

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/721

TÚNEL REI PELÉ – TAGUATINGA/DF: PROJETO, DESAFIOS CONSTRUTIVOS, INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

Paulo Ivo Braga de Queiroz

Eng. Civil, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, pi.queiroz@reconverte.com.br

Ana Cristina Akinaga Hatori

Eng. Civil, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, ana.hatori@reconverte.com.br

José Antonio Gonçalves

Eng. Geólogo, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, jag@reconverte.com.br

Lucas Deroide do Nascimento

Eng. Civil, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, lucas.nascimento@reconverte.com.br

Rodrigo Magalhães de Pinho

Eng. Civil, Trier Engenharia, Distrito Federal, Brasil, rm@trier.eng.br

RESUMO: No Distrito Federal, as condições viárias e o tráfego intenso na região central de Taguatinga levaram ao projeto de uma ligação expressa entre as vias EPTG e EPTN através de uma estrutura subterrânea, paralela à via do Metrô-DF, nas imediações da Praça do Relógio. São apresentados o projeto, as condições geotécnicas e particularidades da obra do Túnel Rei Pelé, que foi executada pelo método de escavação invertida, para a implantação de uma passagem rodoviária subterrânea. Esta passagem foi construída em condições geológico-geotécnicas específicas, com pouca disponibilidade de área para a sua implantação. O projeto consistiu na construção de duas vias paralelas com aproximadamente 1000 m, com três faixas de tráfego cada e uma via dupla, com uma parede central separando estas faixas. A escavação se deu em vala a céu aberto até pouco abaixo da laje de cobertura e, a partir daí, pelo método de túnel invertido, com escavação sob a laje superior já concretada e parcialmente reaterada, escorada lateralmente pelas paredes-diafragma. Em alguns trechos, a parede do túnel ficou a menos de 1 m de uma das paredes-diafragma do túnel do metrô. Devido a esta proximidade e à dificuldade de se fazerem leituras da instrumentação durante a operação do metrô, foi utilizado um plano de monitoramento com sensores óticos automatizados, capazes de fazer leituras triortogonais e angulares, conectados a um *data logger*, com monitoramento em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE: Túnel invertido; instrumentação automatizada; monitoramento em tempo real.

ABSTRACT: A process of conurbation always leads to a higher demand on transport services, which need to respond by increasing their efficiency. In the Federal District, the road conditions and heavy traffic in the central region of Taguatinga led to the design of an express link between the EPTG and EPTN routes via an underground structure, parallel to the Metro-DF route, in the vicinity of the Square ‘Praça do Relógio’. The geotechnical conditions, design and construction of the Rei Pelé Tunnel, which was built using the top-down construction method to create an underground roadway, are presented. This passageway was built in specific geological-geotechnical conditions, with little area available for its implementation. The project consisted of building two parallel roads of approximately 1000 m, with three traffic lanes each and a dual carriageway, with a central wall separating these lanes. Excavation took place in an open trench up to just below the roof slab, and from then on using the inverted tunnel method, with excavation under the already concreted and partially backfilled top slab, supported laterally by diaphragm walls. In some sections, the tunnel wall was less than a meter from a diaphragm wall in the metro tunnel. Due to this proximity and the difficulty of taking instrumentation readings during metro operations, a monitoring plan was used with automated optical sensors, capable of taking tri-orthogonal and angular readings, connected to a data logger, with real-time monitoring.

KEYWORDS: Inverted Tunnel; Automated Instrumentation; Real-Time Monitoring.

1 INTRODUÇÃO

O túnel Rei Pelé, localizado entre as vias EPTG e EPTN, sob a Avenida Central de Taguatinga e junto à linha de metrô existente no Distrito Federal, foi implantado em dois eixos, sendo o primeiro no sentido Plano Piloto – Ceilândia (E-W) e o segundo no sentido Ceilândia – Plano Piloto (W-E). O projeto, construído pelo método de escavação invertida, foi implantado em três fases de obra, sendo a primeira implantada entre a alça de acesso da Avenida Central e a Avenida Comercial (Figura 1). A segunda e terceira fases de obra foram implantadas entre o acesso no sentido Ceilândia e a Avenida Comercial (Figura 2).

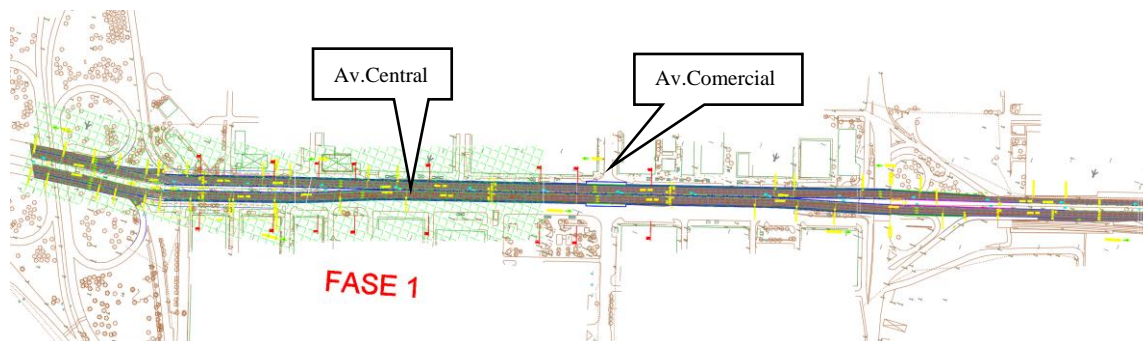


Figura 1 - 1ª fase de obra.

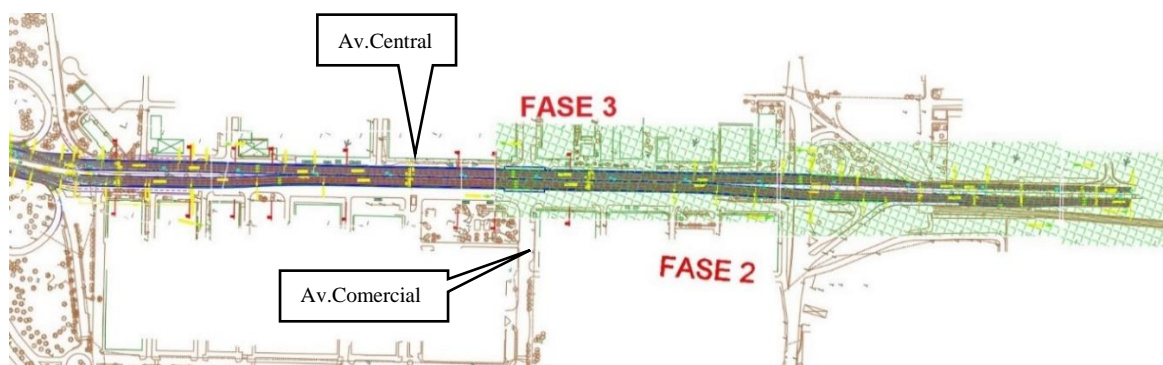


Figura 2 - 2ª e 3ª fases de obra.

Por tratar-se de área urbana densamente ocupada, foi necessário apresentar estimativas dos recalques, das distorções angulares e de eventuais danos consequentes às estruturas vizinhas, associados à execução das unidades construtivas que compõem o túnel de interligação viária. Para garantir a segurança dos usuários e equipamentos de transporte metroviário, dos transeuntes e das estruturas do entorno, o monitoramento interno dos túneis foi realizado de forma automatizada e remota, proporcionando a manutenção ininterrupta do fluxo metroviário.

2 CRITÉRIOS DE PROJETO

2.1 Critérios gerais

O projeto executivo do Túnel Rei Pelé contou com modelos numéricos das etapas construtivas, que foram realizados em estado plano de deformações. Nestes modelos, lançou-se mão de modelo constitutivo elástico linear-perfeitamente plástico com envoltória de *Mohr-Coulomb* e dilatância para representar o comportamento tensão-deformação dos solos mais competentes e do *Cam-Clay Modificado* (Wood, 1990) para descrever o comportamento dos solos moles. Os elementos estruturais foram modelados por vigas de Timoshenko elásticas, no entendimento de que este tipo de modelo fornece resultados ligeiramente conservadores em termos de esforços solicitantes.

As verificações de estabilidade dos taludes da obra foram feitas pelos métodos de Bishop Simplificado e Spencer. A estabilidade das escavações dos túneis foi verificada empregando-se métodos baseados no Teorema do Limite Inferior detalhados por Sozio (2004).

2.2 Critérios para análises de estabilidade

2.2.1 1ª Fase

Para a verificação das condições de estabilidade mecânica das valas e taludes que contornam o túnel, sendo considerada uma condição satisfatória de estabilidade quando $FS \geq 1,5$.

O fator de segurança é calculado considerando o equilíbrio entre as forças que tendem a desestabilizar o maciço (como o peso próprio do solo, sobrecargas e pressão hidráulica) e as forças resultantes da resistência do maciço. Conforme as especificações da Norma técnica complementar do Metrô de São Paulo NC-03, foram também examinadas as condições de estabilidade do fundo da vala. Isso se deve ao fato de que o solo abaixo do fundo da escavação pode não oferecer resistência suficiente para suportar o peso do solo ao lado da vala, o que poderia resultar em um levantamento do fundo da escavação, caracterizando uma ruptura. A rotina de cálculo delineada na NC-03 é aplicável apenas a solos coesivos e moles em condições não drenadas, levando em consideração a profundidade (H), a largura (B) e o comprimento (L) da vala.

2.2.2 2ª e 3ª Fase

Para a estabilidade das fichas e do fundo da vala foi avaliado os modelos de elementos finitos desenvolvidos para os módulos de obra do Túnel Rei Pelé. Além dos modelos numéricos, foi realizada uma verificação complementar, analítica, que considera o diagrama de tensões em toda a altura da parede no trecho escavado, correspondente ao empuxo ativo. Isto porque, pode-se admitir que haverá, em qualquer caso, deslocamentos suficientes para mobilizá-lo. Considera-se um movimento de rotação em torno de um ponto de travamento.

Por se tratar de uma escavação invertida, foram verificadas condições de estabilidade através dos diagramas de empuxos passivos e ativos, com base no caso crítico de profundidade de escavação. A análise de estabilidade de fundo de vala foi realizada com base no Teorema do Limite Inferior, que garante que cargas que satisfaçam às equações de equilíbrio com tensões hipotéticas no maciço, às condições de contorno e aos critérios de ruptura serão inferiores à carga de ruptura real.

3 ESTRUTURAS DA OBRA

3.1 Geometria das Estruturas

A estrutura da 1ª Fase é composta por trechos com paredes em balanço, com escavação e travamento por pergolado (Figura 3), lajes maciças ou nervuradas (Figura 4). A 2ª e 3ª Fase apresentam estrutura com travamento superior por laje maciça ou laje nervurada.

A sequência construtiva se inicia através da execução de uma escavação com estabilização por grampos e concreto projetado, até a cota de execução das paredes diafragmas. Na sequência, executa-se a laje de cobertura do túnel, com posterior reaterro e reconformação superficial. Por fim, inicia-se a escavação da vala pelo método invertido. Com isto, o tráfego na superfície é liberado durante as escavações.

O projeto previu a instalação da instrumentação no início das obras e logo após a execução da laje de cobertura, com o intuito de monitorar os deslocamentos no maciço, durante a escavação inicial, e imediatamente após a recomposição dos pavimentos na superfície (anteriormente ao início das escavações das valas).

3.2 Fases de Projeto × Modelo Construtivo

A 1ª Fase do projeto foi subdividida em quatro modelos diferentes, com o objetivo de representar a realidade das diferentes características geométricas e geotécnicas desta fase. Os modelos representam a região do emboque em balanço, a região com pergolado (ambas mostradas na Figura 3), a extensão dos túneis cobertos e singelos, e por fim, os túneis contíguos e com laje nervurada (vide Figura 4).

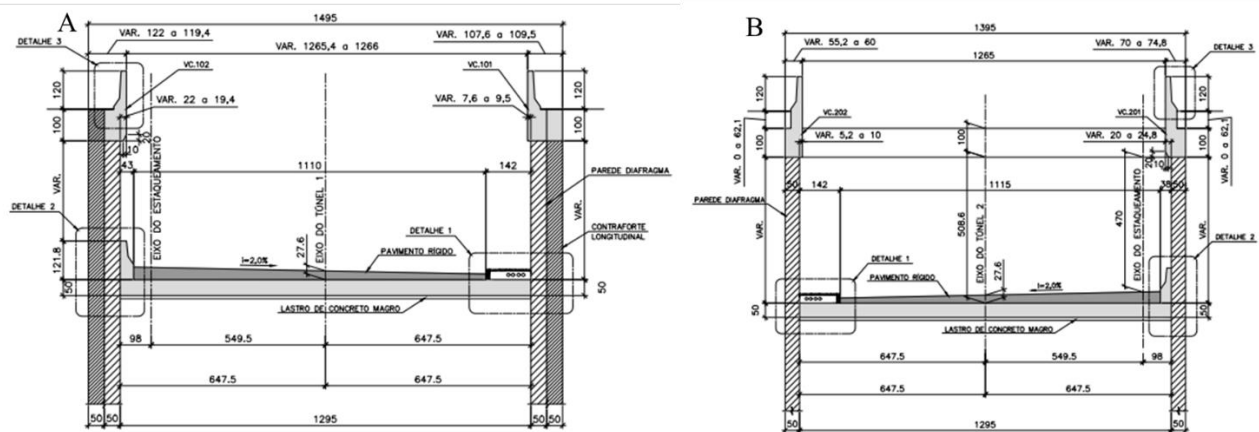


Figura 3 - (A) Seção de parede em balanço; (B) Seção de escavação e travamento com pergolado.

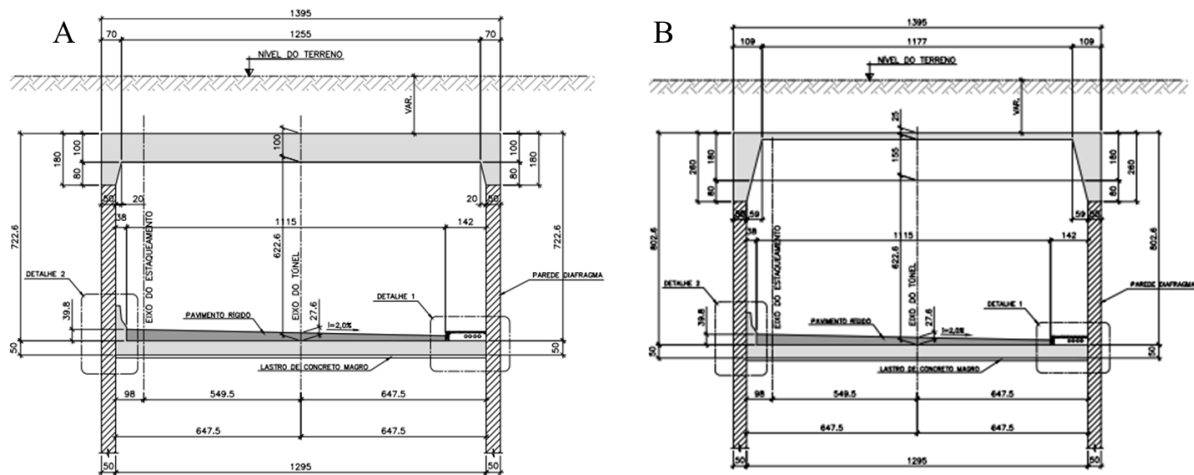


Figura 4 - (A) Seção com laje maciça; (B) Seção com laje nervurada.

A 2ª Fase do projeto foi subdividida em três modelos distintos, representando a região dos túneis singelos com lajes maciças, túneis singelos com lajes nervuradas e túneis contíguos com lajes nervuradas.

A 3ª Fase do projeto foi subdividida em dois modelos com métodos construtivos diferentes. Os modelos apresentam a escavação do túnel sendo realizada em duas etapas da obra. O primeiro modelo apresenta a construção do túnel sendo realizada em escavação invertida (região do alargamento). A construção é iniciada pela execução das diafragmas e laje superior das salas técnicas. Posteriormente, ocorre a implantação do reaterro e recuperação da região superficial da 3ª Fase, sendo a escavação do túnel executada em seguida. A segunda modelagem representa a região da subestação, composta pela escavação e execução das diafragmas até a cota do piso das salas técnicas, a construção do piso, paredes e laje de superfície, a implantação do reaterro e a recuperação da região superficial da 3ª Fase, sendo executados anteriormente à escavação do túnel.

3.2.1 Região em Balanço

A região em balanço apresenta diafragmas de 50 cm de espessura, com um complemento em contraforte longitudinal de 50 cm, para limitar as deformações excessivas na região crítica próxima ao Metrô existente. A armadura longitudinal dimensionada consiste em barras de 25 mm espaçadas de 25 cm para a face tracionada e para a face comprimida; a armadura de cisalhamento corresponde a barras de 12,5 mm espaçadas de 30 cm.

3.2.2 Região em Pergolado

O pergolado é composto por diafragmas de 50 cm de espessura. A armadura longitudinal dimensionada consiste em barras com bitola de 25 mm, espaçadas de 20 cm para ambas as faces, enquanto a armadura de cisalhamento adotada constitui-se de barras de 12,5 mm espaçadas de 30 cm.

3.2.3 Túneis Singelos

Os túneis singelos foram dimensionados para os esforços correspondentes a cota de arrasamento da parede diafragma na região em conexão com a mísula, sendo adotada armadura para a parede-diafragma correspondente a duas camadas de barras de 25 mm espaçadas de 25 cm para ambas as faces. A primeira camada contém armadura integral; já a segunda terá armadura com 6,0 m de comprimento, para reforçar a região do nó entre a estrutura e a laje de superfície. Para a armadura de cisalhamento foram adotadas barras de 12,5 mm espaçadas de 30 cm.

A região em laje maciça e túneis singelos apresenta diafragmas de 50 cm de espessura e lajes com 1,0 m de altura. A cobertura de solo crítica, acima da laje, é de 2,40 m. A armadura longitudinal dimensionada consiste em duas camadas de barras de 25 mm, espaçadas de 25 cm, para a face tracionada e para a face comprimida. A armadura de cisalhamento corresponde a barras de 12,5 mm espaçadas de 30 cm.

Os túneis singelos e a laje nervurada foram dimensionados para os esforços correspondentes à cota de arrasamento da parede diafragma, na região em conexão com a mísula, sendo adotada armadura para a parede-diafragma correspondente a duas camadas de barras de 25 mm, espaçadas de 20 cm, para ambas as faces. A primeira camada deverá conter armadura integral; já a segunda camada deverá conter armadura para reforçar a região do nó entre a estrutura e a laje de superfície. A armadura de cisalhamento adotada se constitui em barras de 12,5 mm, espaçadas de 30 cm.

3.2.4 Túneis Contíguos

A região composta por túneis contíguos e laje nervurada apresenta como dimensionamento da armadura longitudinal duas camadas de barras de 25 mm, espaçadas de 20 cm para ambas as faces. A primeira camada deverá conter armadura integral; já a segunda terá 6,0 m de comprimento, para reforçar a região do nó entre a estrutura e a laje de superfície, a armadura de cisalhamento adotada com barras de 12,5 mm, espaçadas de 30 cm. Sendo verificada a capacidade de carga das lamelas intermediárias na região da janela de abertura entre os túneis.

3.3 Instrumentação

Considerando o aspecto da segurança, a complexidade de uma obra de escavação em vala, principalmente por suas dimensões e pelo fato de se encontrar em região urbana densamente ocupada, entende-se que é fundamental acompanhar o desempenho das escavações através de instrumentação geomecânica.

Inclui-se para tanto o monitoramento da estabilidade interna das escavações, medidas de deslocamento dos maciços, controle de recalques nos imóveis e estruturas adjacentes, acompanhamento de deslocamentos das estruturas da Estação Praça do Relógio e túneis de via do Metrô-DF e acompanhamento dos níveis freáticos na área de influência da obra.

Os instrumentos foram instalados de maneira a fornecer medições precisas, permitindo assim que avaliações de segurança, desempenho e andamento do método construtivo sejam realizados em conformidade com o modelo e as simulações desenvolvidas na concepção do projeto. As leituras e a entrega de dados foram realizadas de forma diária e mensal, com medidas e gráficos do comportamento do maciço em termos de deslocamento.

3.3.1 Pinos Refletivos – Medidas de Convergência

O pino ou marco refletivo (MR) possibilita vários tipos de leituras, tais como convergência em paredes de poços, valas e estruturas enterradas, deslocamentos horizontais incluindo abertura de juntas, desaprumos e recalques.

O MR consiste em um elemento reflexivo fixado numa chapa metálica, de dimensões 50 mm × 50 mm, ligada a uma haste metálica, que permite sua fixação nas paredes de escavação, estruturas enterradas, elementos estruturais, com resina epóxi ou massa plástica. Os pontos são instalados a partir de determinação do projeto, através de perfuração e fixação que garanta a estabilidade do equipamento (vide Figura 5).

As leituras são executadas com estação total e as medidas de convergência são resultantes do acompanhamento da variação da distância entre dois marcos refletivos.

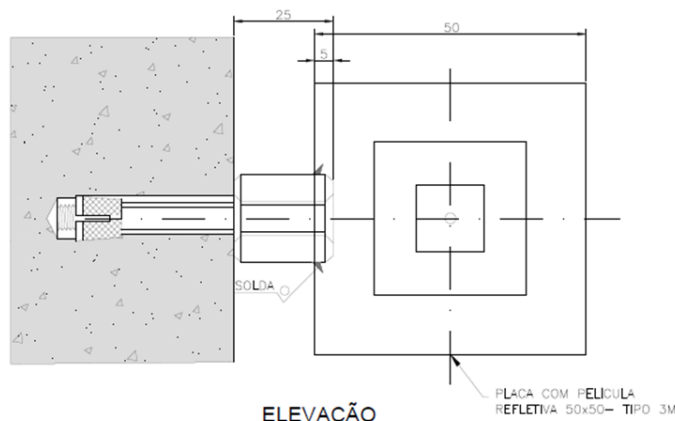


Figura 5 - Croqui esquemático do Pino Refletivo.

3.3.2 Monitoramento Automatizado do Túnel do Metrô

Para o monitoramento interno dos túneis de via, em tempo real, a solução aplicada consistiu no uso de sistema automatizado completo, com sensores de deslocamento ótico (convergência) e inclinação biaxial (dois planos ortogonais), com transmissão via rádio, armazenamento em *data-loggers*, processamento e visualização em *software* especializado. Instalou-se o sistema no tardo da estrutura subterrânea, na parede próxima à obra e no teto (Figura 6). O sistema foi reaproveitado em novas seções de acordo com o avanço da escavação e, assim, as seções onde foram removidos passaram a ser monitoradas pela instrumentação convencional.

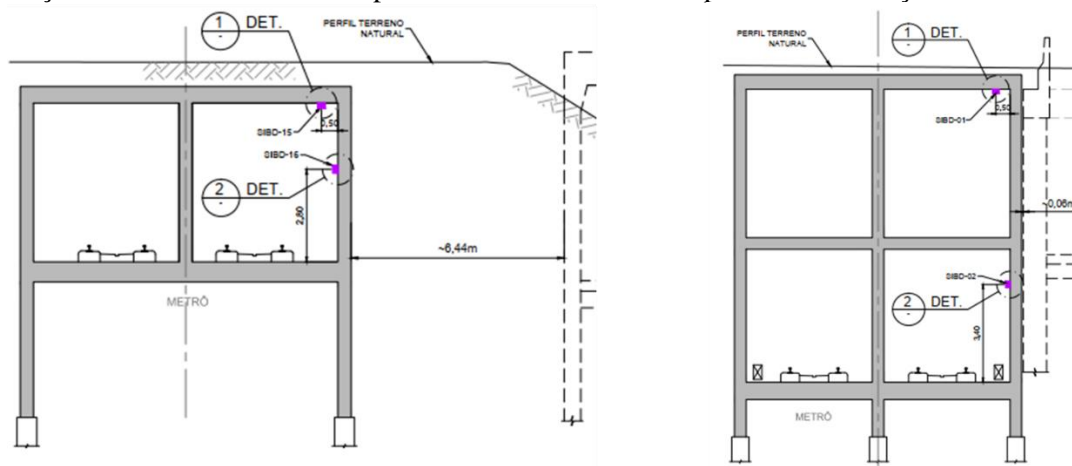


Figura 6 - Esquema de instalação dos sensores de leituras automatizadas, na parte interna do túnel de via do Metrô.

Os resultados das leituras de instrumentação são compilados, diariamente, em tabelas e gráficos previamente definidos pela Fiscalização e/ou Projetista e disponibilizados, automaticamente, por meio de sistema online, incluindo as definições de níveis de atenção, alerta e respectivos disparos.

3.3.3 Estabelecimento de limites para as leituras automatizadas

Os túneis do Metrô-DF constituem-se de uma obra cujas sondagens iniciaram-se em 1993, sendo inaugurada em 2001. Os autores deste artigo não tomaram parte do projeto destes túneis, de modo que não foi possível fazer uma avaliação detalhada sobre as tensões existentes nas estruturas antes da construção do Túnel Rei Pelé. Estas informações poderiam ser úteis para o estabelecimento de tensões e deformações pré-existent. Sendo assim, optou-se pelo estabelecimento de limites considerados seguros para as deformações da parede

dos túneis do Metrô, que resultariam em limites seguros para as leituras de instrumentação. Para tanto, as seguintes premissas foram adotadas:

- O projeto atendeu à NB 1 (ABNT, 1978), vigente à época como norma reguladora para cálculos em concreto armado;
- Os polos de ruína vigentes foram atendidos estritamente, assim como os fatores de segurança convencionais $\gamma_f = 1.4$ (i.e., majoração dos esforços solicitantes em 40%) $\gamma_c = 1.4$ (minoração da resistência característica do concreto através da divisão por 1.4);
- A compressão da parede deve ser pequena, de modo que o dimensionamento da mesma ocorreu no Domínio 2 (Santos, 1977), com prevalência do polo de ruína de tração em 10%;
- Os fatores de segurança, assim como conservadorismo dos esforços de projeto, fazem supor que a parede do Metrô esteja em estágio I (elástica, com a resistência à tração intacta).

Nestes termos, assume-se que os fatores de segurança resultem em deformações instauradas de tração menores ou iguais à metade ($1: \gamma_f \cdot \gamma_c \cong 0.5$) de das deformações do polo de tração, resultando em trações instauradas de 5%, podendo ainda ocorrer deformações da mesma monta na parede, a serem causadas pela obra do túnel Rei Pelé.

Admite-se que as cargas são transmitidas às paredes do Metrô-DF pelo maciço de solo, e que a deformação induzida se assemelhe à deformação de uma parede biapoiada, por plastificação dos engastes, sujeita a uma carga, aproximadamente, uniforme. Assim, a flexa de deformação pode ser estabelecida pela equação

$$y = \frac{16 \delta_{max}}{5} \left[\left(\frac{x}{l} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(\frac{x}{l} \right) \right], \quad (1)$$

onde δ_{max} é a deflexão máxima (no meio do vão) e x é a distância do ponto que sofre a deflexão y ao apoio e l é o seu comprimento. Nestas condições, a curvatura máxima ocorrerá no meio do vão, sendo calculada como

$$\left| \frac{1}{r} \right|_{max} \cong \left| \frac{d^2 y}{dx^2} \left(x = \frac{l}{2} \right) \right| = \frac{48 \delta_{max}}{5 l^2}. \quad (2)$$

A partir deste resultado, pode-se limitar então o valor de δ_{max} , de modo a não se alcançar a deformação de tração do estado limite último, conforme já mencionado:

$$\frac{48 \delta_{max}}{5 l^2} < \frac{5 \text{‰}}{e} \rightarrow \delta_{max} < \frac{5 \text{‰}}{e} \frac{5 l^2}{48}. \quad (3)$$

Aqui, e é a espessura da parede. Deste limite, deduzem-se os limites para as leituras de deslocamentos a serem observados na instrumentação:

$$y < \frac{5 \text{‰}}{3 e} l^2 \left[\left(\frac{x}{l} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \left(\frac{x}{l} \right) \right]. \quad (4)$$

Para pequenas rotações θ (em radianos) da parede em relação à posição indeformada, tem-se que

$$\theta \cong \tan(\theta) = \frac{dy}{dx} < \frac{5 \text{‰}}{3 e} l \left[4 \left(\frac{x}{l} \right)^3 - 6 \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 1 \right]. \quad (5)$$

A Figura 7 apresenta leituras de inclinação e deslocamentos da parede do Metrô-DF devidos às obras do Túnel Rei Pelé. Observa-se que todas as leituras estão bastante inferiores aos limites determinados pelas Equações (4) e (5), indicando que a obras não trouxeram risco à segurança estrutural dos túneis do Metrô-DF. Observa-se que as leituras de inclinação tendem a ser mais ‘limpas’ neste caso, provavelmente devido a rugosidades na parede do túnel do Metrô-DF.

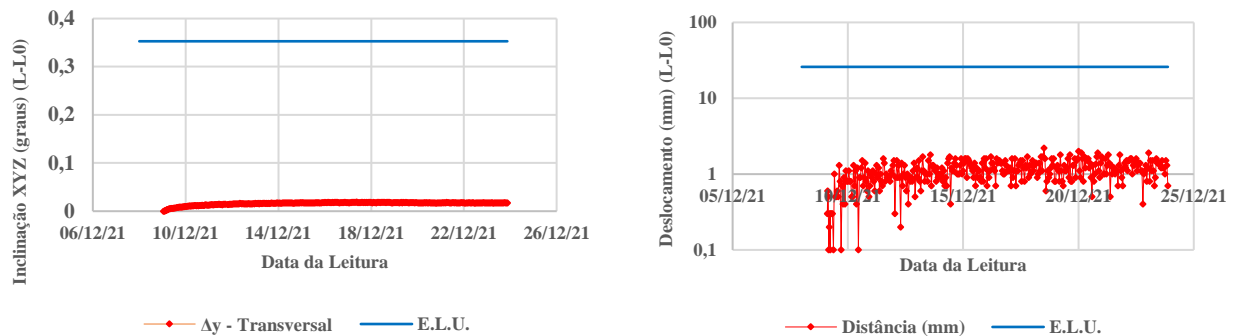


Figura 7 – Leituras de inclinação e de deslocamentos do sensor nº 66653 - Seção B07 - Parede

4 CONCLUSÕES

Na interpretação dos resultados da instrumentação, deve-se ter em mente que a formulação é conservadora, pois ela presume que a rigidez da edificação é desprezível quando comparada à rigidez do maciço. Desse modo, presume-se que a edificação vai recalcar e distorcer de modo igual ao maciço não edificado. Os cálculos efetuados para o sistema de contenção proposto para o Túnel Rei Pelé mostraram que os valores inicialmente estimados para o sistema de contenção são adequados aos carregamentos impostos e às condições geológico-geotécnicas do local.

Para representar a realidade das diferentes características geométricas e geotécnicas desta obra, a 1ª Fase do projeto foi subdividida em quatro modelos diferentes e as 2ª e 3ª Fases foram subdivididas em outros quatro modelos. Os modelos representam a região do emboque em balanço, região com a presença do pergolado, extensão dos túneis cobertos e singelos e, por fim, os túneis contíguos e com laje nervurada.

Os solos foram modelados utilizando os modelos constitutivos de *Mohr-Coulomb* e *Modified Cam-Clay* e os parâmetros foram adotados com base em análise de documentos técnicos, informações bibliográficas e campanha de sondagens realizada no local da obra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos consultores José Luiz Salvoni e Aurélio Augusto S.P.T de Carvalho pela contribuição no desenvolvimento do projeto e implantação da obra, às parceiras Tetra Projetos e Arcus, responsável pelo projeto de urbanização e da OEA, respectivamente, e ao engenheiro Fabian Corgnier, da Teknier Engenharia e Tecnologia, empresa que realizou a instalação dos instrumentos no túnel do Metrô-DF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1978) *Projeto e execução de estruturas de concreto armado, NB 1*. Rio de Janeiro, 76p
- Santos, L. M. (1977) *Cálculo de concreto armado segundo a NB-1/79 e o CEB-72*. Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Sozio, L.E. (2004) NATM - Implicações do método construtivo na segurança das escavações”. In: 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas. *Anais*. São Paulo: ABMS/CBT, 12 p.
- Wood, D. M. (1990) *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.