

**A IDENTIFICAÇÃO DAS SITUAÇÕES DE PERIGO POTENCIAIS NA
ESCAVAÇÃO PARA A CONSTRUÇÃO DA LINHA 19 – CELESTE DO
METRÔ DE SÃO PAULO, LIGAÇÃO ANHANGABAÚ – BOSQUE MAIA.**

Rocha. Hugo Cássio¹; Jarouche, Adinan²; Pascoal Junior Jairo³ Monteiro, Marcelo Denser⁴

Resumo – Este trabalho apresenta a identificação das situações de perigo potenciais na escavação para a construção, destinado ao projeto básico da 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 (VSE). 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. A identificação das situações de perigo potenciais na escavação foi elaborada considerando parâmetros como classe geotécnica de maciço rochoso (Rock Mass Rating - RMR), coberturas de maciço sobre o túnel, altura de nível d'água/pressão piezométrica sobre o túnel, dentre outros. O objetivo deste trabalho é apresentar um resumo dessas situações de perigos potenciais identificados durante a elaboração do Projeto Básico da Linha 19, bem como apresentar graficamente a delimitação e qualificação das principais situações de perigo potencial associados à escavação dos túneis de vias e estações, e suas interferências no meio urbano.

Abstract – This paper presents the identification of potential hazard situations during excavation for construction, intended for the basic design of Line 19 - Celeste of the São Paulo Metro, which will connect the center of the city of São Paulo to the city of Guarulhos (Anhangabaú – Bosque Maia connection). Line 19 is approximately 19 kilometers long and has 33 projected 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 in crystalline basement rocks. The identification of potential hazard situations during excavation was prepared considering parameters such as geotechnical class of rock mass (Rock Mass Rating - RMR), mass coverage over the tunnel, water level height/piezometric pressure over the tunnel, among others. The objective of this work is to present a summary of these potential danger situations identified during the preparation of the Basic Project of Line 19, as well as to graphically present the delimitation and qualification of the main potential danger situations associated with the excavation of track and station tunnels, and their interference in the urban environment.

Palavras-Chave – Túnel, Metrô, Gestão de Risco, Situações de Perigo.

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

² Geól., JS Geologia Aplicada, São Paulo, Brasil. ajarouche@jsgeo.com.br

³ Eng., EGT- Engenharia- jairo.pascoal@egtengenharia.com.br

⁴ Geól., Companhia do Metropolitano de São Paulo, São Paulo, Brasil. mdmonteiro@metrosp.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta a análise e avaliação das situações de perigos potenciais na escavação para a construção, destinado ao projeto básico da 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. Estes registros alimentarão os trabalhos de análise de risco geológico-geotécnico na escavação para a construção da Linha 19 do Metrô de São Paulo a serem considerados na gestão do risco do empreendimento. A Figura 1 apresenta a localização do traçado projetado da Linha 19 sobre imagem de satélite.

Serão apresentados graficamente a delimitação e qualificação das principais situações de perigo associados à escavação dos túneis de vias e estações da Linha 19 e suas interferências no meio urbano.



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.

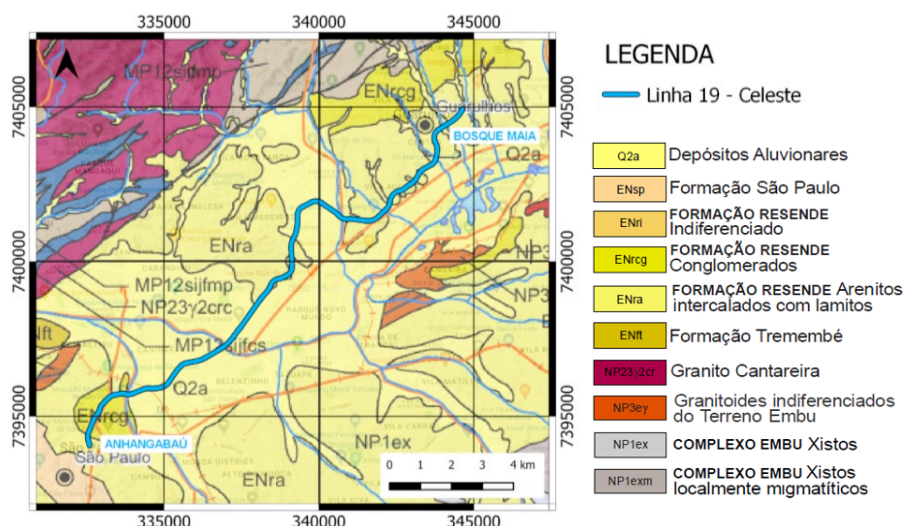


Figura 2 - Localização da Linha 19 - Celeste no Mapa Geológico da RMSP. Fonte: Modificado de CPRM (2019).

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 granitóides 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.

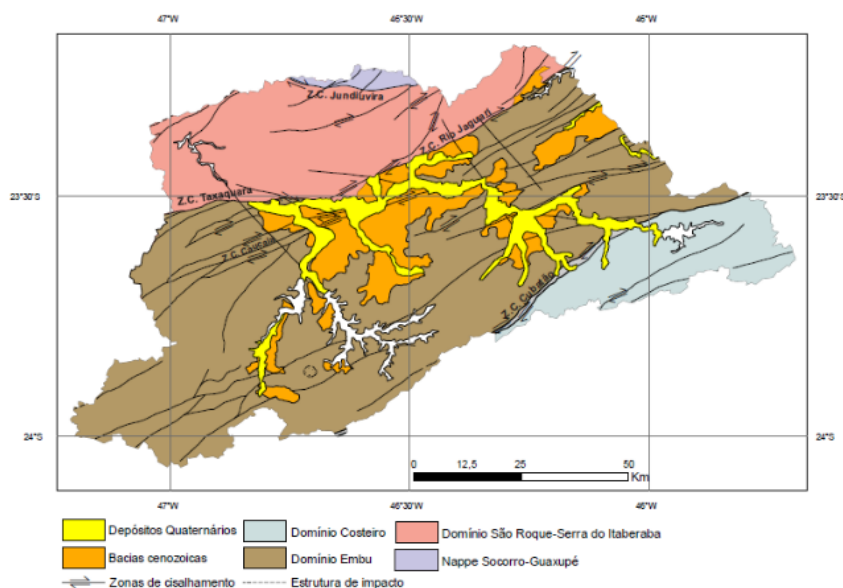


Figura 3 - Encarte Tectônico do Mapa Geológico Integrado da RMSP indicando as principais falhas e lineamentos existentes e disposição das unidades e domínios geológicos (CPRM, 2019).

3. METODOLOGIA E RESULTADOS

Para a avaliação qualitativa dos potenciais situações de perigo na escavação, foram organizadas faixas na base da seção geológico-geotécnica longitudinal à Via 1, contendo o traçado, a geologia e a projeção longitudinal do túnel que irá compor a futura linha. Não foram considerados os túneis transversais e de ligação e nem os túneis de acesso ao pátio. Cada parâmetro foi classificado seguindo um critério de cores para melhor visualização nos desenhos de perfil, neste artigo apresentado de forma esquemática (sem escala). Para cada fator foram utilizadas cores sugestivas indicativas de maior ou menor risco ou dificuldade construtiva, sendo o vermelho utilizado como limite superior (em princípio mais desfavorável) e o verde como o limite inferior (em princípio mais favorável). Algumas categorias não utilizaram todas as cores (Figura 4).



Figura 4 - Escala de cores adotada

Após cuidadosa avaliação dos vários aspectos que deveriam ser utilizados na indicação das situações de perigo, adotou-se os seguintes parâmetros para a avaliação:

- 1) Geologia/Geotecnia/Classes geotécnicas de maciço rochoso (Rock Mass Rating - RMR)
- 2) Coberturas de maciço sobre o túnel
- 3) Características das edificações sobre a projeção do túnel
- 4) Características das edificações sobre área de influência do túnel
- 5) Altura de nível d'água/pressão piezométrica sobre o túnel
- 6) Susceptibilidade à inundação da região de escavações a céu aberto
- 7) Interferências com desapropriações das obras a céu aberto
- 8) Interferências com áreas contaminadas e plumas de contaminação
- 9) Interferências com estruturas urbanas enterradas ou aéreas

3.1. GEOLOGIA / CLASSE DE MACIÇO RMR – 1ª faixa da seção de situações de perigo.

A faixa indicativa das características geológicas e de classe de maciço apresentada ao longo da seção geológico-geotécnica foi dividida em cinco classes que são representadas por cores distintas ao longo da seção. Cada classe indica a característica geológica/geotécnica que predomina ao longo do túnel a ser escavado no trecho indicado.

Foram individualizados trechos que serão escavados predominantemente em:

Solo de Alteração de rocha: São maciços muito heterogêneo, com vários graus de alteração e resistência, apresentando descontinuidades pronunciadas. Classe composta por solos residuais maduros e jovens e saprólitos, podendo conter porções mais resistentes e até mesmo matacões. Os trechos escavados predominantemente nestes solos são pontuais e localizados nos extremos das regiões de escavação em rocha. (Zona I indicada na figura 6 de perfil de alteração segundo o critério de Deer & Patton-adaptado).

Transição solo/rocha: Onde a frente de escavação será composta por rocha e pelos produtos de sua alteração em seção mista, também ocorrem pontualmente nas proximidades dos

trechos descritos acima compostos por rocha. Nesta faixa estão indicados os trechos em que a transição é composta por solo no teto e muitas vezes rocha no arco invertido, considerada a seção de maior risco geológico-geotécnico. (Zona 2 indicada na figura 6 de perfil de alteração segundo o critério de Deer & Patton-adaptado).

Rocha: Compreendem os trechos em rocha propriamente dita. Pode haver grande variabilidade nas características geotécnicas das rochas englobadas nessa categoria, entretanto de maneira geral são rochas de sãs a alteradas em toda a seção de escavação, não havendo contraste significativo de características entre o teto e o arco invertido. Quando escavados com TBM tendem a ser homogêneos, não criando grandes contrastes geomecânicos no avanço. Quando escavados pelo método convencional (NATM) necessitam necessariamente de desmonte com uso de explosivos utilizados em obras civis. (Zona 3 indicada na figura 3 de perfil de alteração segundo o critério de Deer & Patton-adaptado). Ocorre predominantemente entre VSE-02 e Estação Guarulhos-Centro; entre Estação Dutra e Estação Itapegica; região do VSE-06, VSE-06 e no trecho entre Estação Silva Teles e VSE-15.

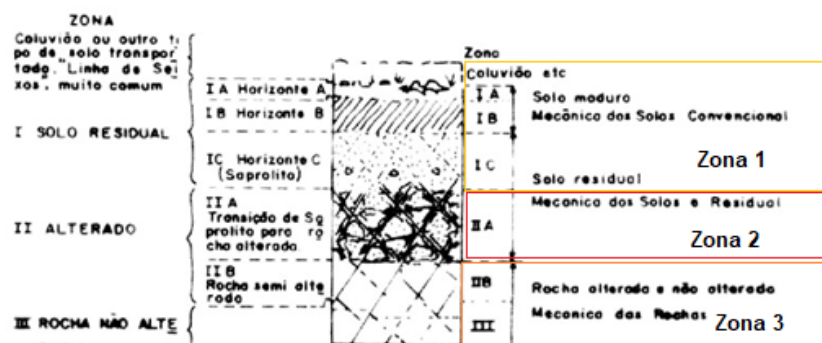


Figura 5 - Perfil de alteração segundo Deer & Patton- adaptado.

Solos sedimentares Terciários predominantemente arenosos: Em geral essa é a característica predominante ao longo do traçado com predomínio nos trechos 2, (entre Est. J. Julieta e Est. Vila Maria) e 3 (entre Est. Vila Maria e VSE18) das areias da Formação Resende com baixo teor de finos. Quando escavados com Tuneladora (Tunnel Boring Machine – TBM), indicativamente com os tipos Slurry Shield ou Mix Shield, apresentam bom comportamento desde adequadamente condicionadas. Já nas escavações convencionais (NATM) apresentam maior risco e devem ser adequadamente drenadas e tratadas. No trecho 1 (entre VSE1 e Est. Jardim Julieta) são observadas areias da formação São Paulo na seção de escavação, areias estas com elevado teor de finos.

Solos sedimentos Terciários predominantemente argilosos: Característica disseminada ao longo do traçado, com maior ocorrência na região entre VSE-01 e VSE-04 no trecho 1. Nos demais trechos as argilas da formação Resende são interceptadas pelas escavações apenas localmente e podem apresentar *clogging* em potencial.

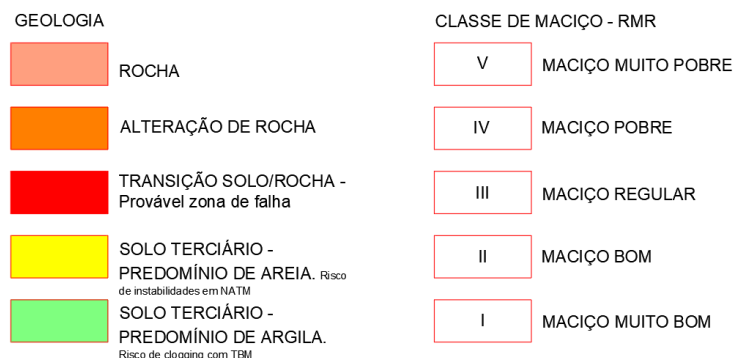


Figura 6- Classes geológico - geotécnicas na seção de escavação dos túneis.

Além do material predominante na seção de escavação, no caso das rochas, estão indicadas nessa mesma faixa as classes de maciço RMR (segundo-Bieniawski) predominantes em cada trecho, determinados a partir das classificações dos testemunhos das sondagens.

3.2. COBERTURA SOBRE OS TÚNEIS – 2ª faixa da seção de situações de perigo.

A cobertura de maciço e suas características geomecânicas sobre um túnel são inversamente proporcionais às deformações provocadas e a sua estabilidade. Túneis mais profundos tendem a provocar menores deformações específicas em superfície, apesar de apresentarem uma maior área de influência. (Figura 8)

Essa faixa de situações de perigo apresenta a espessura da cobertura existente sobre o túnel, calculada a partir da geratriz superior do túnel até o topo do terreno na região e expressa em diâmetros do túnel projetado.

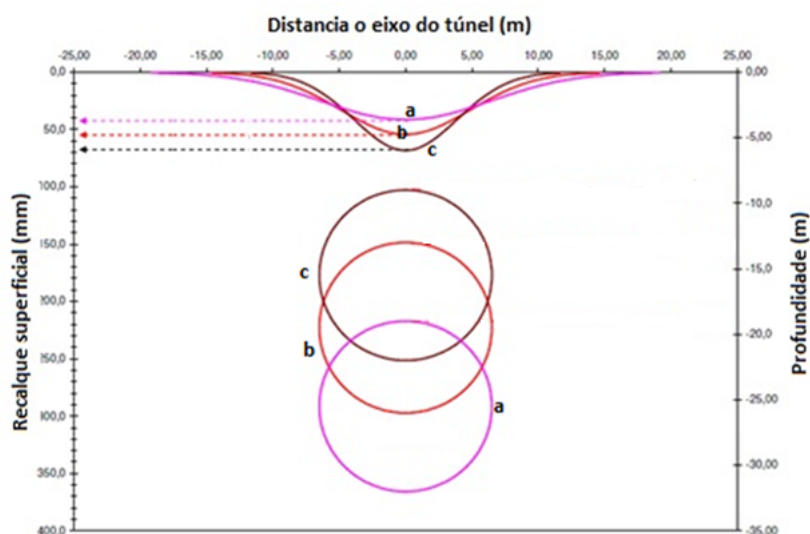


Figura 7 - Influência da profundidade/Cobertura do túnel nas áreas em superfície

Além da espessura por si só, estão indicados também os locais onde há ocorrência de solo mole sobre o túnel, com a indicação da espessura de cobertura. São apresentadas as seguintes classes de cobertura:

COBERTURA SOBRE O TÚNEL

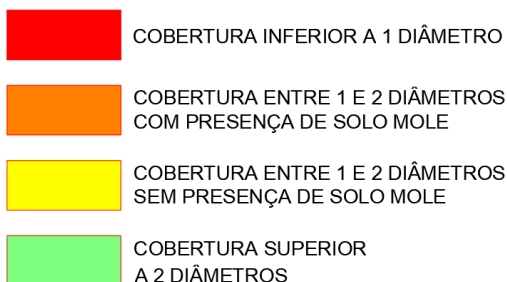


Figura 8 - Faixas de coberturas de maciço sobre os túneis

3.3. EDIFICAÇÕES SOBRE O TÚNEL E SOBRE ÁREA DE INFLUÊNCIA – 3ª e 4ª faixas da seção de situações de perigo.

A região afetada pela escavação do túnel pode ser representada simplificada como indicado na figura 10 e a forma dessa influência pode ser simplificada por uma curva de gauss invertida, como indicado na Figura 11.

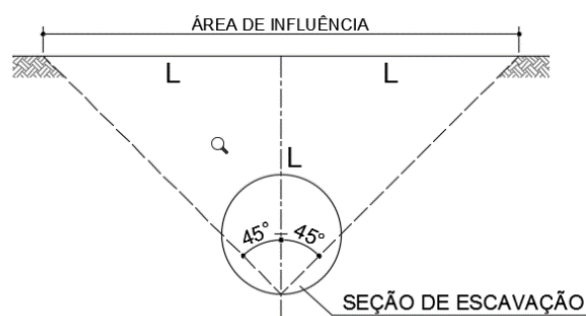


Figura 9 - Zona de influência de um túnel em superfície

A região mais afetada pelas deformações se encontra entre os dois pontos de inflexão da curva, sendo que o recalque máximo se situa no eixo do túnel (Figura 10)

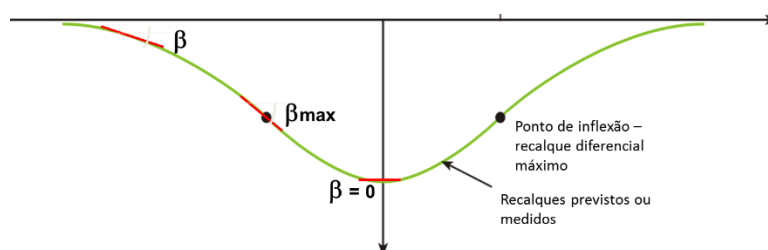


Figura 10- Bacia de recalque típica de túneis representada por uma Curva de Gauss Invertida

Dependendo da posição da edificação e de suas características construtivas, pode haver vários tipos de comportamento desta face as deformações sofridas. A figura 12 mostra algumas dessas possibilidades.



Figura 11 - Tipos de deformações sofridas por uma edificação em função de sua posição relativa à projeção do túnel

Além disso, outro aspecto muito importante está relacionado aos tipos e profundidades das fundações dos edifícios, pois além das deformações, pode haver interferências físicas do túnel com estas. Assim se estabeleceram dois tipos de abordagens. A primeira que considera os edifícios e suas características exatamente sobre a projeção dos túneis (Figura 13 a) e a segunda os edifícios e suas características sobre a zona de influência das escavações (Figura 13 b).

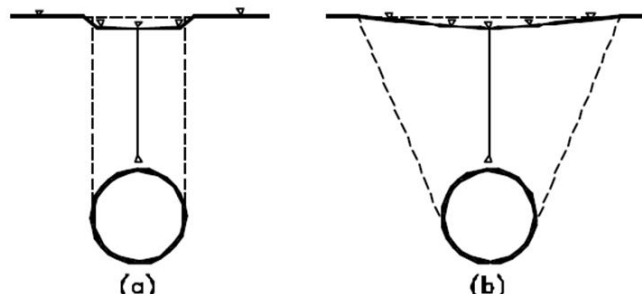


Figura 12 - Zonas de interferências das deformações com edificações consideradas na avaliação

Para ambas foram consideradas quatro classes de situações de perigo que separam as edificações existentes por quantidade de pavimentos, de acordo com as seguintes classes:

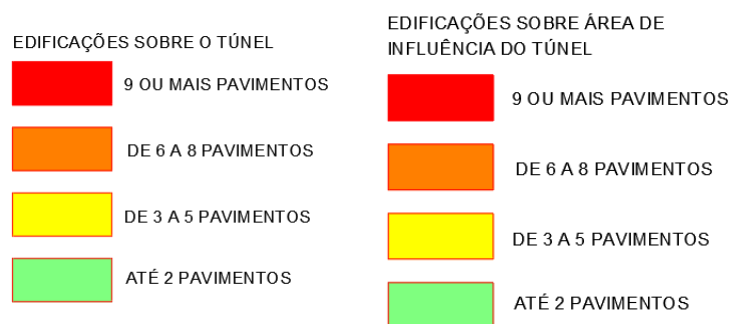


Figura 13 - Classes de influência dos túneis sobre edificações

3.4. NÍVEL D'ÁGUA – 5ª faixa da seção de situações de perigo.

As pressões piezométricas influenciam sobremaneira a estabilidade das escavações subterrâneas. No caso de uso de tuneladoras pressurizadas, a pressão, associada ao tipo de solo condiciona o tipo de tecnologia utilizada assim como a pressão de trabalho a ser usada em cada trecho. No caso de túneis convencionais (NATM) ou Vala a céu aberto (VCA) condiciona os tratamentos e rebaixamentos a serem adotados. Essa faixa de situações de perigo mostra a espessura de coluna d'água encontrada ao longo da Linha 19.

Os níveis d'água indicados na seção foram obtidos a partir das leituras dos NA encontrados nas sondagens executadas. Os níveis d'água são indicados ao lado de cada sondagem na seção e representam o primeiro nível d'água encontrado na sondagem após sua estabilização por no mínimo duas horas.

Foram definidos os quatro intervalos de espessura de coluna d'água para representação na seção de situações de perigo:

- Acima de 40 metros
- De 20 a 40 metros
- De 10 a 20 metros
- Até 10 metros

Predominam ao longo do traçado trechos com espessuras de nível d'água entre 10 a 40 metros.

3.5. SUSCEPTIBILIDADE À INUNDAÇÃO – 6ª faixa da seção de situações de perigo.

Essa faixa indica o grau de susceptibilidade à inundação na região da obra. As informações apresentadas nessa faixa foram extraídas dos mapas de susceptibilidade à inundação dos municípios de São Paulo e Guarulhos (DIAS, 2023).

Os mapas elaborados Dias (2023) indicam três graus de suscetibilidade à inundação, que estão indicados na faixa, sendo eles: Alta, média e baixa.



Figura 14- Susceptibilidade a inundação

3.6. DESAPROPRIAÇÕES – 7ª faixa da seção de situações de perigo.

Nessa faixa são indicadas as regiões ao longo da seção geológico-geotécnica onde serão necessárias desapropriações de edificações para implantação da Linha 19 – Celeste.

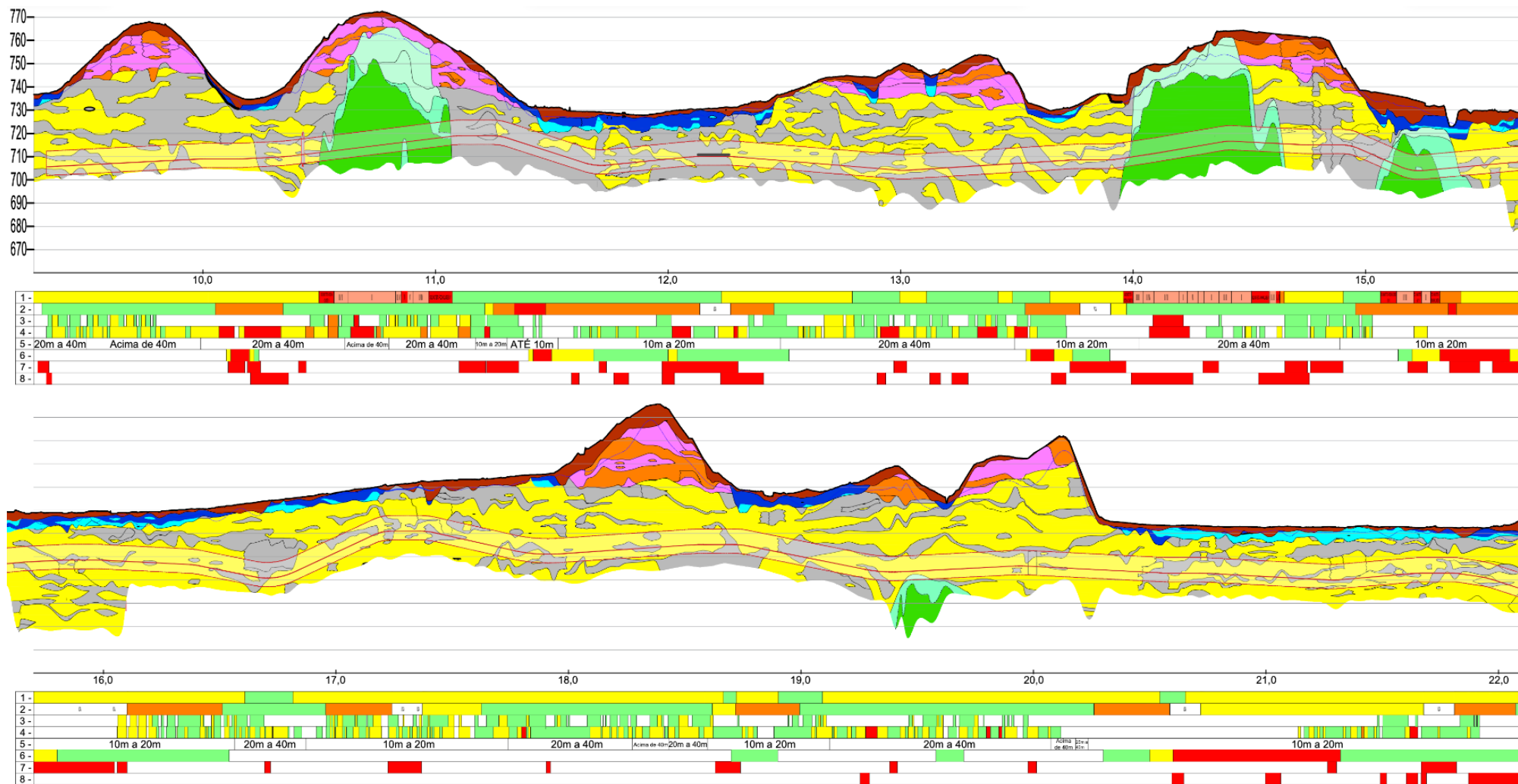
3.7. ÁREAS CONTAMINADAS – 8ª faixa da seção de situações de perigo.

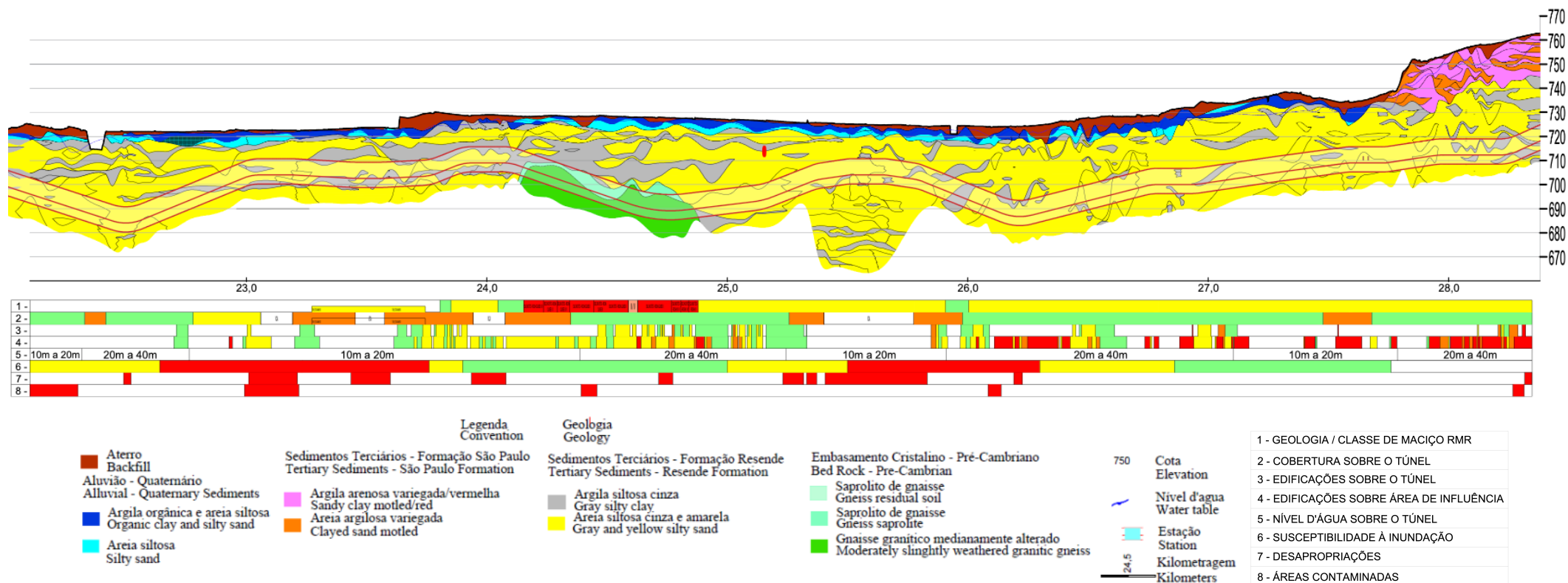
Nessa faixa de situações de perigo são indicados os trechos do túnel onde estão mapeadas áreas contaminadas na superfície durante o desenvolvimento do Projeto Básico da Linha 19 – Celeste.

4. CONCLUSÕES

Como conclusão do trabalho de identificação das situações de perigo associados às escavações é apresentada na Figura 15 uma seção geológico-geotécnica esquemática do traçado da Linha 19 – Celeste, com as faixas de situações de perigo 1 a 8 listadas abaixo da seção conforme numeração abaixo:

- 1- Geologia / classe de maciço RMR
- 2- Cobertura sobre o túnel
- 3- Edificações sobre o túnel
- 4- Edificações sobre a área de influência
- 5- Nível d'água sobre o túnel
- 6- Susceptibilidade à inundação
- 7- Desapropriações
- 8- Áreas contaminadas





5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia do Metropolitano de São Paulo-SP pela permissão de divulgação e incentivo.

6. REFERÊNCIAS

- Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 251 p.
- Cunha, H. L. R., Barros, C. B., Assis, A. P. (2016). Gestão de Risco em Túneis – Diretrizes. Na: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR, Belo Horizonte, Brasil.
- Deere, D. U., Patton, F. D. (1971). Slope Stability in Residual Soils. Na: Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering – ASCE, Volume I, San Juan, Puerto Rico.
- DIAS, Hiran. Susceptibilidade a Inundação. 2.7. [S. l.]: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 19 jan. 2023. Disponível em: <https://geoportal.sgb.gov.br/portal/home/item.html?id=0e00eb5998ab4af69125cc0f85868a16>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- 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.
- International Tunnelling and Underground Space Association – ITA-AITES (2004). Guidelines for Tunnelling Risk Management. International Tunnelling Association, Tunnelling and Underground Space Technology, pp. 217-237.
- International Tunnelling and Underground Space Association – ITA-AITES, International Association of Engineering Insurers – IMIA (2023). A Code of Practice for Risk Management of Tunnel works. Châtelaine, Switzerland, pp. 28.
- The International Tunnelling Insurance Group – ITIG (2006). A Code of Practice for Risk Management of Tunnel works. London, U.K., pp 28.
- 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.