco Juquitiba.

Dentre as muitas surpresas relacionadas à litologia que a Serra do Mar apresentou durante as escavações, merecem ser destacados alguns aspectos. O primeiro diz respeito a um corpo de biotita granito tardio, não mapeado em superfície, apresentando diversas fácies, desde um granito cinza, de granulação grossa, pouco foliado; biotita granito róseo, de granulação média a grossa até um granito branco, equigranular, de granulação grossa. Uma segunda surpresa refere-se à presença de bandas de alteração acentuada, mesmo a grandes profundidades. No túnel TD-1 e no TD-2 Santos essas bandas alteradas mostraram-se sinuosas, porém subparalelas e contidas no bandamento metamórfico. No TD-1, que é paralelo à estrutura regional, essas faixas alteradas se estenderam por trechos longos, inclusive necessitando a adoção de tipo de suporte mais reforçado não previsto pelo Projeto. Finalmente, deve ser reportada a ocorrência de uma larga faixa de biotita xistos e rochas cálcio-silicatadas de grau metamórfico baixo a médio no TD-3/4 Santos. Essa faixa se demonstrou importante pois condicionou uma faixa mais alterada muito mais extensa que aquela prevista em projeto, o que estendeu a etapa de tratamento.

As rochas mostram uma complexa deformação polifásica como atestam as dobras intrafoliares de um bandamento anterior e dobras abertas de amplitude métrica de fase deformação posterior. Três famílias de fratura foram observadas de forma generalizada, uma primeira, com orientação N50E vertical, subparalela à foliação e uma segunda, com orientação N40W vertical, aproximadamente ortogonal ao bandamento e uma terceira família subhorizontal. Além dessas famílias sistemáticas, uma família esporádica corresponde à fraturas de direção N-S subverticais, que freqüentemente se mostraram portadoras de água, chegando a formar quase que cortinas de água no TD-1. Menciona-se ainda a família de grandes fraturas planas que ocorreu no TD3/4. Tais fraturas se desenvolveram principalmente no granito, com direção e mostraram-se importante, do ponto de vista geomecânico, pois condicionavam a queda de blocos de até 12 m³.

Surpresas do ponto de vista estrutural referem-se à falhas normais e de cavalgamento, principalmente nos túneis TD-1 Santos e TD-2. Tais estruturas, não previstas nos documentos de projeto, chegam a gerar uma brechação localizada e mostram arraste do bandamento, sempre com orientação N60-70E com caimento de 50° a 80° com caimento para NW. Estas estruturas foram importantes do ponto de vista geomecânico por condicionar trechos localizados de maciço de pior qualidade. Finalmente, citam-se falhas de direção dominante N70W 75NE, com espessura de 3 a 6m de rocha totalmente cominuída, que exibiram rápidas mudanças no seu grau de alteração tanto em direção transversal quanto longitudinal, como as que ocorreram no TD-3/4.

CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO E COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA

Modelo geomecânico inicial

O modelo geomecânico inicialmente proposto pela projetista fundamentou-se na expectativa que a grande cobertura dos túneis favoreceria a ocorrência de maciço de excelente qualidade. A projetista identificou os principais litotipos e estruturas geológicas o que permitiu a extrapolação mais controlada das sondagens, situadas principalmente nos emboques em função das dificuldades de acesso e de restrições de trabalho no Parque Estadual da Serra do Mar.

Os litotipos se distribuíam ao longo de corpos lenticulares justapostos, segundo um padrão geral amendoado. Em função da interpretação da vigência de regime compressional de direção NW-SE, as estruturas de direção NE se encontrariam fechadas e portanto mais poupadas da alteração, dessa forma, as características geotécnicas de melhor qualidade se distribuíam ao longo da foliação/bandamento nos trechos de maior cobertura. Esse maciço seria cortado por fraturas de direção NW que estariam mais abertas e portanto condicionariam trechos de maior alteração e maior aporte de água para a escavação, por se situarem paralelas ao campo de esforços neotectônicos. Em resumo o modelo geomecânico inicial admitia grandes extensões contínuas de maciço de melhor qualidade, que seriam interrompidas por trechos discretos de maior alteração/percolação d'água condicionados pela fraturas NW (Shibasaki et al., 2002).

Modelo geomecânico revisado

À medida que as escavações se desenvolviam, a equipe de ATO do Consórcio Imigrantes reportou a presença de feições geológicas distintas e inesperadas e, principalmente, um descompasso das previsões iniciais da Projetista no

tocante à extensão e distribuição de classes de maciço rochoso. A equipe de consultoria técnica da projetista (CTO), Figueiredo Ferraz, revisou o modelo geomecânico, identificando (Shibasaki et al, 2002):

- A maior presença de classes de maciço mais pobre em detrimento do maciço de melhor qualidade. Tais classes de rocha mais pobre distribuíam-se segundo a foliação;
 - Que a distribuição de classes de maciço não estava diretamente relacionada à cobertura, ou seja, ocorrência de maciço pobre mesmo em condições de muita cobertura (mais de 300 m);
 - Que o traçado do topo rochoso mostrou-se mais irregular que o inicialmente previsto, pela conjugação de bandas alteradas na foliação e na família de fraturas subhorizontais e
 - Intensa variação de classes de maciço comandada pela distribuição de padrão amendoado de litotipos menos resistentes à alteração, resultando em modificação significativa das extensões de cada classe de maciço.
- Tais reinterpretações resultaram em um impacto nos quantitativos inicialmente previstos no tocante a concreto projetado e tirantes, além do próprio ciclo de escavação, que se alongou em função de maior aplicação de suporte.

Seções –Tipo

O projeto inicial definiu seções-tipo para cada trecho do maciço, de acordo com a caracterização de classes de maciço e sua distribuição ao longo dos túneis a serem escavados, porém esse projeto foi adaptado pela equipe de ATO para melhor se adequar às condições encontradas nos túneis, como apresentado na Figura 1.

A **seção-tipo A**, utilizada no trecho em solo dos túneis, foi executada em câmara cônica, com avanço de 10,4m por lance, aproveitando melhor as enfilagens e pregagens frontais. A escavação contava com leque de enfilagens armadas com tubo “schedule” 40 de 2½” com 13 metros de comprimento na coroa e pregagens de tubos de fibra de vidro de 15m de extensão na frente de escavação. O Arco Invertido Provisório foi substituído por apoios alargados (sapatas) e melhoria da fundação através do agulhamento do maciço com micro-estacas de 7,5 m de comprimento, injetadas com calda de cimento ou através de técnica de bulbo contínuo. Essa adequação do projeto conferiu maior agilidade ao avanço da calota e flexibilidade ao planejamento do rebaixo. Dispositivos auxiliares incluem drenagem eventual com ponteiros a vácuo e drenos horizontais profundos. Essa metodologia executiva alternativa é melhor explicitada na Figura 2.

A **seção-tipo B1** foi utilizada nos trechos onde o solo ainda requeria a proteção da coroa e a utilização de cambotas metálicas, mas que prescindiam do tratamento de frente e do fechamento do AIP, ou da execução de micro-estacas na região da fundação. A **seção-tipo B2** foi utilizada nos trechos em que a porção superior da escavação estava em solo, requerendo a utilização de cambotas metálicas, e a porção do rebaixo estava em maciço rochoso, onde o suporte de primeira fase consistia de tela metálica, chumbadores e 15cm de concreto projetado. Os pés das cambotas são ancorados com tirantes radiais.

As seções-tipo **C**, **D** e **E** são seções para a escavação em rocha, ou seja, sem a utilização de cambotas ou dispositivos prévios de tratamento do maciço. Nestas seções foi utilizado o concreto projetado como suporte primário, complementado pela utilização de tirantes de resina que objetivam a contenção localizada de blocos, evitando a desarticulação do maciço.

Na **seção-tipo C** adotou-se um suporte com tirantes de 4,50m para 15 tf, aplicados de forma sistemática com malha de 1,5 x 1,5~2,0 m e camada de 15 cm de concreto projetado com fibras. Uma sub-classe denominada **tipo Cbx** foi estabelecida pela equipe de ATO, que consiste de suporte com tirantes de 6,0 m para 25 tf, de resina ou injetados com calda de cimento, aplicados de forma sistemática com malha de 1,5 x 1,5m e camada de 15 cm de projetado com tela metálica. O passo de avanço foi da ordem de 1,5 a 2,5m

Na **seção-tipo D** adotou-se suporte com tirantes de 4,50m para 15tf, com malha de 2,0 x 2,0~2,2m e camada de 10cm de concreto projetado com fibras. O passo de avanço foi da ordem de 2,5 a 3,5m.

Na **seção-tipo E** adotou-se suporte com tirantes de 4,50 m para 15 tf, com malha de 2,5 x 2,5~3,20 m e camada de concreto projetado com fibras com 5 cm de espessura. O passo de avanço foi da ordem de 3,5 a 4,0 m.

O projeto inicial previa a **seção-tipo F** com tirantes de 4,50 m para 15 tf, aplicados de forma eventual e camada de concreto projetado de 5 cm de espessura. Esta seção foi utilizada em apenas 0,5% das escavações.

PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA ATO

Tratamento da frente e teto (trechos de solo)

O tratamento para o trecho em solo no projeto original previa leques de enfilagens de colunas justapostas de solo-cimento e agulhamentos de frente com CCPH ou leques de enfilagens injetadas armadas com tubo “schedule” e pregagens de frente armadas com tubos de fibra de vidro em maciços mais resistentes. As escavações seriam em câmara cilíndrica com lances de escavação de 7,2m e uso sistemático de arco invertido provisório (AIP). A execução de enfilagens de CCPH mostrou-se infrutífera, devido ao refluxo da calda. Verificou-se também alguns trechos não necessitavam de consolidação, mas apenas uma proteção mecânica dos avanços contra o desprendimento de blocos.

Assim, foi proposto um tratamento que consistia de um leque de enfilagens tubulares injetadas (13m) para a proteção mecânica contra a queda de materiais e uma malha de tubos de fibra de vidro (15m) disposta na frente de avanço limitando o relaxamento da cavidade e a dimensão dos deslocamentos. A análise mais aprofundada de custos e prazos recomendou a escavação em câmara cônica, com avanço de 10,4m por lance, aproveitando melhor as enfilagens e as pregagens frontais. A mudança da metodologia dos tratamentos propiciou segurança adequada e uma boa produtividade dos trabalhos, atingindo-se, de forma consistente, a meta prevista de 40 a 45 m/mês de avanço.

Eliminação de Arco Invertido Provisório

Nas escavações parcializadas em calota e rebaixo, os esforços na meia-seção escavada são equilibrados, em geral, com o fechamento de um arco invertido provisório (AIP), o que impõe prazos dilatados, seja durante a sua implantação seja na sua remoção, quando da execução do rebaixo. Nos trechos de solo dos túneis da Imigrantes, uma metodologia alternativa foi utilizada com sucesso. Baseia-se na utilização de cambotas treliçadas com pés alargados (“pata de elefante”) e linhas de micro-estacas injetadas com o objetivo de “costurar” o solo de fundação (rim), evitando-se assim a que ocorrência de perda da capacidade de suporte devido a mobilização de cinemáticas de rupturas em planos de fraqueza pré-existent (estruturas reliquias) durante a escavação da calota, e principalmente do rebaixo. Em alguns trechos foi necessário o atirantamento radial na região do “rim”, substituindo de certa forma o confinamento lateral dado pelo AIP. As principais vantagens dessa metodologia são simplificação geral dos trabalhos e, principalmente, o desenvolvimento de atividades do rebaixo simultaneamente com a execução do tratamento da calota do túnel, otimizando o aproveitamento da equipe e equipamentos de escavação. Detalhes dessa metodologia podem ser observados na Figura 2.

Estratégia de Atirantamento e Consolidação Radial

O projeto original indica tirantes resinados, aplicados de forma sistemática com 4,50m de comprimento para 15tf em maciço classe III/II e 10tf para maciços menos competentes, em malha definida para cada tipo de seção. Entretanto, nos locais onde o sistema de descontinuidades isolava cunhas e blocos de grandes dimensões, foi necessária a aplicação de tirantes de 6,0m de comprimento para até 20tf de carga. São tirantes resinados em aço especial e foram instalados em furos direcionados para interceptar o sistema de descontinuidades. Em outros casos, quando se pretendia intervir de imediato em situações emergenciais ou quando a abertura das descontinuidades poderia propiciar a fuga da resina, foram utilizadas ancoragens mecânicas, tipo Swellex, com barras de 6,0m para até 20tf. Este tipo de ancoragem, apesar de custo elevado, apresenta a vantagem da rápida aplicação e ação imediata.

Na presença de trechos alterados, como na região das falhas geológicas, somente foi possível estabilizar a seção com aplicação de chumbadores radiais de 6,0m fixados com injeção de argamassa, calda, ou resina, para até 20tf. Em casos mais extremos, o atirantamento com barras de 6,0m para 20tf foi associado a uma consolidação radial, com injeções de calda de cimento através de tubos manchetes montados sobre tubo de PVC.

Reforços Adicionais – Seção Tipo C baixa

A equipe de ATO (Consórcio Imigrantes) caracterizou uma nova seção-tipo, a seção Cbaixa, não definida no Projeto Básico. Essa definição ocorreu após algumas intervenções repetidas em determinadas regiões dos túneis, em função da ocorrência de trincas ou de deformações excessivas indicadas pela instrumentação, mesmo após a aplicação correta de todo o suporte recomendado para a seção C. Estes trechos caracterizavam-se seja por uma alternância entre bandas muito alteradas e bandas de rocha alterada, ou ainda por um trecho de rocha muito deformada, medianamente alterada a alterada, com presença de película argilosa. Tipicamente os valores de RMR (Bieniawski, 1989) situaram-se por volta de 21 a 32.

De forma a assegurar a estabilidade da escavação, foi proposto um suporte mais reforçado que envolvia a aplicação inicial de 5 cm de concreto projetado, aplicação de tela Q283, complementação de 10 cm de concreto projetado (total de 15 cm) e instalação de tirantes de 6m de comprimento para 25 tf, em malha de 1,5X1,5m.

Mapeamentos de frentes e das infiltrações

Uma das atividades mais freqüente da equipe de ATO (Consórcio Imigrantes) foi o mapeamento continuado das frentes de escavação, em conjunto com a avaliação dos dados de instrumentação. A documentação da variação das classes de maciço (e portanto de todos os parâmetros que constituem os sistemas de classificação geomecânica) subsidiou uma série de tomadas de decisões tais como os locais a receberem suporte adicional, os trechos do revestimento secundário a serem armados com tela, os trechos de muretas do tipo mais ou menos reforçados, etc. Mapearam-se também as infiltrações na escavação e no concreto projetado, o que subsidiou a locação dos drenos do sistema de drenagem definitiva dos túneis.

Redução da Sobre-escavação

A utilização de todos os recursos de equipamentos computadorizados tipo Jumbo (Atlas Copco, modelos WL3C e 353S) é tarefa que demanda extenso treinamento. Durante a perfuração do túnel TD-1 as equipes de perfuração ainda sofreram com o noviciado, resultando em sobre-escavação excessiva no TD-1. Sob a orientação da equipe de ATO, os procedimentos de navegação (posicionamento) foram explicitados e, principalmente, foram aperfeiçoados os planos de fogo e a operação de perfuração dos furos de carga. Os principais aperfeiçoamentos referem-se aos pontos de partida das perfurações, aos ângulos de abertura com relação ao eixo do túnel e à utilização do sistema de plano virtual, abandonando o sistema de se perfurar todos os furos com o mesmo comprimento.

Tais melhoramentos resultaram em uma expressiva redução na sobre-escavação, trazendo-a para os níveis normalmente praticados em países com maior tradição na utilização de equipamentos similares. Assim, no TD-1 a sobre-escavação atingiu 110%, enquanto que no TD-2 e TD3/4 atingiu-se respectivamente sobre-escavações de 66% e

68%. A porcentagem de sobre-escavação refere-se à espessura do revestimento secundário (35 cm) assim, uma sobre-escavação de 50% significa uma sobre-escavação de 17,5cm. Importante notar que a sobre-escavação construtiva mínima, ou seja, aquela que mantém o gabarito interno mínimo nos sucessivos fogos gira ao redor de 40% .

Acompanhamento das Velocidades de Perfuração

O monitoramento da operação do Jumbo permitiu à equipe de ATO acompanhar a velocidade de perfuração dos furos de carga, pois o computador de bordo registra alguns parâmetros de perfuração, como o comprimento e o tempo de perfuração de cada furo. O plano de fogo da meia-seção envolve a perfuração de 99 a 115 furos ($\phi = 48\text{mm}$ ou 51mm) e comprimento variável entre 3 e 4,3m.. Dessa forma, a cada avanço, a equipe de ATO possuía um quadro da velocidade média de perfuração de uma frente que seria mapeada em seguida, o que permitiu, após um período de observação, correlacionar a velocidade de penetração e a qualidade do maciço rochoso.

Obteve-se assim, a correlação empírica, apresentada na Figura 1, entre a qualidade do maciço rochoso e a velocidade de penetração. Esse tipo de controle foi considerado mais representativo que a execução de um furo principalmente quando a orientação do túnel era paralela ao bandamento, pois a sondagem pode interceptar uma banda excepcionalmente boa ou má, falseando a interpretação sobre a qualidade do maciço.

O fato mais auspicioso desse controle prende-se ao fato de se conhecer com antecipação a qualidade do maciço rochoso a ser escavado, preparando-se às condições adversas de rocha que porventura se encontrava na escavação. Assim, caso alguma anomalia fosse detectada, dois ou três furos mais longos eram executados para se confirmar a mudança de condição da classe de rocha. Complementarmente, as velocidades foram contornadas por programas específicos, de maneira que se podia executar um mapeamento indireto das condições da frente de escavação.

SÍNTESE DOS COMPORTAMENTOS GEOTÉCNICOS E MEDIDAS ADOTADAS

A principal contribuição da equipe de ATO para a obra foi a constante atuação no sentido de avaliar, propor e documentar as principais alterações no projeto que se demonstraram necessárias, face às escavações. Mesmo que o maciço fosse mais investigado, dificilmente se poderia ter percebido algumas diferenças de comportamento entre os túneis, interpretados como decorrentes de suas orientações em relação às estruturas geológicas e de sua cobertura.

Assim, no TD-1, paralelo às estruturas, predominaram estruturas mais alteradas, alinhadas ao eixo do túnel, que mostraram relaxamento progressivo com as detonações, com aumento de volume, mas homogêneas e de baixa permeabilidade. No TD-2, parcialmente discordante das estruturas regionais e mais cortical à encosta, predominaram estruturas alinhadas e que cortavam o túnel. Nesse túnel houve uma melhor correspondência entre os vales e trechos mais alterados e que se constituíam em caminhos preferenciais de percolação nos túneis. No TD-3/4 ocorreu um trecho não previsto de material alterado que requereu a extensão do tratamento do maciço fraturado (no lado Santos) e a coalescência de duas zonas de falhas (lado São Paulo) que condicionaram um maciço pobre a muito pobre, que mostrou rápidas mudanças no grau de alteração tanto transversalmente quanto longitudinalmente a tais falhas. Tais condições não previstas ou imprevisíveis resultaram na dilatação na conclusão antevista desse túnel em cerca de 5 meses.

Resumidamente, os principais problemas encontrados e as contribuições da equipe de ATO do Consórcio Imigrantes foram:

- Extrema variabilidade na qualidade do maciço – adoção de escavação em meia seção para melhor enfrentar as mudanças bruscas da qualidade do maciço, embora os equipamentos permitissem a escavação em seção plena
- Acompanhamento estrito dos procedimentos operacionais do Jumbo - redução da sobre-escavação, além de permitir inferir de modo mais representativo a qualidade do maciço a ser escavada
- Desplacamentos de frente – manutenção de núcleo e intensificação da pregagem de frente,
- Combate às convergências excessivas na meia-seção - atirantamento radial das cambotas (sem AIP), possibilitando intervir antes do rebaixo.
- Combate a recalques excessivos – intensificação do número e/ou comprimento de estacas
- Dificuldade de consolidação de CCPH – mudança para enfilagem armada com injeção simples;
- Trecho alterado e homogêneo dentro da faixa, baixa permeabilidade TD1, em trecho que relaxava com as detonações (películas de argila, expansão nas detonações) – uso de costelas de projetado e consolidação radial
- Alterações no TD2 em seções alteradas, bastante heterogêneas que cruzavam a frente - Cbx localizadas
- Presença de água no rebaixo do (3/4 Santos) que degradava o saprolito - uso de ponteira à vácuo
- Ocorrência de trechos de rocha muito cisalhada, com alteração variada – criação de uma nova seção-tipo Cbaixa, com 15 cm de concreto projetado, tela Q283 e tirantes de 6,0m para 25 tf em malha de 1,5X1,5m
- Grandes blocos em descontinuidades coerentes, planas e lisas – colocação de cambota para retornar a forma
- Grandes blocos – utilização de chumbadores Swellex
- Tensões “in situ” com “popping” nas frentes paralelas à foliação/fraturas - tirantes inclinados à frente, projetado na frente e aplicação de sobresspessura de concreto projetado após 48 h
- Trechos muito alterados - tratamento com tirantes radiais injetados através de válvulas manchetes
- “Overbreak” excessivo – modificação dos procedimentos executivos do Jumbo e do plano de fogo
- Baixa representatividade de sondagens na frente de escavação – acompanhamento das velocidades de perfuração permitindo a inferência da qualidade do maciço rochoso

Claramente, o ponto principal que não pôde ser contornado refere-se às extensões e distribuições das classes de maciço antevistas pelo projeto, que se mostraram otimistas quando comparado às classes encontradas nas escavações, como apresentado na Tabela a seguir.

	Projeto Básico				Escavação			
	TD-1	TD-2	TD-3/4	TOTAL (%)	TD-1	TD-2	TD-3/4*	TOTAL
Solo	248,0	133,0	480,0	861,0 (10,5%)	191,2	281,2	722,0	1.194,4 (14,5%)
Cbaixa	0,0	0,0	0,0	0,0 (0,0%)	0	232,5	59,3	291,8 (3,6%)
C	270,0	66,0	410,0	746,0 (9,1%)	928,7	578,6	120,9	1.628,2 (19,8%)
D	898,0	508,0	450,0	1.856,0 (22,7%)	1149,2	608,6	638,8	2.396,6 (29,1%)
E	981,0	788,0	700,0	2.469,0 (30,2%)	695,7	257,6	1.243,6	2.196,9 (26,7%)
F	417,0	540,0	810,0	1.767,0 (21,6%)	0,0	0,0	41,4	41,4 (0,5%)
G	300,0	60,0	120,0	480,0 (5,9%)	180,0	120,0	180,0	480,0 (5,8%)
H	0,0	0,0	0,0	0,0 (0,0%)	0,0	- -	- -	0,0 (0,00%)
TOTAL	3.114,0	2.095,0	2.970,0	8.179,0 (100,00%)	3.144,8	2.078,5	3.006,0	8.229,3 (100,00%)

* Escavação não terminada, estimativa do trecho restante: 80% em seção-tipo E, 20% em seção-tipo D

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escavação dos túneis da Imigrantes não foi isenta de surpresas, desde feições geológicas e estruturas não previstas que alteraram de maneira importante a distribuição das classes de maciço rochoso, a necessidade de reforços adicionais em certos trechos de qualidade muito pobre de maciço rochoso, ocorrência de maciço pobre com grande cobertura e de maciço de boa qualidade em trecho de baixa cobertura, etc. este cenário de constante alterações reforçou a necessidade de uma estrutura de ATO próxima da obra, permitindo uma rápida resposta aos problemas do campo.

Tratando-se de um cenário reconhecidamente difícil e com grandes incertezas face à cobertura acentuada e a restrição de detalhamento das investigações, o Projeto deve ser considerado, como sói acontecer em muitos túneis com essa cobertura, como indicativo não sendo possível antever todos os problemas encontrados. Alguns dos problemas se configuraram contrariamente ao senso comum, como a ocorrência de trechos alterados a 300 m de profundidade, etc. Dessa forma, entende-se que com a atuação constante e rápida uma equipe de ATO pode-se enfrentar um ambiente adverso de mudanças repentinas e inesperadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores registram os sinceros agradecimentos à Superintendência do Consórcio Imigrantes pelo incentivo à divulgação do trabalho, estendendo ainda esses agradecimentos à ECOVIAS dos Imigrantes pela autorização da divulgação dos dados.

Agradecemos ainda o apoio do Prof. Dr. Carlos Eduardo Moreira Maffei, bem como da equipe de CTO da Figueiredo Ferraz Engenharia e Consultoria de Projetos Ltda. pelas profícuas discussões ao longo de todo o trabalho.

Desejamos agradecer ainda a cooperação dos demais membros da equipe de ATO do Consórcio Imigrantes, em especial dos técnicos Messias Souza Coelho Gomes, José Eduardo Rocha e Heitor Fernando Maliska e dos projetistas Fúlvio Teixeira e Antônio Carlos Galotti, cujo entrosamento permitiu levar a bom termo os trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIENIAWSKI, Z.T. (1989) Engineering Rock Mass Classifications. New York, J. Wiley
- HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. (1976) Evolução geológica do Pré-Cambriano da região sudeste do estado de São Paulo. Revista. Bras. Geociências, 6 (3): 186-200. SBG, São Paulo.
- HASUI, Y. et al. (1994) Geologia do Pré-Cambriano. In: Frederico F. Falconi & Arsênio Negro Jr. (eds.). Solos do Litoral de São Paulo, 1994. Santos, ABMS - NRSP, p.41-67.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (1981) Mapa Geológico do Estado de São Paulo, 1:500.000, 2 fls.
- SADOWSKI, G.R. & MOTIDOME, M.J. (1985) O Complexo Piaçaguera no estado de São Paulo. In: Simpósio Regional de Geologia, 5, São Paulo, 1985. Atas. São Paulo, SBG, p.147-158.
- SHIBASAKI, L.S. et al. (2002 - no prelo) Evolução do modelo geológico/geomecânico dos túneis da pista descendente da rodovia dos Imigrantes. A ser apresentado no 10º. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Ouro Preto.

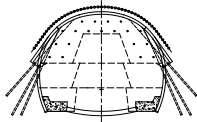
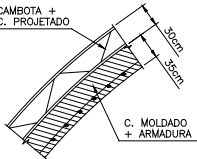
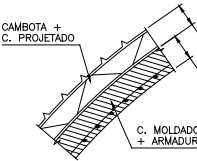
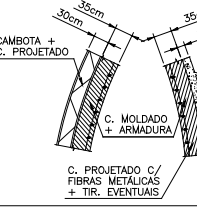
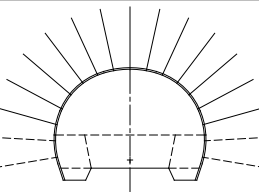
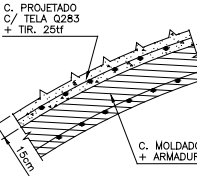
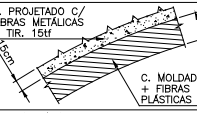
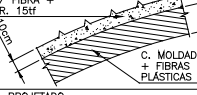
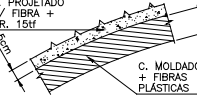
PISTA DESCENDENTE DA RODOVIA DOS IMIGRANTES – METODOLOGIA CONSTRUTIVA – A.T.O. (CONSÓRCIO IMIGRANTES)						
SEÇÕES	TIPO	CLASSE DO MACIÇO (RMR)		SUPORTE PRIMÁRIO E DEFINITIVO	MÉTODO CONSTRUTIVO	DISPOSITIVOS AUXILIARES
	A1/A3	SOLO RESIDUAL/ SAPROLITO (Ⅱ)			-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CAMBOTAS E CONCRETO PROJETADO. -REBAIXO EM 2 ETAPAS JUNTO C/ AVANÇO DA FRENTE. -FECHAMENTO DO ARCO INVERTIDO DEFINITIVO EM CONCRETO MOLDADO. -AVANÇOS=0.80 a 1.20m.	-PROTEÇÃO DE TETO C/ ENFILAGENS TUBULARES. -PROTEÇÃO DE FRENTE C/ PREGAGENS DE TUBO DE FIBRA DE VIDRO/PVC. -AGULHAMENTO DA FUNDAÇÃO C/ MICROESTACAS INJETADAS. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -PONTEIRAS À VÁCUO. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/10~20m.
	B1	SAPROLITO/ ROCHA ALTERADA (Ⅲ)			-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CAMBOTAS E CONCRETO PROJETADO. -REBAIXO EM 2 ETAPAS JUNTO C/ AVANÇO DA FRENTE. -SEM FECHAMENTO DO ARCO INVERTIDO DEFINITIVO. -AVANÇOS=0.80 a 1.20m	-PROTEÇÃO DE TETO C/ ENFILAGENS TUBULARES. -PROTEÇÃO EVENTUAL DA FRENTE. -AGULHAMENTO EVENTUAL DA FUNDAÇÃO. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -PONTEIRAS À VÁCUO. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/20m.
	B2	SEÇÃO MISTA ROCHA ALTERADA/ MACIÇO ROCHOSO (Ⅲ / Ⅳ)			-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CAMBOTA E CONCRETO PROJETADO NA CALOTA. -CONCRETO PROJETADO C/ FIBRAS OU TELA NO REBAIXO. -ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICOS NO PÉ DAS CAMBOTAS. -REBAIXO COM UMA ETAPA C/ ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICO L=4.50m, MALHA 1.50x1.50m. -SEM FECHAMENTO DO ARCO INVERTIDO DEFINITIVO. -AVANÇOS=1.20 a 1.50m.	-DESMONTE A FOGO NO REBAIXO. -PROTEÇÃO EVENTUAL DO TETO. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/20m.
	Cbx	Ⅳ _{bx} 21 ≤ RMR < 30	V _{perf} (m/min.) V ≥ 2.50		-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CONCRETO PROJETADO COM TELA. -ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICOS L=6.0m, MALHA 1.50x1.50m (CALOTA) -REBAIXO EM UMA ETAPA COM, ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICO L=4.50m, MALHA 1.50x1.50m. -AVANÇOS=1.50 a 2.50m.	-DESMONTE A FOGO. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -EVENTUAL TRATAMENTO RADIAL COM CHUMBADORES INJETADOS. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/20m.
					-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS METÁLICAS. -ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICOS L=4.50m, MALHA 1.50x1.50~1.70m. -REBAIXO EM UMA ETAPA C/ ATIRANTAMENTO EVENTUAL. -AVANÇOS=2.50 ~3.00m.	-DESMONTE A FOGO. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/30m.
	D	Ⅲ 41 ≤ RMR < 60	2.0 ≤ V < 2.25		-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS METÁLICAS. -ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICOS L=4.50m, MALHA 2.00x2.00~2.20m. -REBAIXO EM UMA ETAPA C/ ATIRANTAMENTO EVENTUAL. -AVANÇOS=3.00~3.50m.	-DESMONTE A FOGO. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/50m.
	E	Ⅲ / Ⅱ 61 ≤ RMR < 80	V < 2.00		-AVANÇO EM MEIA SEÇÃO (CALOTA) E REBAIXO. -CONCRETO PROJETADO COM FIBRAS METÁLICAS. -ATIRANTAMENTO SISTEMÁTICOS L=4.50m, MALHA 2.50x2.50~3.00m. -REBAIXO EM UMA ETAPA C/ ATIRANTAMENTO EVENTUAL. -AVANÇOS=3.50~4.00m.	-DESMONTE A FOGO. -DHP'S GRAVITACIONAIS. -INSTRUMENTAÇÃO $\cong$ 1 SEÇÃO/75m.

Figura 1 – Metodologia Construtiva dos Túneis da Pista Descendente da Rodovia dos Imigrantes

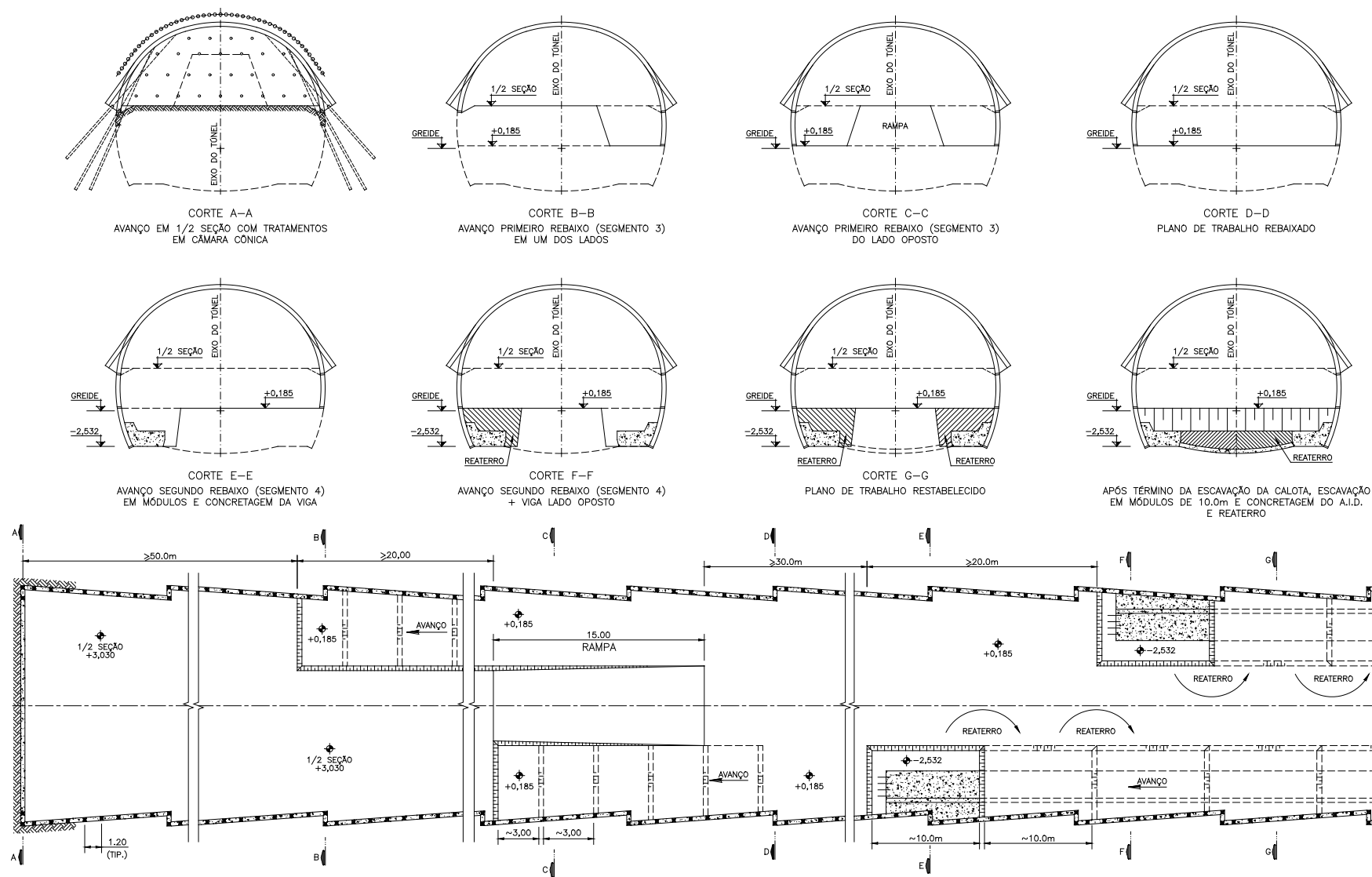


Figura 2 – Sequência Executiva da Escavação Parcializada em Solo