MONITORAMENTO DAS VELOCIDADES DE PERFURAÇÃO VS. QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO. EXPERIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DOS TÚNEIS DA PISTA DESCENDENTE DA RODOVIA DOS IMIGRANTES.

Mário J. Motidome[1] & Luis Rogério Martinati [2]

RESUMO

A construção da pista descendente da Rodovia dos Imigrantes entre a cidade de São Paulo e a Baixada Santista envolveu a escavação de 8.230m de túneis com seção escavada de até 160m2. 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 "Swellex" 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.

O trabalho busca apresentar de forma detalhada as metodologias de avaliação indireta de qualidade do maciço rochoso, através do acompanhamento e análise dos dados de velocidade de perfuração dos furos de detonação a cada frente de escavação, acreditando tratar-se de uma metodologia simples e eficiente que poderá ser aplicável a outras escavações.

Palavras-Chave – Túneis, Metodologia Construtiva, Velocidade de Perfuração.

INTRODUÇÃO

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

Os projetos dos túneis da Pista Descendente da Imigrantes contam com dois particulares que os diferenciam dos túneis rodoviários comumente escavados no Brasil:

- grande parte do traçado se desenvolve nos domínios do Parque Estadual da Serra do Mar, importante área de preservação ambiental pois abriga remanescentes da Mata Atlântica e,
- acentuada cobertura em boa parte dos túneis, variando de 120 a 500 m.

Além disso, os túneis foram escavados em terrenos de forte declividade, em geral superior a 100%, mas ainda assim com encostas cobertas por vegetação ombrófila densa.

Estas duas particularidades resultaram em uma grande dificuldade de se investigar de forma mais aprofundada os maciços a serem escavados, o que implicou em um maior detalhamento apenas nas áreas de emboque. Avançando cerca de 35m por semana em seção plena nas frentes de rocha, as perfurações exploratórias de cerca de 35m demorariam 1 semana para ser perfuradas e no mesmo prazo a área investigada seria escavada, dessa forma dobrando o prazo da obra.

Face à necessidade de se antecipar a qualidade do maciço rochoso a ser detonado e também de reduzir a sobre-escavação a equipe de ATO do Consórcio Imigrantes passou a analisar os dados gerados pelo equipamento de perfuração do plano de fogo, uma vez que se tratavam de equipamentos computadorizados que registravam e gravavam estes dados.

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 obras é representada por um relevo montanhoso, geralmente recoberto pela Mata Atlântica, onde predominam amplitudes de 600m e declividades fortes.

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. Enquanto 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), no bloco Juquitiba ocorrem xistos, gnaisses e granitos relacionados ao Grupo Paraibuna (Hasui et al., 1994) cortados localmente por diques de rochas ígneas básicas.

[1] *Diretor Geologia - motidome@zaz.com.br - Núcleo de Projetos e Consultoria - ATO*
[2] *Diretor Técnico - martinati@attglobal.net - Núcleo de Projetos e Consultoria - R.Laplace, 278 - ATO*

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.

Devido à excepcional exposição nos túneis identificou-se (Martinati et al, 2002) um corpo de biotita granito tardio, não mapeado em superfície, com fácies cinza a branca; a presença de bandas de alteração acentuada, mesmo a grandes profundidades. Reporta-se também a ocorrência de uma larga faixa de biotita xistos e rochas cálcio-silicatadas de grau metamórfico baixo a médio no TD-3/4 Santos.

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.

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). A equipe de consultoria técnica da projetista revisou o modelo geomecânico, identificando (Shibasaki et al, op. cit):

- 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;
- Correlação negativa entre a distribuição de classes de maciço e a cobertura, ou seja, ocorrência de maciço pobre mesmo com mais de 300 m de cobertura;
- 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.

Diante desse quadro foi fundamental a atuação constante da equipe de ATO, adaptando a obra às novas condições geológico-geotécnicas que se apresentavam, em especial face a intensa variação de litotipos.

DADOS DO EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO - JUMBO

Na escavação dos túneis foram utilizados três equipamentos Atlas Copco, modelo 353S e um quarto equipamento Atlas Copco modelo WL3C. Os equipamentos de perfuração tipo Jumbo são mecanicamente complexos e contam com um sofisticado sistema de gestão eletrônica que comanda e monitora suas operações, a ponto de necessitar de apenas um operador na cabina nas versões mais sofisticadas.

Para controlar todos os sistemas hidráulicos dos braços e de perfuração, o sistema de gerenciamento de perfuração necessita de uma entrada de dados da posição em que se encontra. Previamente armazenados no sistema de dados estão o traçado do túnel (coordenadas x, y, z), os planos de fogo (operador seleciona um deles), conforme Figura 1 a seguir, e as coordenadas da linha de referência do raio laser.

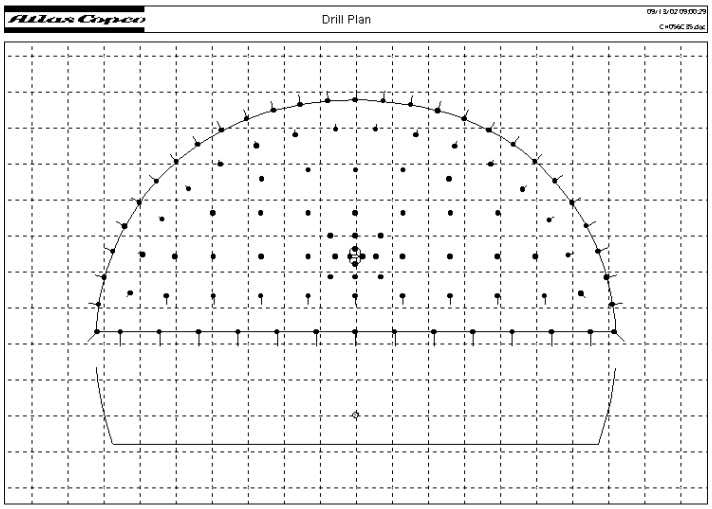

Figura 1. Plano de Fogo preparado para entrada do computador de bordo.

Após estacionar o Jumbo junto à frente, o operador recebe da topografia a progressiva daquela frente. Esse é o único dado necessário que é inserido no computador de bordo, sendo que um dos braços do equipamento é utilizado

para “amarrar” a posição do jumbo com o ponto fornecido. Após a confirmação do dado ao computador, o braço de referência se orienta em relação ao laser, e estando posicionado, é acionada uma tecla confirmando o ajuste.

A partir desse instante, automaticamente o computador de bordo realiza uma série de cálculos, que permite ao Jumbo orientar a perfuração do plano de fogo, bastando ao operador posicionar corretamente a ponta da haste sobre o ponto indicado na tela do computador e pressionar um comando.

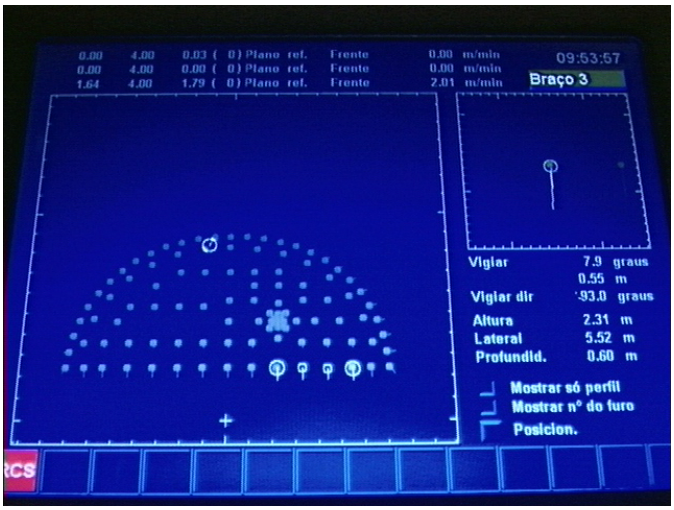

Figura 2. Foto do painel do computador do Jumbo.

A partir daí o computador realiza a operação, perfurando até a profundidade especificada. Mesmo que a superfície da frente seja irregular, dependendo da opção do tipo de perfuração desejada, os furos podem parar sobre um mesmo plano virtual.

Mais importante ainda é que cada furo de perfuração é monitorado minimamente quanto a:

- Coordenadas iniciais(x, y, z),
- Ângulo de partida,
- Comprimento perfurado;
- Tempo de perfuração

As informações do monitoramento da perfuração daquele plano de fogo são armazenadas em cartão tipo PCMCIA. Após cada perfuração um técnico da equipe de ATO buscava o cartão em campo e armazenava as informações em micro-computador.

O “log” da perfuração traz uma lista dos parâmetros acima mencionados e de outros parâmetros que permitem se elaborar um relatório gráfico como ilustrado nas Figura 3 a seguir.

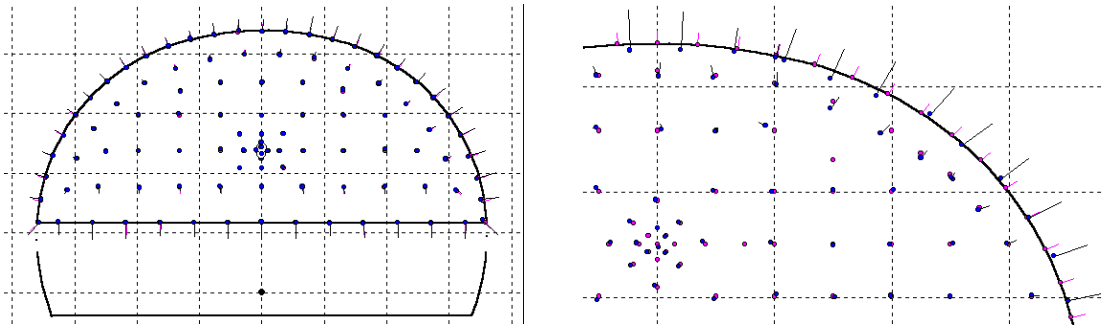

Figura 3. Exemplo de um log gráfico gerado pelo computador de bordo.

Acompanhamento da Perfuração

Os planos de fogo utilizados nos túneis da Pista Descendente da Rodovia dos Imigrantes foram elaborados para seção plena e para meia-seção e rebaixo. O plano de fogo da meia-seção envolve a perfuração de 99 a 115 furos (ϕ = 48mm ou 51mm).

Para cada classe de maciço havia um plano de fogo específico, buscando minimizar o “overbreak”. Assim, no maciço de melhor qualidade os furos de contorno situavam-se exatamente no contorno da escavação e apresentavam

comprimento de 4,5m. Nos maciços mais pobres, a perfuração se iniciava alguns centímetros dentro da seção, na expectativa de um maior “overbreak”, com perfurações de 2,0 a 3,0m

A equipe de ATO passou a controlar a qualidade da perfuração, principalmente nos quesitos correto posicionamento do Jumbo, acerto na posição inicial do furo e acerto no ângulo de partida. Foi elaborado um check-list em que se atribuíam notas aos operadores, pois o equipamento registra a operação de cada braço.

Acompanhamento das Velocidades Médias de Perfuração

O ensaio SPT e a medição da cravabilidade de estacas são dois exemplos de como a resistência à penetração de equipamentos no solo e na rocha são utilizados pela engenharia geotécnica. Thuro (1997), mostra o caso de perfuração à percussão em um calcário, mostrando a influência do valor de “Q” ou “RMR” na velocidade de avanço. Altas velocidades de avanço são fortemente correlacionadas com baixos valores de “Q” e de “RMR”. Barton (2000) mostrou que as velocidades de avanço do TBM (m/hr), a velocidade de avanço de sondagens e as velocidades sísmicas são mutuamente interrelacionadas

Como o tipo de rocha presente nas escavações é de natureza consistente (gnaisse fortemente metamorfizado e bandado), poderia ser viável e útil desenvolver um programa de correlação entre a velocidade de avanço (a um torque constante) e o valor de “Q” (ou do valor convertido de RMR ou vice-versa).

Assim, os dados de cada perfuração eram vistoriados e aqueles com velocidades de avanço extremas e irreais eram desconsiderados. Calculava-se então, com auxílio de planilha eletrônica, a velocidade média de avanço de todos os furos válidos e o desvio padrão dos dados. Paralelamente, cada frente de avanço era mapeada pelo geólogo e/ou pelos técnicos da equipe de ATO o que permitiu, após um período de observação, correlacionar a velocidade de penetração e a qualidade do maciço rochoso.

Posteriormente, obteve-se a correlação empírica, apresentada na Figura 4, 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 piloto, 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.

A manipulação dos dados mostrou ainda que não só a velocidade era importante como também o desvio-padrão. Valores altos de desvio padrão indicavam que a frente perfurada apresentava faixas de materiais de distintas resistências, o que já representava um alerta para mais atenção com eventuais problemas de estabilidade.

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.

Distribuição das Velocidades na Frente de Escavação

Outra manipulação dos dados executada foi o contorno dos dados de velocidade de cada furo de perfuração. Como mencionado anteriormente, a posição inicial de cada furo, o comprimento e o tempo de perfuração são monitorados, dessa forma para cada furo podem ser atribuídos um par coordenado x, y da posição e um terceiro “eixo” (z) que corresponde à velocidade de avanço, conforme exemplo na Figura 4 a seguir.

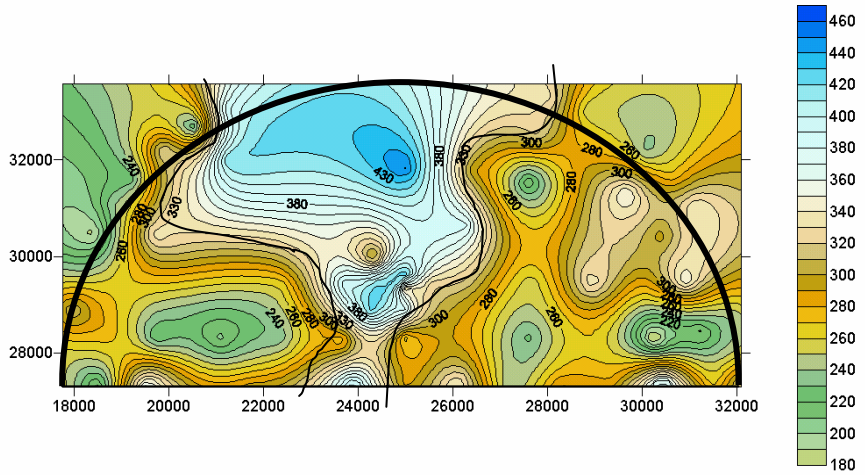

Figura 3. Exemplo de uma frente heterogênea, com faixa central menos resistente.

Por meio de programa de computador de contorno (e.g. SURFER), com método de contorneamento de krigagem e suavização das curvas, traçaram-se curvas de iso-velocidade para cada frente perfurada.

Com essa manipulação observa-se não apenas a velocidade média de todos os furos, mas também a distribuição espacial na frente dos locais com velocidades acentuadas, ou seja, podia-se observar as faixas de rocha de menor resistência (maior velocidade de penetração) e faixas de maior resistência, tornando-se uma ferramenta de mapeamento indireto da qualidade do maciço rochoso.

RESULTADOS OBTIDOS

Controle de Qualidade da Perfuração

A utilização de todos os recursos de equipamentos computadorizados é tarefa que demanda extenso treinamento. Durante a perfuração de parte do túnel TD-1 as equipes de perfuração se familiarizaram com os equipamentos. Paulatinamente, 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, medida sobre o volume de concreto moldado de projeto, partiu de 130% nas primeiras escavações para valores de 50% ao final, 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% , pois os furos de contorno dos planos de fogo desenham um tronco de cone e não um cilindro como se poderia imaginar. Isso decorre do fato da necessidade de se gerar espaço para os martelos de perfuração, pois, do contrário cada frente a ser perfurada seria menor que a anterior.

Acompanhamento das Velocidades Médias de Perfuração

O acompanhamento das velocidades médias e do desvio-padrão da velocidade ao longo das escavações permitiu a equipe de ATO elaborar os gráficos de acompanhamento como o apresentado na Figura 4. A experiência acumulada na obra mostrou que velocidades menores que 2,00 m/min e desvios abaixo de 0,25 m/min representavam classes melhores, classe II ou de melhor qualidade, velocidades entre 2,0 e 2,25 m/min representavam maciços Classe III, velocidades de 2,25 a 2,50 m/min representavam maciços Classe IV, e finalmente velocidades acima de 2,50 m/min representavam maciços classes IV baixas (limite inferior da classe).

Os desvios indicavam a heterogeneidade do maciço e maiores problemas eram detectados quando se atingia valores acima de 0,40 m/min. Importante observar que os tratamentos aplicados seguem mais juntamente as variações do desvio-padrão, fato que corrobora com a idéia de que frentes hetrogêneas tendem a ser comportar de forma não esperada, do que com as resistências médias medidas pela média das velocidades.

Nos locais onde as resitências eram baixas, com velocidades acima de 2,50 m, e onde os desvios eram elevados, foram utilizados tratamentos suplementares de estabilzação, conforme se visualiza na Figura 5 a seguir, exemplo do túnel TD-2.

Distribuição das velocidades na frente de escavação

O estudo da distribuição das velocidades médias de avanço de cada furo mostrou-se uma ferramenta útil para mostrar a variação da qualidade da rocha na mesma frente de escavação. Esse estudo oferecia uma visão indireta da qualidade do maciço rochoso que seria detonado, fornecendo indicações do que seria encontrado na frente, assumindo características de diagrafia simplificada.

Uma vez que o sistema mede o tempo de perfuração e a distância perfurada de cada furo, alterações de velocidade de avanço não são medidas. Isso seria possível com a aquisição de sistema suplementar de “software” (MWD - Measure While Drilling”) que permite acompanhar as variações ao longo dos furos, permitindo uma tomografia de velocidades e portanto uma boa aproximação da variação da qualidade do maciço rochoso.

De qualquer forma, essa metodologia simplificada mostrou-se eficaz como ferramenta de suporte, em conjunto com a instrumentação e mapeamentos de frente, para a tomada de decisões.

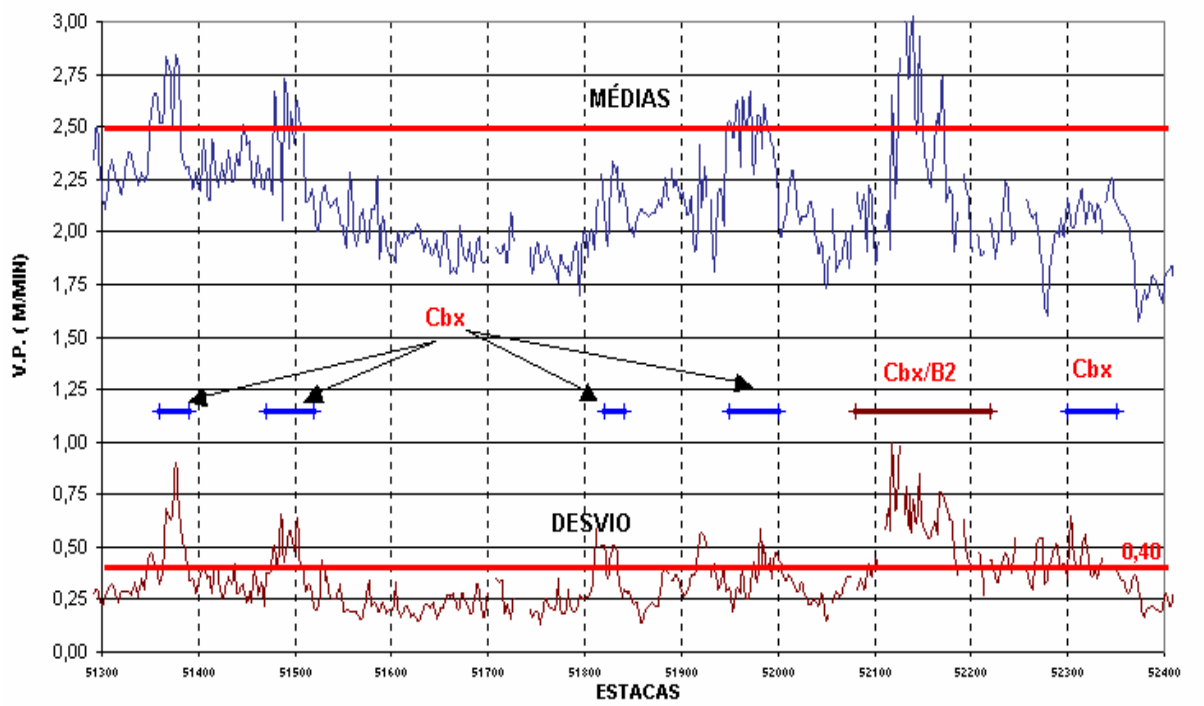

Figura 5. Acompanhamento das velocidades médias e desvio-padrão do Túnel TD-02.

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 o acompanhamento da qualidade de perfuração mostrou-se muito eficiente, reduzindo o “over-break” para níveis praticados nos países com tradição de uso desses equipamentos e o controle das velocidades médias, desvio-padrão e contorneamento das velocidades médias na face de escavação mostraram-se ferramentas importantes de apoio às rápidas decisões requeridas em ambiente adverso de mudanças repentinas e inesperadas.

AGRADECIMENTOS

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

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

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.