

ANÁLISE DA INSTRUMENTAÇÃO DURANTE A ESCAVAÇÃO DE TÚNEL DE BAIXA COBERTURA EM SOLO SOB UMA RODOVIA EM OPERAÇÃO

R. A. A. Melo

Unicamp, São Paulo, Brasil

P. J. R. Albuquerque

Unicamp, São Paulo, Brasil

J. R. Garcia

UFU, Minas Gerais, Brasil

RESUMO: O sucesso na execução do projeto de um túnel depende de um rigoroso planejamento durante a concepção do plano de instrumentação que tem como objetivo utilizar as informações obtidas na adequação dos métodos construtivos, acompanhando a movimentação do maciço e conseqüentemente ajustando os níveis de deslocamento para próximo do previsto no projeto. O principal objetivo para a realização do monitoramento do maciço é identificar os deslocamentos enquanto eles são controláveis e modificar os procedimentos de construção em tempo hábil, antes que os movimentos possam aumentar o suficiente para constituir um problema real, afetando desta forma, a evolução das escavações e a continuidade das atividades. Desta forma, este trabalho visa analisar a instrumentação de um túnel raso executado em solo sob uma rodovia em operação, demonstrando as medidas adotadas para mitigar e controlar as deformações do maciço.

1. INTRODUÇÃO

A instrumentação compreende um conjunto de aparelhos e sistemas para a observação e medição do comportamento do maciço durante a fase de escavação e, eventualmente, durante a vida do túnel. Assim, com o acompanhamento das leituras da instrumentação procura-se garantir previamente que os deslocamentos e distorções induzidas pela escavação possam provocar um eventual colapso, o que indicará quais as medidas corretivas a serem adotadas. Para o estudo em questão, tem-se um túnel de grandes dimensões (Figura 1), a ser escavado pelo método do NATM em solos de baixa capacidade de carga, em que a seção do túnel principal tem aproximadamente 190 m² e apresenta situação complexa relacionada à baixa cobertura (variável de 2,6 m a 5,3 m), sendo o estudo correspondente ao túnel de acesso ao Centro Administrativo de Minas Gerais.

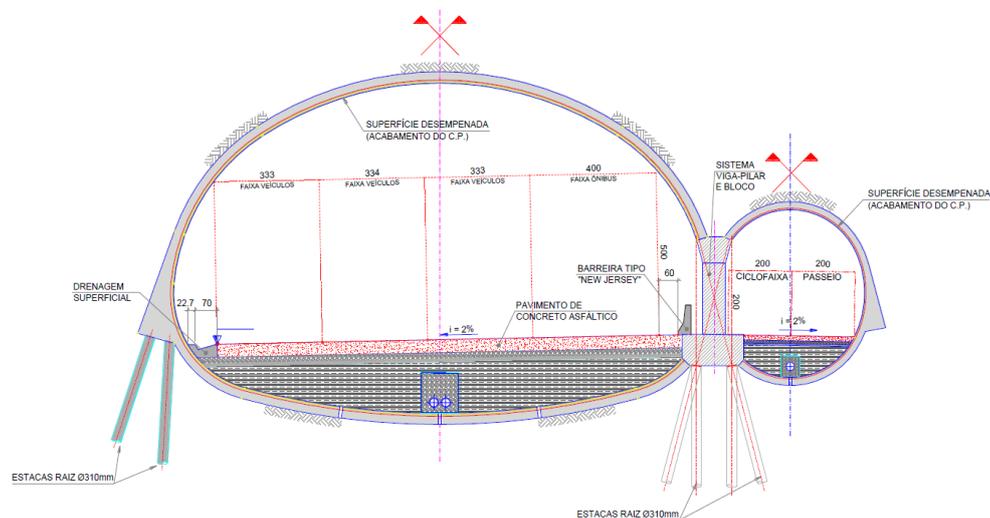


Figura 1: Seção transversal do túnel duplo (ENGESOLO, 2008)

2. ESTABILIDADE DO TÚNEL

O maciço que circunda o túnel, que inicialmente atua como elemento de carga, passa a se constituir como um componente de suporte e isto se deve à mobilização de suas tensões de resistência. Sendo este o princípio da estabilização pelo alívio das tensões por deformações controladas. A deformação excessiva do solo faz com que o maciço tenha uma redução de sua capacidade de auto suporte e passe a exercer um esforço sobre a estrutura (SOLOTRAT, 2003).

2.1 IMPLANTAÇÃO DA ESTACA RAIZ

Um aspecto relevante a ser considerado na construção deste túnel e na estabilidade do maciço/estrutura está relacionado com as fundações em estaca raiz \varnothing 310 mm (Figura 2) executadas dentro dos túneis pilotos. Estas estacas tiveram a função de minimizar os deslocamentos e proporcionar menores valores nas medidas internas de convergência na seção do maciço.

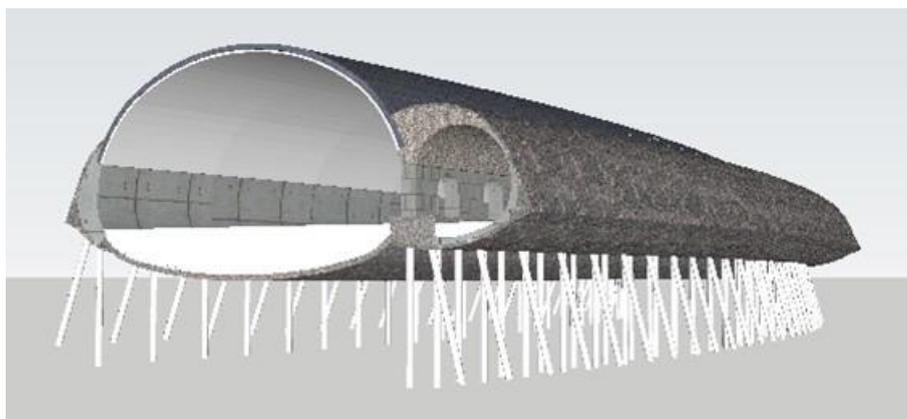


Figura 2: Figura em 3D com a implantação das fundações do túnel em estaca raiz (MELO,2013)

A utilização das estacas raiz como fundação do túnel deveu-se basicamente ao fato do solo escavado ser composto de aterros argilo-arenosos e siltes arenosos de baixa capacidade de suporte para as cargas envolvidas, possibilitando a desvinculação da escavação do invert à frente de escavação. Isso foi extremamente benéfico, dadas às dimensões do túnel e a necessidade de limitar os recalques superficiais, uma vez que existe uma rodovia importante em operação sobre o túnel.

2.2 ESTABILIDADE DE TETO - BAIXA COBERTURA

Em virtude da baixa cobertura do Túnel em questão (Figura 3), e da característica dos materiais envolvidos, o teto foi concebido para ser estável durante todo o ciclo de escavação, desta forma, foram estabelecidos avanços de 80 cm, até que os elementos de suporte apresentassem resistência satisfatória. Este fato não depende somente da eficiência adquirida pelo concreto projetado, mas também das condições da fundação do suporte. A estabilidade depende do “tempo de sustentação”, que é função das características reológicas do maciço e do vão livre.

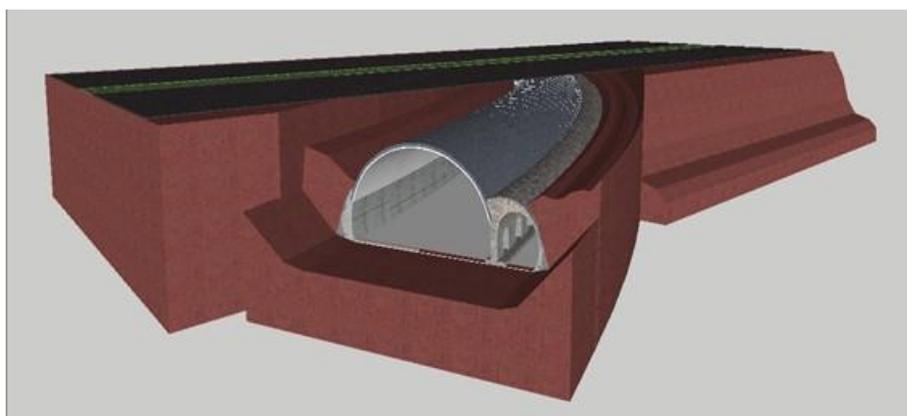


Figura 3: Ilustração em 3D com a implantação do túnel sob a rodovia demonstrando a baixa cobertura (MELO,2013)

2.3 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

As quantidades e a distribuição geométrica dos instrumentos empregados foram avaliadas considerando a geometria relativa do maciço e do túnel, as características e diversidades do maciço, a empregabilidade do método construtivo NATM e as estruturas existentes na área de influência das escavações.

Para instrumentos internos de superfície foram utilizados placa de recalque, marco superficial, pino de recalque além de piezômetros (Figura 4).

Por outro lado, o instrumento externo de profundidade utilizado foi tassômetro, que permitiu aferir as medições associadas aos possíveis recalques profundos, que foram instalados até 2m da geratriz superior do túnel.

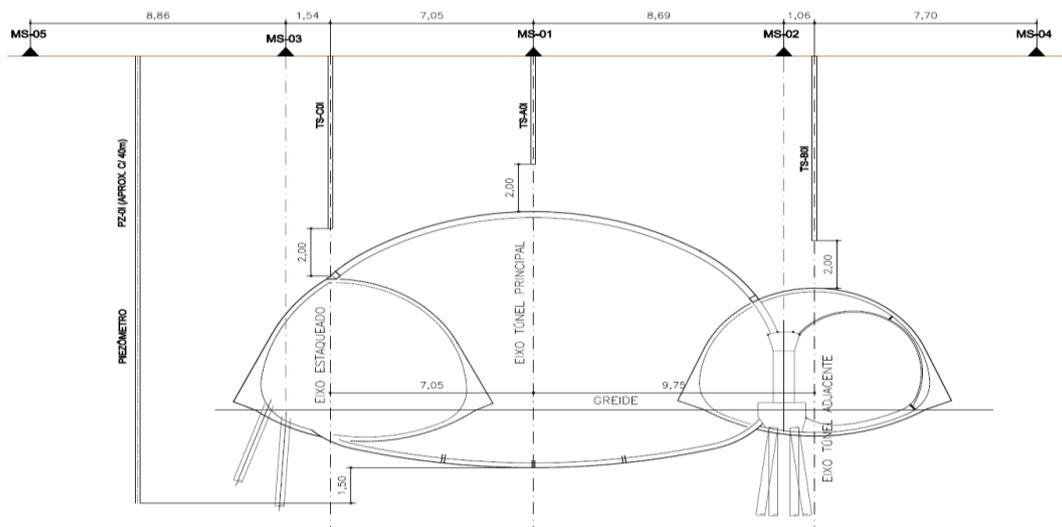


Figura 4: Seção esquemática de instrumentação completa (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

Durante o período de escavação dos túneis principal e pilotos, foi possível monitorar por meio dos pinos de nivelamento e convergência os deslocamentos verticais e horizontais provocados na seção interna do maciço, conforme disposição apresentada na Figura 5.

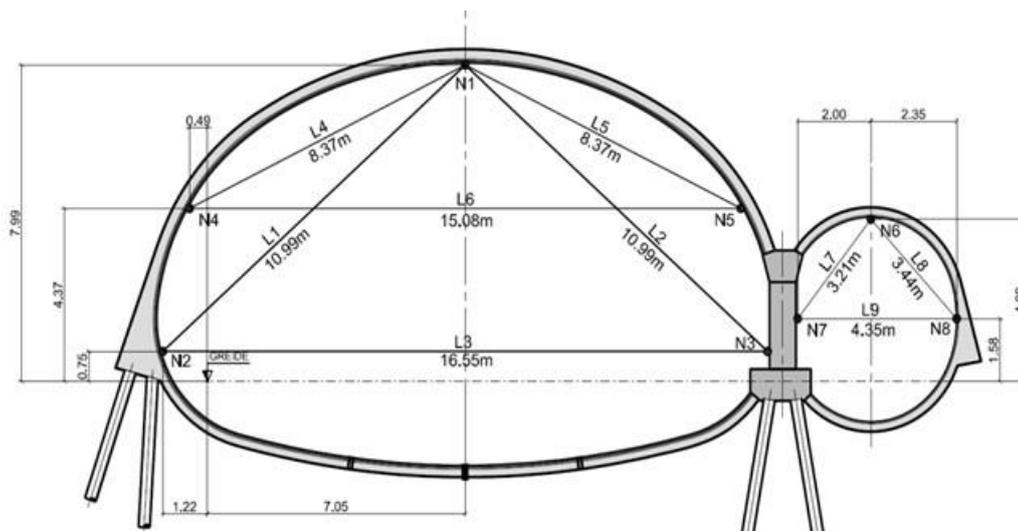


Figura 5: Seção instrumentação interna (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

3. ANÁLISE DAS LEITURAS OBTIDAS

Durante os primeiros metros de escavação, o controle de instrumentação acusou movimentos inesperados no maciço (Figuras 6 e 7), os recalques apresentados obrigaram a tomada de medidas corretivas, a fim de evitar deformidades no maciço e na rodovia.

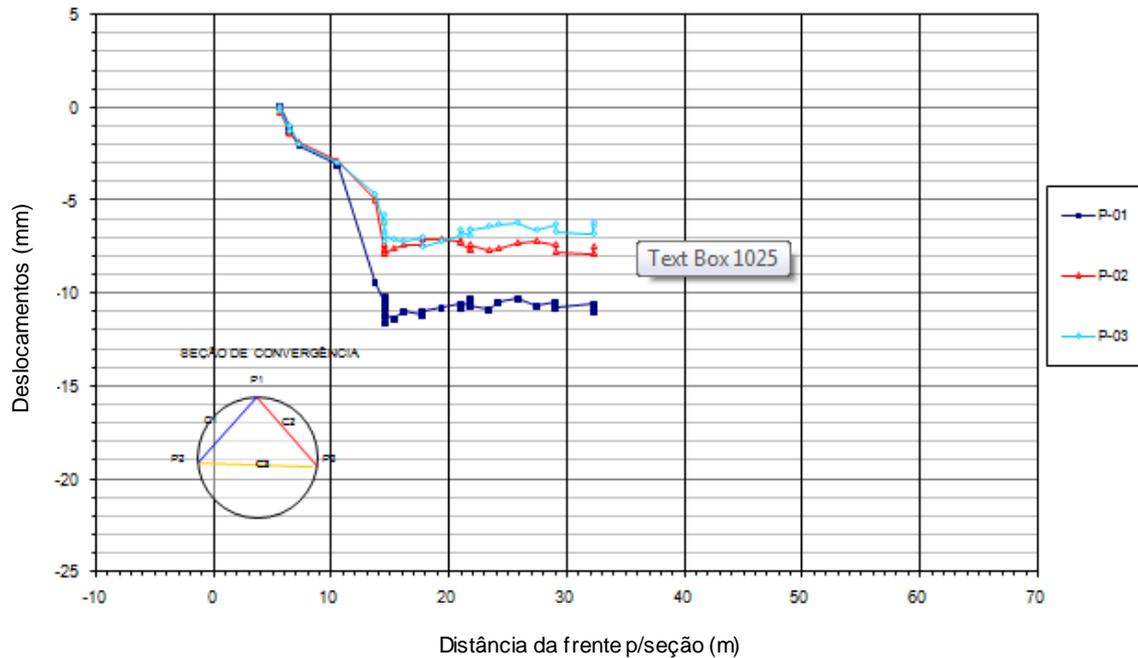


Figura 6: Leitura pinos de convergência Túnel Piloto P1 – arquivos (MENDES JÚNIOR,2009)

Observando a Figura 6, verifica-se que para a região de emboque do túnel piloto 1, ou seja, de 0 a 6 m, onde foi realizado o reforço do maciço por meio de enfilagens e concreto projetado, os recalques foram praticamente inexpressivos. Entretanto, a partir dos 6 m de distância do avanço da escavação do túnel, observaram-se deslocamentos da ordem 3 mm obtidos das leituras dos pinos de convergência. Este efeito, admitido como tolerável, permitiu a continuidade da escavação. Porém os recalques não cessaram e foram obtidos valores mais expressivos, atingindo um patamar crítico após os 10 m de avanço da frente de escavação, com deslocamentos superiores a 11 mm. Desta forma, fez-se necessário tomar algumas medidas para mitigar as deformações e garantir a segurança do avanço da frente de escavação.

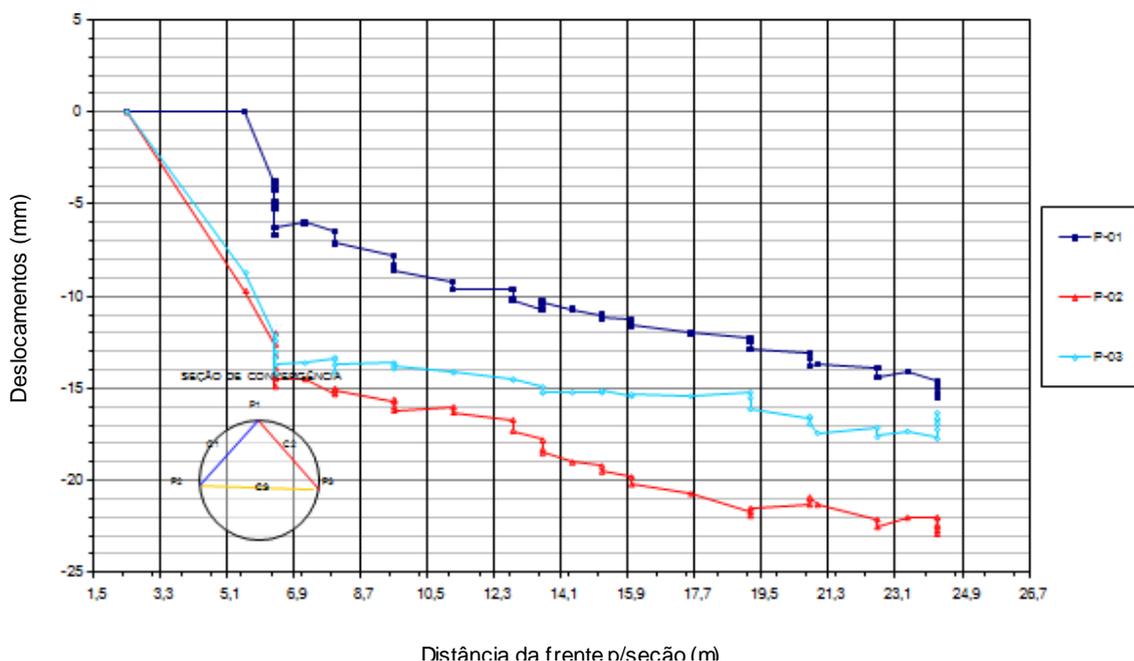


Figura 7: Leitura pinos de convergência Túnel Piloto P1 – arquivos (MENDES JÚNIOR,2009)

Analogamente ao fato verificado na Figura 6, pode-se observar na Figura 7, que os deslocamentos se apresentam imperceptíveis nos primeiros metros de escavação da frente do túnel, aumentando significativamente logo após o trecho inicial reforçado por enfilagens. Tal situação pode ser atribuída às características físico-mecânicas do solo, ou seja, por se tratar de um maciço composto nos seus primeiros metros do perfil estratigráfico de um solo predominantemente argiloso, com elevado índice de vazios e sem presença do nível d'água.

Após a finalização da execução da mesoestrutura do túnel principal, foi concluída a escavação da abóbada. Durante o rebaixamento e demolição dos túneis piloto, a instrumentação alertou para um comportamento inesperado no maciço passivo do túnel principal (Figura 8), sugerindo deslocamentos de divergência para esquerda.

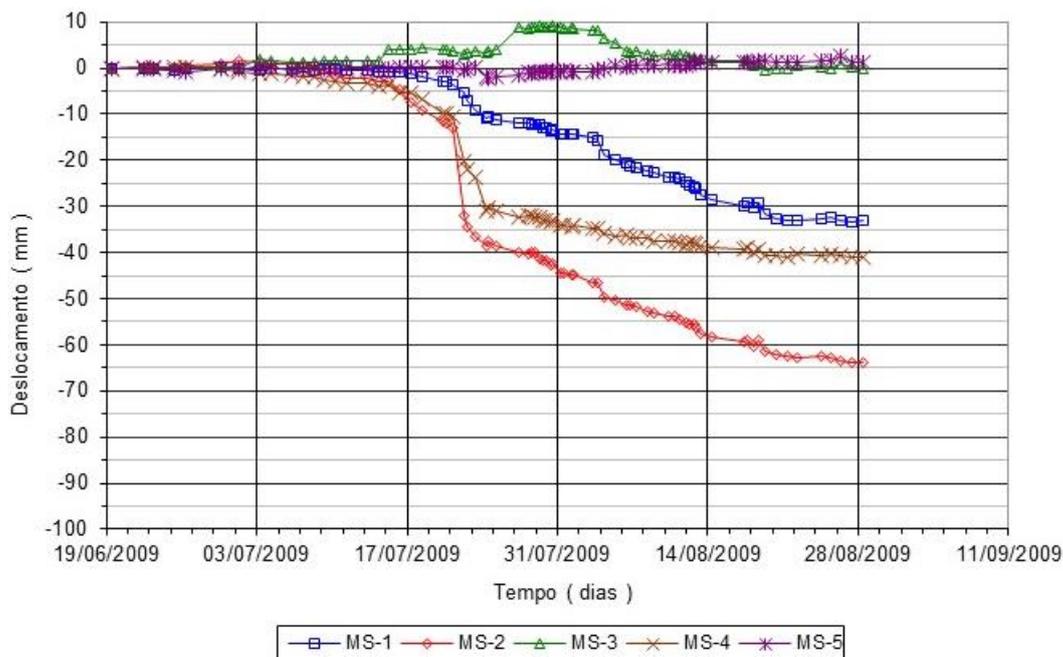


Figura 8: Leitura marcos de recalque Túnel Principal – arquivos (MENDES JÚNIOR,2009)

De acordo com a Figura 8, verifica-se que os deslocamentos nos pontos de monitoramento, MS-3 e MS-5, mostram-se totalmente estabilizados até a etapa final de execução dos túneis, pilotos e principal. Entretanto, o ponto de monitoramento MS-4, apresenta-se também significativamente estabilizado, mas com deslocamento total acumulado da ordem de 40 mm. Porém para o caso dos pontos de monitoração MS-1 e MS-2, referente aos marcos de recalque da parte superior do túnel e do pilar de sustentação principal, respectivamente, pôde-se verificar que ocorreram valores expressivos de deslocamentos, sendo que estes foram da ordem de 35 mm para o MS-1 e 65 mm para o MS-2. Neste caso, esses pontos de monitoramento, apresentam uma estabilização aparentemente contínua, o que pode representar um possível processo de acomodação e adensamento do solo.

3.1 PRINCIPAIS AÇÕES DE DECISÃO DO TÚNEL PILOTO P1

Em virtude da análise e interpretação dos gráficos das Figuras 6 e 7, fez-se necessário à adoção de algumas medidas corretivas que alteraram a metodologia de avanço, diminuindo o ritmo da escavação e aumentando o tempo de espera para cura do concreto projetado, que deveria atingir resistência mínima de 10 MPa. Porém, a cada passo de avanço entre escavação de frente e do *invert*, foi necessário incrementar a malha de pregagem da frente (Figura 9) e aumentar o volume de concreto nas sapatas das cambotas (Figura 10). Estas medidas mitigadoras foram revistas com a redução dos deslocamentos observados nas leituras dos pinos de convergência, conforme pode ser verificado nas Figuras 6 e 7. Por outro lado, o avanço de escavação do túnel pôde ser otimizado, possibilitando que o ciclo de execução acelerasse (Figura 11). No entanto, mantiveram os requisitos de desempenho elevados, quanto à resistência do concreto projetado, antes de cada avanço.

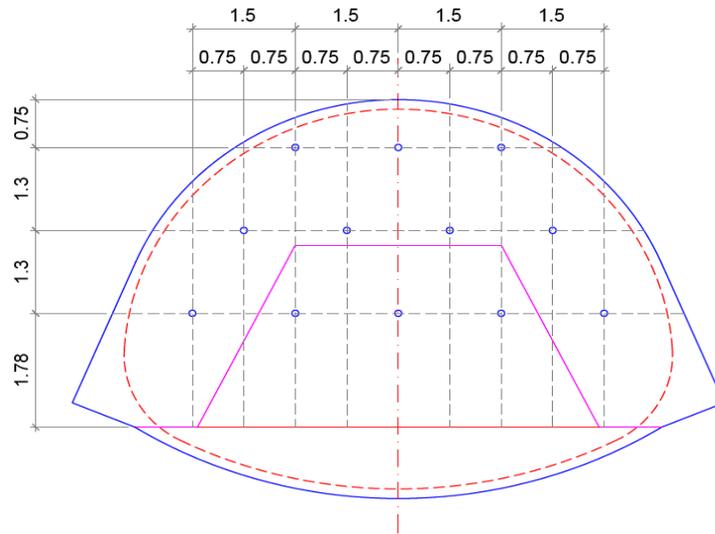


Figura 9: Introdução da pregagem de frente junto a frente de escavação (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

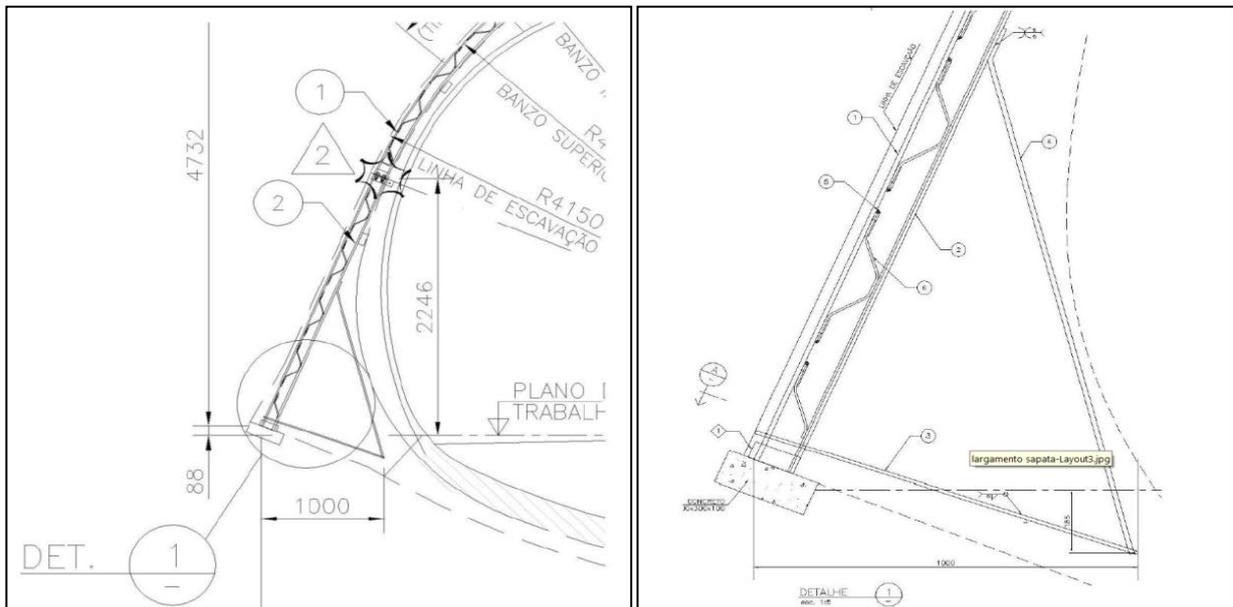


Figura 10: Detalhes do reforço da sapata das cambotas (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

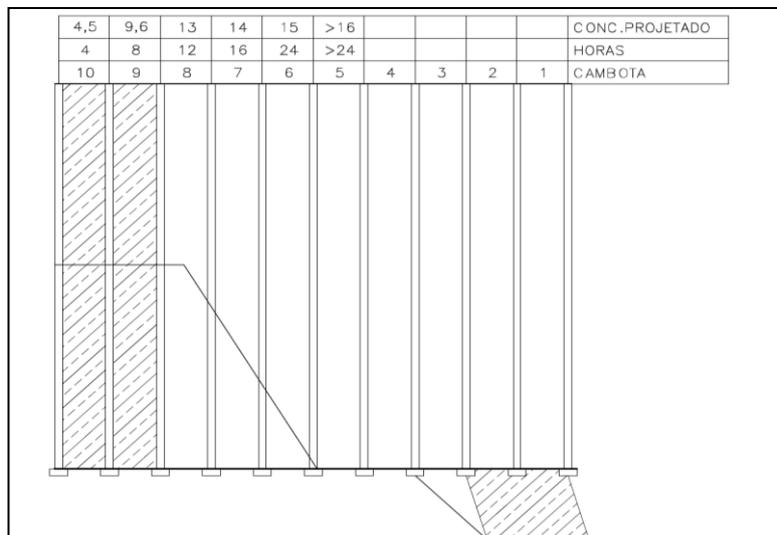


Figura 11 - Alteração da sequência e tempo do cliço em função da resistência do concreto projetado (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

De acordo com os fenômenos evidenciados pelos dados de instrumentação nas Figuras 6 e 7 no tocante aos deslocamentos superficiais e internos os valores de convergência/divergência, foi constatado que o material da base do aterro da rodovia, nas proximidades do Emboque Norte do Túnel, possuía características geotécnicas aquém daquelas empregadas nas análises de dimensionamento.

Desta forma, verificou-se o comportamento do maciço com relação aos deslocamentos observados, que foi altamente influenciado, não apenas pelo tipo de solo local, mas também pelo aparecimento das fissuras observadas de maneira quase simétrica no arco invertido definitivo (AID) do túnel piloto P1.

Assim sendo, constatou-se elevados valores de divergência das cotas C3 em diversas seções de instrumentação, conforme os gráficos das Figuras 6 e 7.

A consequência imediata disto é a “desativação” do arco invertido definitivo (AID) como elemento de fundação do túnel piloto P1, no momento da formação das fissuras, sobrecarregando o solo sob as sapatas com tensões elevadas que induzem a deformações lentas e constantes.

Foi instalado no AID do túnel piloto P1 (Figura 11), o reforço com tela no trecho já executado e adotou-se o uso da mesma metodologia no restante da execução do AID do túnel. Foram executados reforços laterais por meio de enfilagens e da injeção da calda de cimento (Figura 12), além da manutenção das frequências de instalação das seções de instrumentação interna, com um aumento para quatro leituras diárias em cada seção.

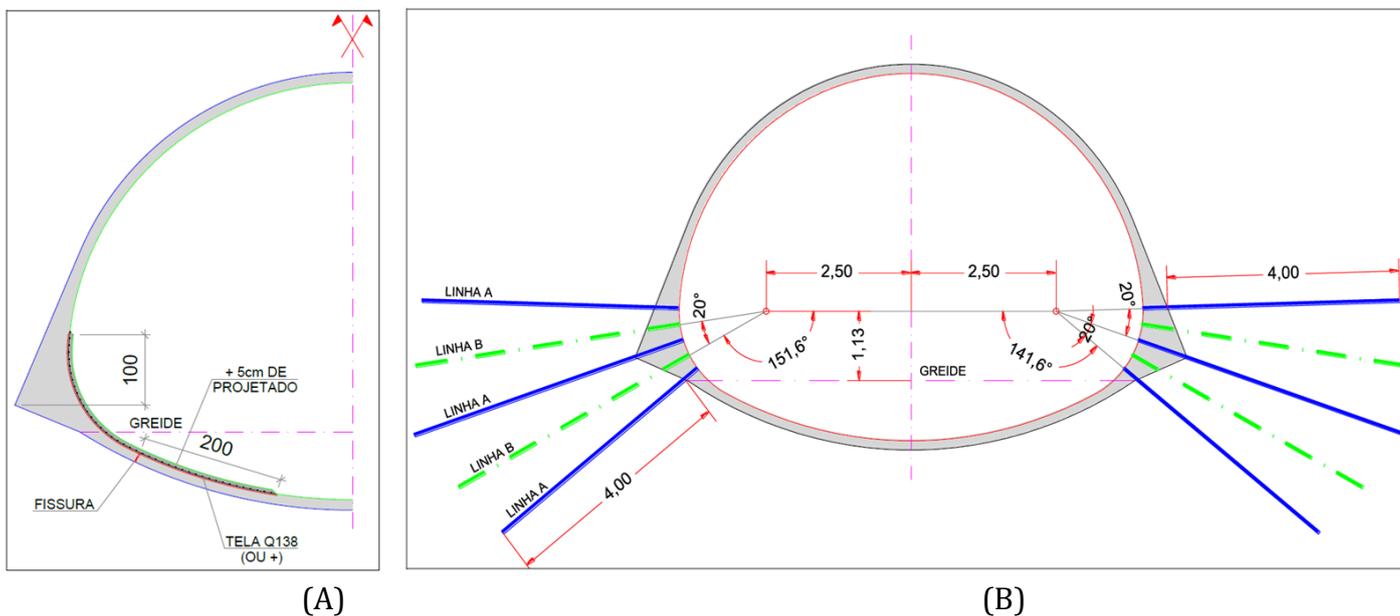


Figura 11: (A) - Detalhe do reforço com tela no arco invertido e (B) Detalhe do reforço lateral execução de enfilagens e injeção de calda de cimento (MAFFEI ENGENHARIA, 2009).

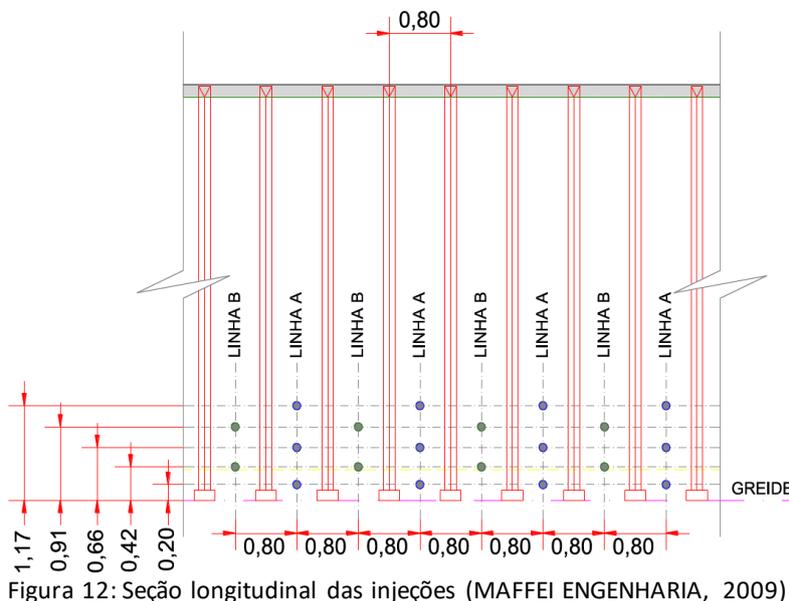


Figura 12: Seção longitudinal das injeções (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

As ações tomadas para essa situação tinham dois propósitos, a saber:

- 1 - Melhoria do solo no passivo do túnel piloto P1, através do tratamento da injeção da calda de cimento e;
- 2 - Reforço/Reparo do AID, para que fosse capaz de resistir às trações impostas pela casca da calota, limitando a sua divergência e tornando-o apto a funcionar para os fins propostos.

Os fatos descritos acima, aliado às medidas adotadas para reforçar a casca e o maciço, puderam ser evidenciados pelas leituras de instrumentação realizadas nos dias anteriores, cujos valores indicavam clara tendência de estabilização.

3.2 PRINCIPAIS AÇÕES DE DECISÃO TÚNEL PRINCIPAL

Visando mitigar os fenômenos observados nas leituras dos marcos de recalque (Figura 8), medidas corretivas foram adotadas empregando reforços com enfilagens tubulares e injeção de calda de cimento (Figura 13), a fim de aumentar a rigidez do solo e diminuindo, portanto, as deformações observadas.

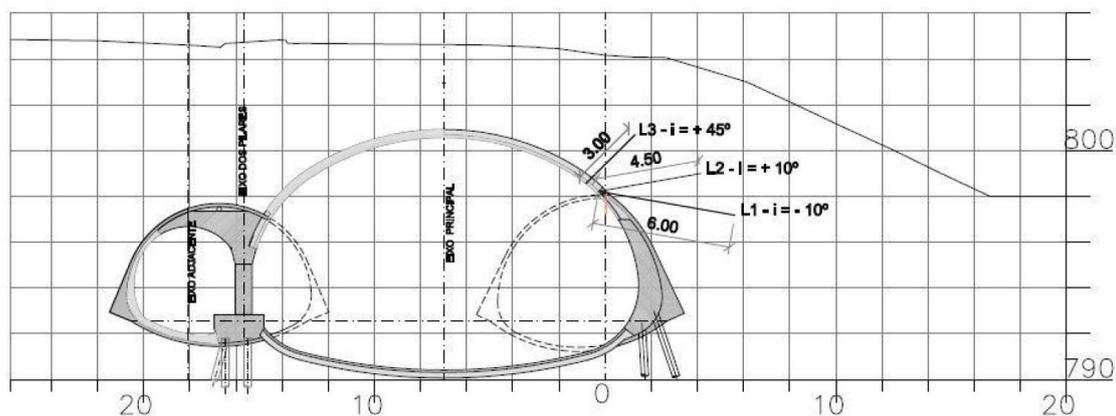


Figura 13: Reforço com injeções tubulares com tubo SCH-40 Ø 2.5" (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

Adicionalmente, foi proposto ainda o reforço transversal da casca do túnel principal com aço CA-50 Ø 12,5 mm a cada 15 cm na (na longitudinal) na lateral direita do túnel (sentido do estaqueamento) nas mesmas cambotas conforme mostra a Figura 14.

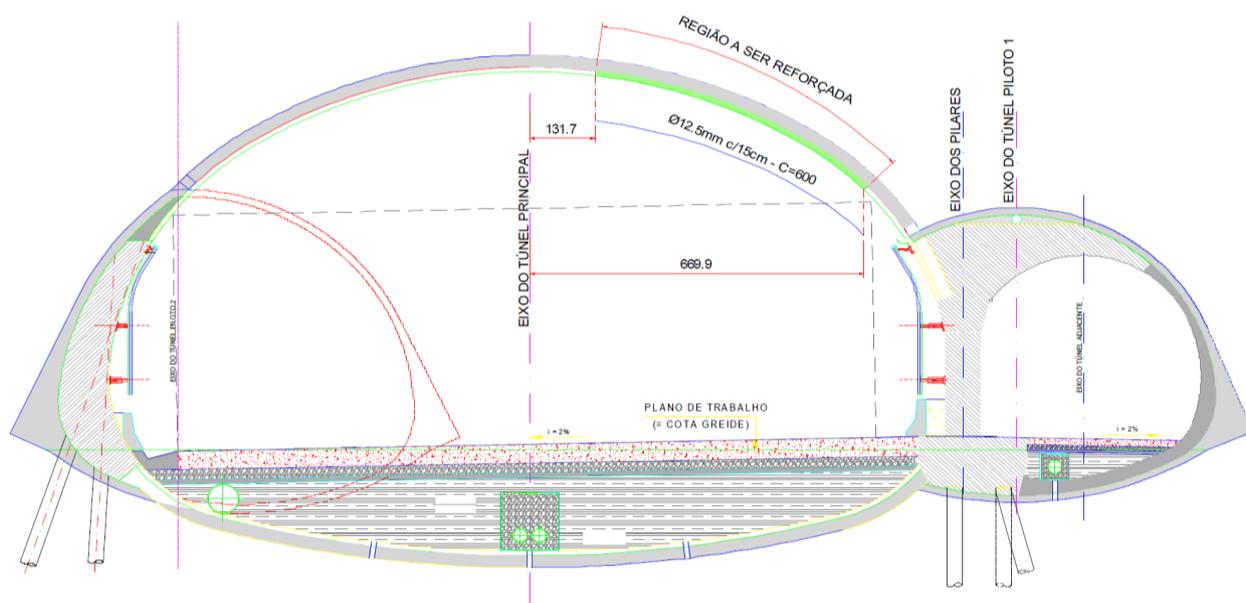


Figura 14: Detalhe da região a ser reforçada (MAFFEI ENGENHARIA, 2009)

4. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas é possível concluir que:

- O método NATM para a construção de túneis de baixa cobertura se destaca como peça fundamental, uma vez que a versatilidade do método permite adaptar o projeto às situações observadas no decorrer da obra;
- Por se tratar de um túnel de baixa cobertura, a parcialização das escavações (concepção dos túneis pilotos 1 e 2) foi de extrema importância para o sucesso do projeto, contribuindo de forma a mitigar os deslocamentos na frente de escavação e, conseqüentemente, a ruptura do maciço;
- A concepção do projeto no que diz respeito à execução das estacas raiz, foi extremamente acertada do ponto de vista geotécnico, pois o solo no qual o túnel foi escavado era de baixa capacidade de carga. Entretanto, sob ótica estrutural a estaca raiz possibilitou a desvinculação da execução do *invert* à frente da escavação, limitando assim os recalques superficiais, uma vez que existia uma rodovia importante em operação sobre o túnel;
- A retro-análise dos dados instrumentados torna-se fator primordial para tomada das decisões e avaliação das etapas seguintes.

REFERÊNCIAS

- [1] ENGESOLO ENGENHARIA (2008). Elaboração de Projeto de Engenharia Rodoviária para Implantação, Pavimentação e Obra de Arte Especial na Interseção da MG-010 (Linha Verde) com o Acesso ao Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais – Volume 1 – Relatório do Projeto e Documento para Concorrência, Belo Horizonte, MG, 171 p.
- [2] MAFFEI ENGENHARIA (2009). Alteração de Projeto de Campo (APC 1-16) - DER-MG - Rodovia MG-010 - Interseção com o Acesso ao Centro Administrativo de Minas, 22 p.
- [3] MELO, R.A.A. Aspectos Construtivos de Túneis Urbanos de Baixa Cobertura em Solo – Estudo de Caso do Túnel de Acesso ao Centro Administrativo de Minas Gerais. Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2013. 182p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2013.
- [4] MENDES JÚNIOR TRADING E ENGENHARIA (2010). Registro de Construção do Túnel de Acesso a Cidade Administrativa de Minas Gerais – Registro 602 – 001/10, Belo Horizonte, MG, 48 p.
- [5] SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA (2003). Livro de Manuais Técnicos. São Paulo.

MSc, Rodrigo Melo: Author1

Instituição: Unicamp

E-mail address: rodrigo.melo@mendesjunior.com.br

DSc, Paulo Albuquerque: Author2

Instituição: Unicamp

E-mail address: pjra@fec.unicamp.br

DSc, Jean Garcia: Author3

Instituição: UFU

E-mail address: eng.garcia@gmail.com