

**ASPECTOS GEOLÓGICOS DA LINHA 19 – CELESTE DO METRÔ DE
SÃO PAULO, LIGAÇÃO ANHANGABAÚ – BOSQUE MAIA.**

M. D. Monteiro¹; H. C. Rocha²; A. Jarouche³; I. J. Delatim⁴.

Resumo – Este trabalho apresenta os principais aspectos geológicos dos estudos realizados para desenvolvimento do Projeto Básico da futura Linha 19 – Celeste do Metrô de São Paulo, que fará a ligação entre o centro da cidade de São Paulo e a cidade de Guarulhos (ligação Anhangabaú – Bosque Maia). A Linha 19 possui aproximadamente 19 quilômetros de extensão e conta com 33 Unidades Construtivas projetadas, sendo 15 estações e 18 poços de ventilação e saída de emergência. As escavações para implantação da Linha 19 e suas Unidades Construtivas serão realizadas em aterros, aluviões, sedimentos terciários da Bacia de São Paulo e em rochas do embasamento cristalino. O projeto básico foi elaborado com base nos resultados de uma robusta campanha de investigações geológico-geotécnicas, composta sondagens a percussão, sondagens mistas, piezômetros, televisamento de furos, ensaios in situ e de laboratório e investigações geofísicas. O objetivo deste trabalho é apresentar um resumo dos aspectos geológicos da Linha 19, apresentando tanto resultados de ensaios de laboratório quanto a seção geológica esquemática da linha, resultante da compilação dos dados obtidos ao longo do projeto.

Abstract – This paper presents the main geological aspects of the studies carried out for the development of the Basic Project of the future Line 19 – Celeste of the São Paulo Metro, which will connect the center of the city of São Paulo with the city of Guarulhos (Anhangabaú – Bosque Maia connection). Line 19 is approximately 19 kilometers long and has 33 planned Construction Units, including 15 stations and 18 ventilation shafts and emergency exits. The excavations for the implementation of Line 19 and its Construction Units will be carried out in landfills, alluvium, tertiary sediments of the São Paulo Basin and rocks of the crystalline basement. The basic project was elaborated based on the results of a robust campaign of geological-geotechnical investigations, consisting of percussion drilling, piezometers, televised boreholes, in situ and laboratory tests and geophysical investigations. The objective of this work is to present a summary of the geological aspects of Line 19, presenting both laboratory test results and the schematic geological section of the line, resulting from the compilation of data obtained throughout the project.

Palavras-Chave – Túnel, Metrô, Geologia.

¹ Geól., Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, Brasil. mdmonteiro@metrosp.com.br

² Geól., Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, Brasil. hcrocha@metrosp.com.br

³ Geól., JS Geologia Aplicada, São Paulo, Brasil. ajarouche@jsgeo.com.br

⁴ Geól., SIGA – Serviços de Investigações Geotécnicas e Ambientais, São Paulo, Brasil. ijdelatim@sigageo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os principais aspectos geológicos dos estudos realizados para desenvolvimento do Projeto Básico da futura Linha 19 – Celeste do Metrô de São Paulo, que fará a ligação entre o centro da cidade de São Paulo e a cidade de Guarulhos (ligação Anhangabaú – Bosque Maia). A Linha 19 possui aproximadamente 19 quilômetros de extensão e conta com 33 Unidades Construtivas projetadas, sendo 15 estações e 18 poços de ventilação e saída de emergência. A Figura 1 apresenta a localização do traçado projetado da Linha 19 sobre imagem de satélite.



Figura 1 – Localização da Linha 19-Celeste.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde está inserida a Linha 19 – Celeste, está geologicamente representada por três grandes compartimentos tectônicos sendo, em ordem estratigráfica:

- Embasamento Pré-Cambriano;
- Sedimentos terciários (paleógenos a neógenos);
- Coberturas quaternárias;

A Figura 2 apresenta a geologia regional da RMSP com a indicação das Linha 19 – Celeste em parte do mapa geológico da RMSP (CPRM, 2019), em escala 1:750.000.

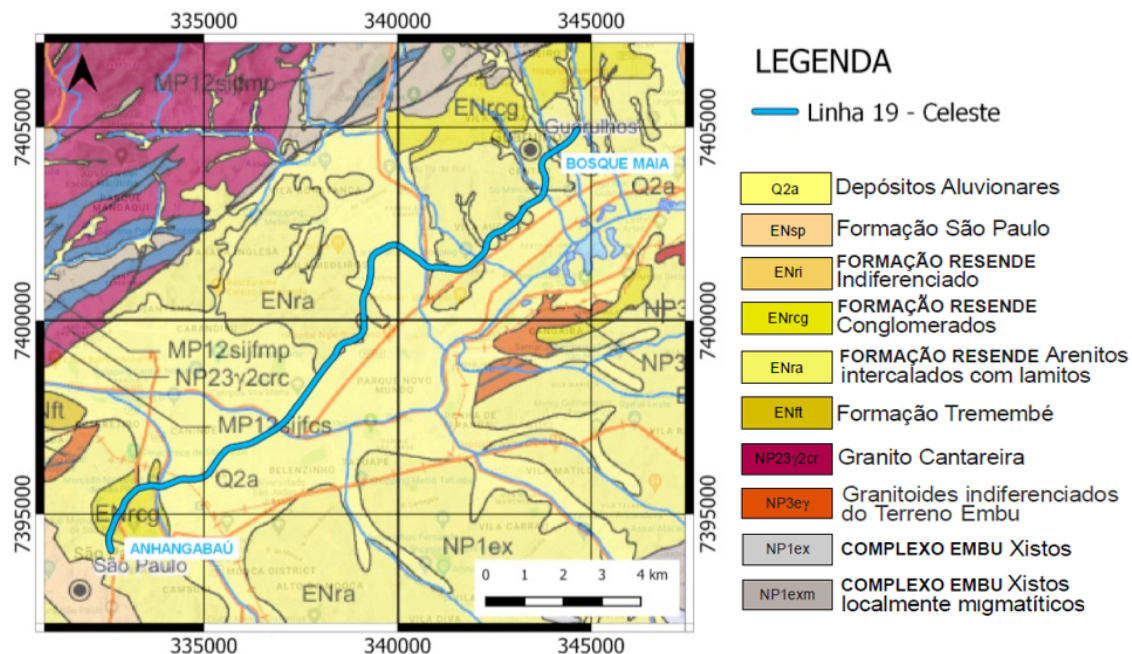


Figura 2 - Localização da Linha 19 - Celeste no Mapa Geológico da RMSP. Fonte: Modificado de CPRM (2019).

A RMSP está tectonicamente inserida no Sistema Orogênico Mantiqueira (Figura 3), formado essencialmente por rochas do pré-siluriano (>450 Ma), representando registros dos processos ocorridos no Ciclo Brasileiro (Hasui, 2010).

O Sistema Mantiqueira foi compartimentado em três cinturões orogênicos: Araçuaí, setentrional; Ribeira, central e Tijucas, meridional. É no Cinturão Ribeira, também chamado Faixa Ribeira, que se encontra o arcabouço geológico da RMSP. É representado por rochas de idades que vão do Arqueano (4.000 Ma) ao Cambriano (541 ± 1 Ma), sendo as de maior interesse as unidades do Paleoproterozoico (pós-Transamazônico) – Mesoproterozoico, representadas por rochas metavulcanossedimentares dos Grupos Votuverava e Serra de Itaberaba – Domínio São Roque; unidades do Neoproterozoico, representadas pelo Complexo Embu e rochas granitoides da Serra da Cantareira – Domínio Embu (pré a sintectônico, idades de 650-590 Ma); e com menor expressão ocorrem as rochas do Complexo Costeiro (Figura 3).

A Faixa Ribeira é a unidade geotectônica que efetivamente abriga a Bacia de São Paulo e o seu embasamento (Juliani, 1992), apresentando estruturação regional norte/nordeste-sul/sudoeste (NNE-SSW) condicionada por sistema de falhas transcorrentes (Hasui et al., 1975), como demonstrado na Figura 3, onde destacam-se no entorno da RMSP as falhas de Cubatão (Sadowski & Motidome, 1987; Sadowski, 1991), Taxaquara e do Rio Jaguari (Sadowski, 1991; Hasui, 2010), bem como a disposição espacial das unidades descritas no parágrafo anterior.



Figura 4 – Execução de sondagem a percussão manual (esquerda) e mecanizada (direita) em diferentes contextos urbanos da Linha 19-Celeste.

A campanha integrou técnicas avançadas para caracterização geotécnica e hidrogeológica:

1. Piezometria: Instalação de 291 piezômetros de tubo aberto (1 a 4 subníveis), com cobertura de 1 instrumento/100 m (total: 12.912,97 m). Ensaios de infiltração (método de Hvorslev) permitiram estimar coeficientes de permeabilidade ($k \approx 10^{-3}$ – 10^{-4} cm/s para areias da Formação Resende). Pressões hidrostáticas variaram entre 20–50 mca, com implicações diretas nos projetos de rebaixamento e estruturas de contenção.
2. Geofísica: Realização de 15.593 m de sísmica de reflexão e 22 ensaios cross-hole (792 m), essenciais para mapeamento do topo rochoso e obtenção de parâmetros elásticos dinâmicos. A execução noturna minimizou interferências de ruído urbano.
3. Ensaio Laboratoriais: Foram executados 1.596 documentos técnicos, incluindo 982 relatórios de ensaios. Destacam-se:
 - Solos: 176 ensaios triaxiais, 51 edométricos e 198 análises de difratometria de raios-X, que identificaram esmectita (20–30% em algumas unidades), alertando para riscos de clogging em escavações mecanizadas.
 - Rochas: 86 ensaios de compressão uniaxial (8–40 MPa em zonas cisalhadas) e 52 testes CERCHAR para abrasividade, critical para escolha de ferramentas de TBM.

Foram identificados importantes condicionantes com impacto direto nas decisões de projeto e construção:

- Heterogeneidade litológica nos maciços terrosos: unidades associadas às formações Resende e São Paulo com fácies arenosas e argilosas interdigitadas e predominância de estratos arenosas com variada composição granulométrica implicando em relevantes variações de permeabilidade e resistência ao cisalhamento, levando a zoneamentos específicos para parametrização geotécnica.

- Topo rochoso irregular nos domínios do embasamento gnáissico (Complexo Embu), com identificação de falhas geológicas em zonas de cisalhamento, evidenciadas pela observação de juntas de alívio e elevado grau de fraturamento.
- Elevadas cargas hidrostáticas, com níveis piezométricos entre 20 e 50 mca e contextos hidroestratigráficos de intensa presença de aquíferos suspensos. Áreas de complexidade hidrogeológica como a Estação Pari-Cerealista e a Estação Jardim Julieta, em que as sondagens não identificaram camadas robustas de isolamento hidráulico resultaram em redes de fluxo e raios de influência pouco convencionais.
- Presença de minerais expansivos: os estudos identificaram argilominerais com alto potencial de expansão e clogging, em teores locais superiores a 30%, especialmente relevante para escavações com tuneladora (TBM);
- Materiais tecnogênicos e solos paleógenos de baixa resistência mecânica e que conferem mais dificuldade à execução de escavações e fundações.
- Abrasividade de solos e rochas: para os solos valores de LCPC entre 0 – 0,40G indicam desgaste moderado de ferramentas de corte. Para as matrizes rochosas foram observados valores altos a moderados de desgaste abrasivo.
- Ocorrência de áreas contaminadas em área de influência das escavações, impondo restrições ambientais e necessidades de intervenções em sistemas de rebaixamento.

Em paralelo à identificação dos condicionantes geológicos a campanha subsidiou o desenvolvimento de arcabouço de conhecimento geológico em uma região ainda pouco estudada em projetos de obras subterrânea na Região Metropolitana de São Paulo.

Obteve-se a seção geológica que mostra uma inédita observação da majoritária presença da fácies arenosa da Fm. Resende na região nordeste da cidade de São Paulo e município de Guarulhos (Figura 5).

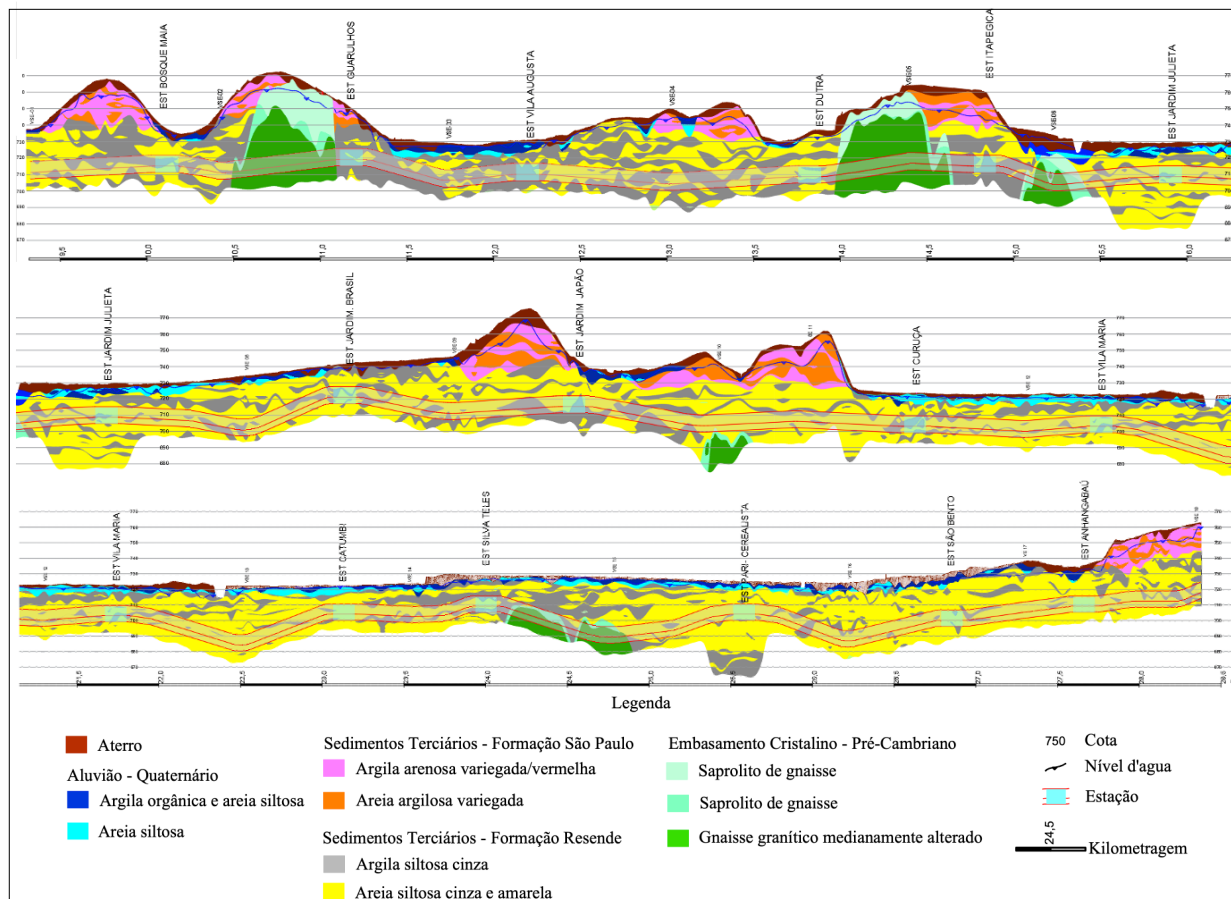


Figura 5 – Seção geológico-geotécnica ao longo do traçado da Via 1 da Linha 19.

A campanha incorporou a modelagem 3D em ambiente BIM, com dados estruturados em formato digital para integração de perfis litológicos, valores de SPT e níveis d'água. Esta abordagem permitiu a geração de seções transversais explícitas e a identificação de interfaces críticas solo-rocha, contribuindo com os projetos de escavações (Figuras 6 e 7).

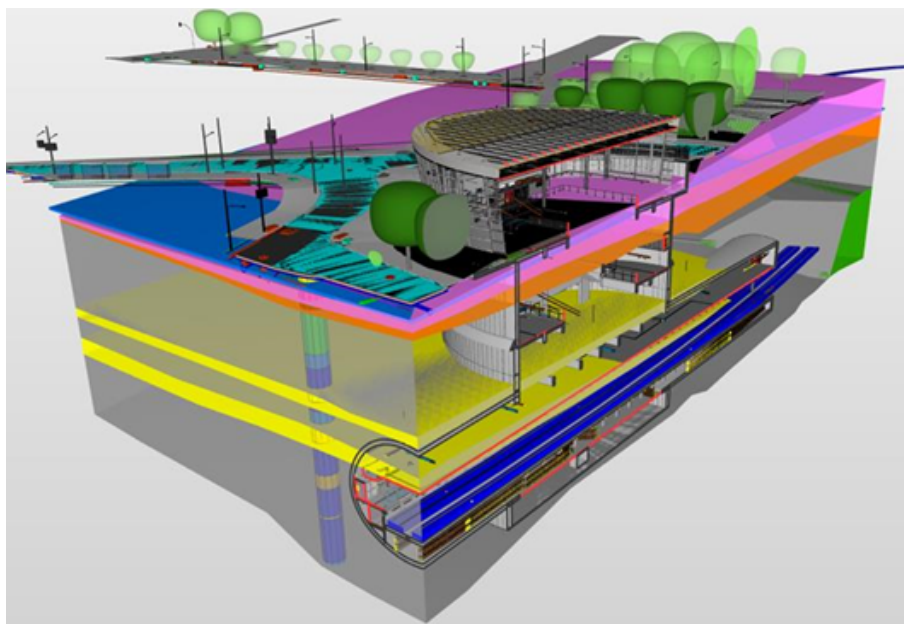


Figura 6 - Estação Guarulhos - Poço central e Túnel de plataforma em NATM. Observar interação da porção superior do poço com solos da Formação São Paulo (cores rosa e laranja) e predominância da interação do poço e corpo da Estação com maciço argiloso da Formação Resende (cor cinza).

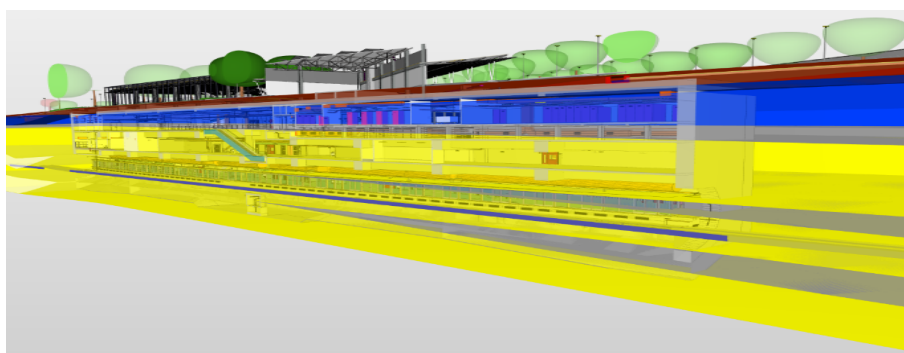


Figura 7 – Estação Catumbi – Vala a céu aberto (VCA). Vista longitudinal. Observar a predominância das escavações em maciço arenoso da Fm. Resende (cor amarela) e a espessura do solo aluvionar quaternário (cor azul).

4. CONCLUSÕES

Os resultados sugerem ampla predominância de estratos sedimentares de fácies arenosas na porção do traçado que se desenvolve desde o centro da Cidade de São Paulo até a região da Rodovia Fernão Dias. Em regiões como Vale do Anhangabaú, Pari e Jardim Julieta estratos de maior espessura de unidades argilosas apenas são observados em profundidades superiores a 60m.

Sob o ponto de vista hidrogeológico foi possível identificar regiões em que as unidades argilosas promovem isolamento conferindo o desenvolvimento de unidades hidroestratigráficas distintas, submetidas a diferentes pressões piezométricas e, em casos específicos, com reduzidas colunas de água em estratos de maiores profundidades.

O topo do embasamento pré-cambriano foi observado nas regiões do Pari, Jardim Japão, Fernão Dias/Itapegica e região central do município de Guarulhos, com a obtenção de importantes informações acerca desses materiais.

As condições geológicas mapeadas demandaram cuidados específicos no desenvolvimento do Projeto Básico. A presença de solos finos com elevada plasticidade, bem como areias pouco coesas com frações de finos significativa tiveram de ser consideradas como elementos de influência no dimensionamento de soluções de escavações e contenções.

O reconhecimento de materiais abrasivos, tanto em solo como em rochas, se mostra essencial para a escolha de ferramentas de corte e estimativas de desgaste em escavações mecanizadas.

A integração dos dados em modelo geológico tridimensional em ambiente BIM permitiu a visualização acurada das interfaces geotécnicas, contribuindo para a compatibilização com os projetos civis e a mitigação de interferências.

A campanha da Linha 19-Celeste estabeleceu um marco na integração de dados geotécnicos multidisciplinares, oferecendo subsídios robustos para a sua continuidade em próxima fase de projeto e contribuindo para a redução de incertezas em uma obra subterrânea de tamanha complexidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Os autores agradecem à Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) pela e autorização para a publicação deste artigo bem como às empresas projetistas do Projeto Básico da Linha 19 – Celeste e aos profissionais envolvidos.

6. REFERÊNCIAS

CPRM, 2019. *Mapa Geológico Integrado da Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo. Escala 1:250.000.

HASUI, Y. 2010. *A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional*. In: *Geociências*, 29:141-169.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. 1975. *The Ribeira Folded Belt*. *Revista Brasileira de Geociências*, 5:257-266.

JULIANI, C. 1992. *O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo*. In: ABAS/ABGE/SBG - SP, *Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, p.3-20.

SADOWSKI, G.R. 1991. *A Megafalha de Cubatão no Sudeste Brasileiro*. *Bol. IG. - USP*, 22:15- 28.