

OS DESAFIOS

do túnel de acesso
da Estação Cantagalo,
Metrô do Rio de Janeiro

ALUISIO DE ABREU COUTINHO JÚNIOR*

MARCO ANTÔNIO DE LIMA ROCHA**

LUIS EDUARDO SOZIO***

WERNER BILFINGER****

A Linha 2 do Metrô do Rio de Janeiro foi recentemente aumentada em 1 230 metros, incluindo a nova Estação Cantagalo. Neste trecho, o túnel e a estação foram escavados basicamente em solo gnáissico sólido. Para conectar a estação à densamente habitada área do bairro de Copacabana, foi necessária a construção de um túnel principal de acesso, com 95 metros de comprimento, ligando a estação à área de entrada localizada na Praça Eugênio Jardim. Este túnel, de 9,1 metros de largura e 11,6 metros de altura, teve de atravessar bruscas e irregulares transições entre rocha gnáissica sã e solo residual lodoso, subjacente à areia sedimentar, sob o lençol freático.

Além disso, o túnel de acesso atravessa por baixo de uma região composta de construções sensíveis. Um edifício de onze andares, de aproximadamente 60 anos, está apoiado sobre sapatas de fundações rasas. Algumas poucas fundações

estão assentadas na rocha e o restante sobre areia sedimentar, a qual se caracteriza por uma condição de densidade entre solta e densa.

A compactação da areia, resultante das vibrações decorrentes das técnicas utilizadas de perfuração e escavação por explosivos, induziu menos de 15 milímetros de assentamento adicional nas sapatas sobre a areia, mas provocou danos estruturais importantes.

Para evitar deteriorações posteriores na já crítica condição estrutural, este edifício foi subfundado com 84 estacas raiz e laje de concreto reforçado com 1,50 metro de espessura.

Este documento traz detalhes sobre as principais dificuldades encontradas durante a escavação do túnel sob este edifício, os ajustes mitigadores aplicados aos métodos construtivos e o desempenho do edifício.

O Rio de Janeiro tem uma população de aproximadamente 10 milhões de habitantes e continua crescendo. Como muitas outras grandes cidades do mundo, o tráfego é um de seus principais problemas e, por essa razão, a Linha 2 do Metrô do Rio de Janeiro foi recentemente aumentada em 1 230 metros, com o acréscimo da nova Estação Cantagalo.

A zona sul do Rio de Janeiro é muito densamente habitada e, particularmente no bairro de Copacabana, onde a Estação Cantagalo está localizada, os edifícios estão concentrados numa faixa relativamente estreita de terras entre a praia e morros íngremes. Estas condições específicas determinaram as principais orientações do projeto, que colocou a principal linha do metrô dentro do maciço rochoso sob os morros. Somente os túneis de acesso das estações e travessias relativamente curtas, foram construídos por baixo dos edifícios e ruas.

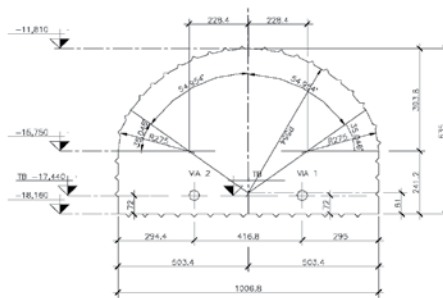
Durante a construção do túnel de acesso, foram detectados danos significativos a um determinado edifício. Para evitar deteriorações posteriores, este edifício foi escorado com 84 estacas raiz e laje de concreto reforçado com 1,50 metro de espessura.

Após o término dos trabalhos de escoramento, a escavação continuou sem maiores problemas.

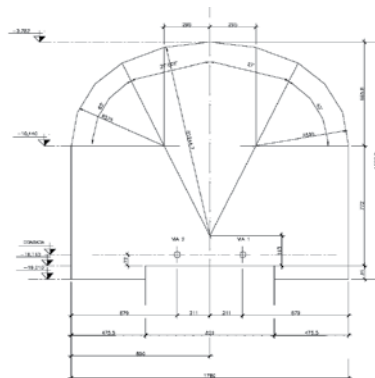
DESCRIÇÃO DO PROJETO

O trecho de metrô recentemente construído tem extensão de 1 230 metros, incluindo um quilômetro, aproximadamente, de túnel de duas pistas e uma caverna com 180 metros de comprimento na qual a Estação Cantagalo está localizada. Três túneis curtos, de acesso e ventilação, também foram construídos. A figura 1 apresenta a secção transversal dos túneis.

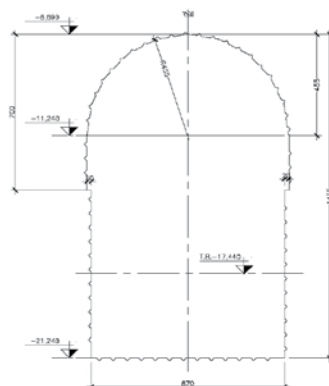
O túnel principal da linha e a estação foram escavados principalmente sobre



a) Túnel da Linha



b) Túnel da Estação



c) Túnel de Acesso

Figura 1 - Secções transversais típicas do túnel

solo gnáissico sólido, eventualmente cruzando zonas de falhas e de desgaste.

Para acessar a estação, foram construídos dois túneis relativamente curtos, quase perpendiculares à linha principal, cruzando desde o gnaiss sólido através do gnaiss desgastado e areias sedimentares, passando por baixo de edificações relativamente velhas, com mais de 10 andares de altura, apoiadas diretamente sobre as fundações.

A figura 2 mostra uma vista esquemática do layout do projeto.

O túnel de acesso liga uma estrutura

de entrada do tipo Cut & Cover, através da qual o público principal entra no metrô para chegar à estação. Esta escavação foi construída, com o uso de paredes diafragma, com 80 centímetros de espessura e 25 metros de profundidade.

O túnel de emergência está conectado a um poço circular com 10 metros de diâmetro e 20 metros de profundidade.

O método de escavação em rocha empregado foi do tipo convencional Drill & Blast (perfuração e desmonte com explosivos), com o uso de perfuratriz Jumbo com três braços de perfuração.

Ao longo dos túneis de acesso foi usado, onde aplicável, o método Drill & Blast e escavação tradicional com uso de escavadores hidráulicos, carregadores frontais e marteletes.

Ao longo dos trechos críticos, como as zonas de falhas, foram aplicadas enfilagens tubulares metálicas de 62,5 milímetros juntamente com injeção de cimento para grautar.

A escavação dos túneis de acesso e de emergência foi protegida por jato-grauteamentos horizontal e vertical, usados juntamente com enfilagem tubular metálica de 62,5 milímetros.

Foi previsto um amplo e completo programa de monitoração, especialmente para monitorar as acomodações de superfície e secções transversais, assim como o nível da água. Dentro dos túneis, também foram medidas as convergências e as acomodações. Adicionalmente, foram realizadas inspeções visuais periódicas nos edifícios localizados na vizinhança das escavações, com o objetivo de detectar rachaduras e outros sinais de movimentos diferenciais.

HISTÓRICO GEOLÓGICO

A secção transversal típica ao longo do túnel da linha e do túnel da estação é de solo residual, lodoso, relativamente fino, ocasionalmente coberto por solos

coluviais, e suas transições para solo gnáissico.

Os gnaisses locais são kinzigíticos, geralmente com três jogos de descontinuidade, um deles associado à xistosidade de penetração sul. O índice de qualidade da rocha está geralmente entre 15 e 35 e vai até os níveis de 3 a 4 nas zonas de falhas. Ao longo dos dois túneis de acesso (túnel de acesso e túnel de emergência) ocorre uma transição das condições acima, próximo à estação no sentido de uma secção transversal com a coroa dos túneis nas areias sedimentares saturadas, e nas paredes laterais em solos residuais e suas transições para o gnaissito sólido. A transição é abrupta e irregular. Condições semelhantes foram encontradas em outras secções do Metrô do Rio de Janeiro (Nieble et al, 1998; Mello et al, 1998; Mello et al, 2001, Bilfinger et al, 2001).

A figura 3 mostra uma secção longitudinal típica ao longo do túnel de acesso.

As areias sedimentares variam de soltas a meio densas, com uma contagem do índice de NSPT entre 5 e 20. O nível do lençol freático natural está a cerca de 8 metros acima da coroa do túnel.

PROBLEMAS ESTRUTURAIS (descrição e interpretação)

As acomodações, conforme foi anteriormente mencionado, foram monitoradas continuamente, incluindo o edifício número 6 da Praça Eugênio Jardim. As acomodações de algumas das colunas monitoradas começaram a aumentar com

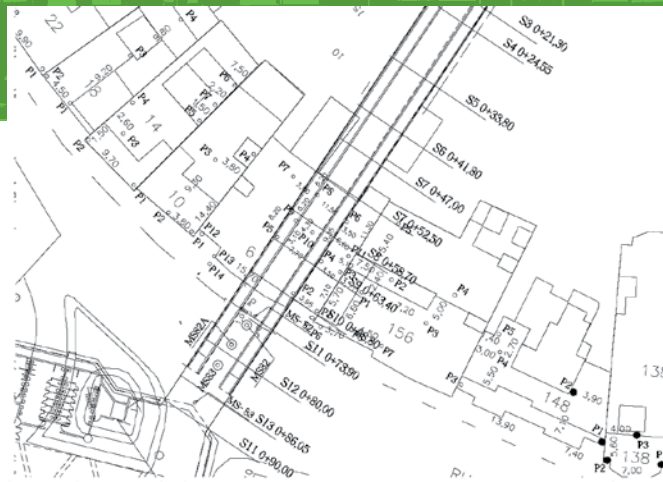


Figura 2 - Vista do plano do túnel de acesso, no canto inferior esquerdo, a secção em cut & cover



Vista aérea dos edifícios sobre o túnel de acesso

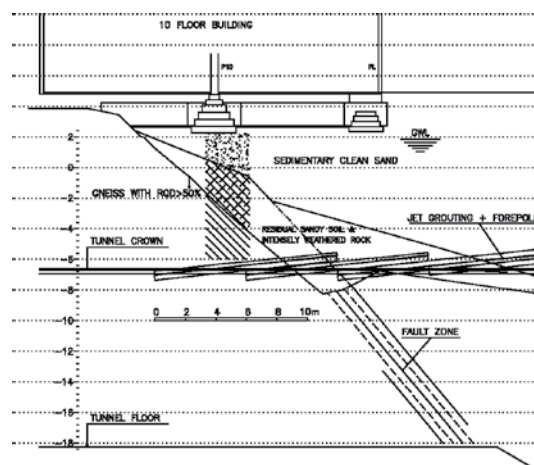


Figura 3 - Secção transversal geológica

a escavação ainda a 15 metros abaixo dos edifícios. Outras colunas não apresentaram qualquer movimentação e, em alguns casos, ligeiro deslocamento das camadas do solo. Após inspeção visual foi detectada uma grave rachadura nas

paredes (ver foto). As acomodações diferenciais calculadas ainda eram de apenas 1:480. A metodologia de construção foi alterada, reduzindo-se as taxas de avanço, mas as acomodações continuaram com algumas colunas não se movendo. A figura 4 apresenta o layout das escalas das acomodações e a figura 5 mostra as acomodações registradas dessas escalas.

As análises dos dados disponíveis mostraram que as fundações diretas por baixo de algumas das colunas traseiras do edifício estavam assentadas sobre solo residual ou rocha; as demais fundações estavam apoiadas sobre a areia típica da região de Copacabana.

A análise da estrutura demonstrou que as medidas de pressões médias aplicadas pelas sapatas no subsolo estavam em torno de 350 KPa. E, ao contrário de um projeto padrão de fundações, não havia nenhuma viga em balanço para equilibrar a carga excêntrica das sapatas periféricas.

O dano estrutural parecia ser enorme quando comparado às acomodações diferenciais; no entanto, é provável que o edifício tenha se acomodado durante a construção e pelos 60 anos de uso, sofrendo consideráveis distorções e, quando as acomodações aumentaram ligeiramente devido à construção do túnel, os efeitos se mostraram mais significativos.

A interpretação da causa das acomodações foi a de que as vibrações, devido às explosões, causaram compactação da areia de solta para média e das sapatas

que se apoiavam sobre a mesma. Por outro lado, as fundações sobre rocha/solo residual, não se acomodaram; em vez disso, algumas das sapatas apresentaram ligeiro deslocamento, interpretado como senso associado ao alívio dos estresses horizontal alto/sub-horizontal *in situ*, devido às escavações. Resultados semelhantes (deslocamento) foram observados em outros trechos ao longo da linha.

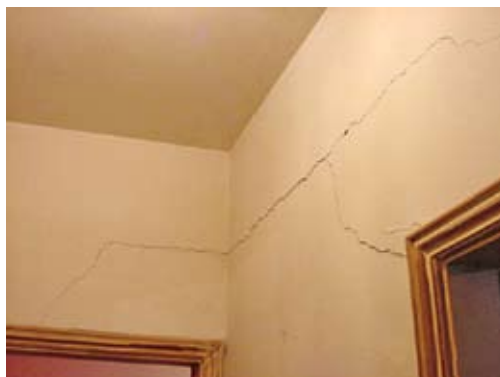
Avaliações feitas pelo projetista e por um consultor independente mostraram que o risco de grave dano estrutural devido às acomodações adicionais era alto e deveria ser evitado. Considerando que a escavação ainda não houvera chegado embaixo do próprio edifício, a única solução que poderia ser considerada segura seria o escoramento, com o uso de estacas raiz. A figura 6 mostra uma seção transversal esquemática do túnel, do edifício e das estacas raiz.

SOLUÇÃO

A solução concebida, consistia de 84 estacas raiz e laje de concreto de 1,5 metro de espessura. As estacas raiz foram concentradas na região onde as sapatas originais foram fundadas sobre areias sedimentares.

As estacas raiz foram fundadas sobre rocha sólida, evitando-se a carga direta da coroa do túnel. Além do escoramento foram utilizados grauteamento horizontal e enfilagens tubulares metálicas de 62,5 milímetros de diâmetro, para assegurar o tratamento da interface entre a rocha, os solos residuais e as areias sedimentares.

As sapatas existentes foram incorporadas à laje com o uso de vergalhões Dywi-



Rachadura dentro do edifício



Figure 4 - Vista plana do edifício e localização das escadas das acomodações

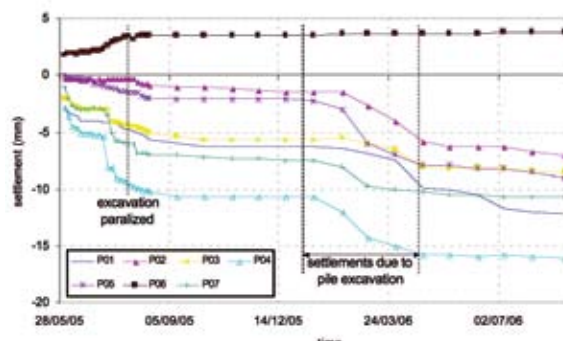


Figure 5 - Acomodações no edifício

dag protendidos. A aderência do concreto foi assegurada ao longo do 1,5 metro onde as estacas atravessavam a laje.

Isto permitiu a criação de um comportamento monolítico, o que foi confirmado pela checagem das acomodações diferenciais entre a laje e as colunas durante a

subseqüente escavação do túnel.

DESEMPENHO

O edifício acomodou menos de 1 milímetro após o término do sistema de escoramento e da conclusão do túnel.

Durante a escavação do túnel foi observado que embora o sistema de grauteamento horizontal tenha resultado em ligeira melhoria na resistência do solo, o mesmo não estava impermeabilizado e que, portanto, era alto o risco de progressiva falha na tubulação. Poços profundos, anteriormente cavados no subsolo do edifício e drenagens horizontais à vácuo foram ativadas com as finalidades de controlar a pressão do lençol freático e mitigar o risco. Algumas pequenas acomodações decorrentes do rebaixamento do lençol freático foi induzida aos edifícios vizinhos, mas sem apresentar qualquer dano estrutural.

COMENTÁRIOS CONCLUSIVOS

O comportamento do edifício de mais de 60 anos, sofrendo uma grave rachadura, mas com apenas acomodações limitadas, mostrou que o tipo de rotina de análise de acomodação induzida, na qual as distorções são avaliadas e comparadas para predeterminar os valores limites, deveria ser revista. Acomodações anteriores, não medidas nem tecnicamente documentadas, podem reduzir normalmente consideradas as margens de segurança.

A solução de escoramento mostrou um desempenho adequado; após sua construção, não foi medida nenhuma acomodação adicional significativa nem detectado qualquer comportamento adverso.

O tratamento por jato-grauteamento

do solo não foi capaz de criar uma barreira impermeável, ou reduzir significativamente a permeabilidade; este comportamento, provavelmente devido à interface rocha-solo extremamente variável.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao proprietário, Rio Trilhos, à empreiteira, Odebrecht Engenharia e Construção, e à projetista, Promon Engenharia, pela oportunidade de publicação e apoio a este documento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Nieble, C. N.; Mello, L. G.; Melo, J. T. L. P.; Camara, G. J. & Primo, C. N. P. - 1998. Experiences in the excavation of tunnels and underground station in rock in Botafogo-Copacabana stretch of the subway in Rio de Janeiro, Brazil. In Negro Jr. &

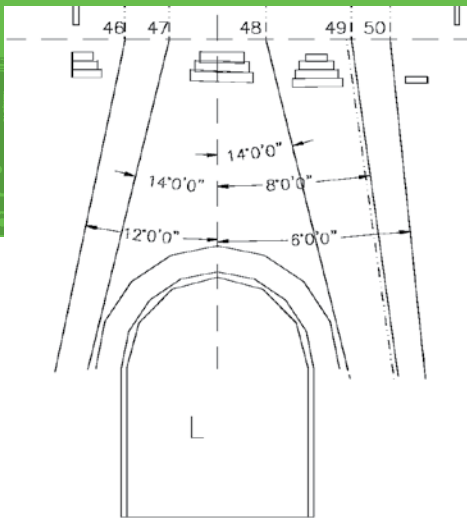


Figura 6 - Seção transversal esquemática do túnel de acesso e das estacas raiz

Ferreira (ed.s), *Tunnels and Metropolises; Proc. WTC, São Paulo, 25-30 April 1998*. Rotterdam: Balkema.

2. Mello, L. G.; Bilfinger, W.; Fialho, M. S. M.; Rideg, P.; Primo, C. N. P. & Rocha, M. A. L. - 1998. Access tunnel to the Arcoverde Station of the Rio de Janeiro Subway: Design and Construction. In Negro Jr. & Ferreira (eds.), *Tunnels and Metropolises; Proc. WTC, São Paulo, 25-30 April 1998*. Rotterdam: Balkema.

3. Mello, L. G.; Bilfinger, W.; Primo, C. N. P.; Carvalho, F. C. & Cortes, M. J. - 2001. Rio de Janeiro Subway System: Jet-Grouting Treatment Design and Control. In Teuschser P. & Colombo, A.(eds.), *Progress In Tunneling after 2000; Proc. WTC, Milan, 10-13 June 2001*. Bologna: Patrone.

4. Bilfinger, W.; Mello, L. G.; Primo, C. N. P.; Carvalho, F. C. & Cortes, M. J. - 2001. Rio de Janeiro Subway System: Settlements due to Horizontal Jet Grouting and their Control. In Teuschser P. & Colombo, A.(eds.), *Progress In Tunneling after 2000; Proc. WTC, Milan, 10-13 June 2001*. Bologna: Patrone.

*Aluisio de Abreu Coutinho Júnior, Odebrecht Engenharia e Construção

** Marco Antônio de Lima Rocha, Rio Trilhos

*** Luis Eduardo Sozio, Promon Engenharia

**** Werner Bilfinger, Vecttor Projetos Ltda.

