

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

***“Estudos geológicos-geotécnicos para  
implantação de túneis e poços para estação  
metroviária na região sudeste da cidade de  
São Paulo”***

**Diego Potomati Vaccaro Nascimento**

**Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli  
Co-orientadora: Profa. Dra. Marilda Tressoldi**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF/08-15)**

TF  
N244  
DPV.2

**SÃO PAULO  
2008**

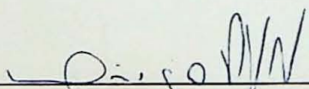
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

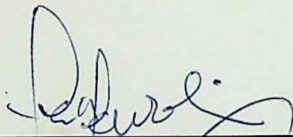


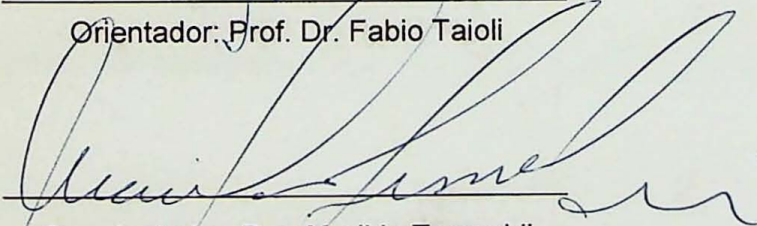
**“Estudos geológico-geotécnicos para implantação de túneis e  
poços para estação metروviária na região sudeste da cidade de  
São Paulo”**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF/08-15)**

De acordo,

  
Aluno: Diego Potomati Vaccaro Nascimento

  
Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

  
Co-orientador: Dra. Marilda Tressoldi

SÃO PAULO  
2008

DEDALUS - Acervo - IGC



30900025624



TF  
N244  
DPV. e



UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE  
OFFICE OF THE INSPECTOR GENERAL

Enclosed for the Department of Justice are two copies of the report of the Inspector General on the subject of the Department of Justice's response to the recommendations of the Commission on the Organization of the Executive Branch of the Government.

Sincerely,  
John F. Kennedy

John F. Kennedy  
Inspector General

Enclosed for the Department of Justice are two copies of the report of the Inspector General on the subject of the Department of Justice's response to the recommendations of the Commission on the Organization of the Executive Branch of the Government.

John F. Kennedy  
Inspector General

John F. Kennedy  
Inspector General

John F. Kennedy  
Inspector General

***"Com o poder da mente, da determinação, do instinto e da experiência, pode-se voar bem alto".***

**Ayrton Senna**



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer meus pais, Carlos e Regina, com certeza os principais responsáveis pela realização deste trabalho e a conclusão deste curso.

À Dra. Marilda Tressoldi, orientadora deste trabalho, com a qual tive a honra de trabalhar nestes quase 2 anos de estágio na Themag Engenharia. Obrigado pela oportunidade e por todo conhecimento que pude adquirir durante este período.

Ao Professor Fabio Taioli, pela orientação e amizade, não só neste período de desenvolvimento do trabalho de formatura, mas nestes meus primeiros 5 anos de Geologia.

À minha namorada, Denise, por todo amor, carinho e compreensão ao longo deste "complicado" ano, além, é claro, das muitas ajudas para a confecção deste trabalho.

Às geólogas mais "gente boa" do mundo, Silvia Truffi e Talita Muzzi, não só pelas infinitas contribuições a este trabalho, mas também pela grande amizade. Sem esquecer é claro de todo o pessoal da Themag, em especial a Alba, Cidão, Cláudio, Daniel "Coringão", Fabio, Magali, Nikolai e Vaz. Não poderia esquecer também do Ivan, que foi um verdadeiro professor no meu início de estágio. Pessoal, foi um enorme prazer trabalhar com vocês. Levo todos no coração!

Por fim, a todos meus amigos de turma, pelos momentos únicos que pudemos compartilhar ao longo desses 5 anos, nos quais incluo as aventuras e atrapalhadas dos trabalhos de campo, os disputados Geofuts no Cepe, discussão de futebol durante as aulas, boteco e por aí vai.

A todos deixo aqui a minha eterna gratidão!



## SÚMARIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1. Considerações Iniciais .....	3
1.2. Justificativas.....	3
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO DE ESTUDO .....</b>	<b>4</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
4.1. Geologia Regional.....	6
4.1.1. Contexto geológico regional .....	6
4.1.2. Unidades litoestratigráficas.....	7
4.1.3. Aspectos estruturais da bacia.....	11
4.2. Trabalhos Prévios .....	12
4.3. Parâmetros Geotécnicos das Unidades da Bacia de São Paulo .....	14
<b>5. METODOLOGIA DE TRABALHO.....</b>	<b>16</b>
5.1. Levantamentos Iniciais.....	17
5.2. Programa de Investigações.....	19
5.3. Classificação das Sondagens .....	24
5.3.1. Classificação de solos .....	24
5.3.2. Classificação de rocha .....	26
5.4. Elaboração das Seções Geológico-Geotécnicas.....	30
<b>6. DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>30</b>
<b>7. CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS .....</b>	<b>32</b>
7.1. Aterro .....	32
7.2. Depósitos Aluvionares.....	33
7.3. Sedimentos Terciários.....	33
7.3.1. Unidades argilosas.....	33
7.3.2. Unidades arenosas .....	34



7.4. Embasamento Cristalino .....	34
7.4.1. Solo de alteração .....	34
7.4.2. Maciço rochoso .....	35
<b>8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS .....</b>	<b>36</b>
<b>9. CONDICIONANTES DE ESCAVAÇÃO .....</b>	<b>37</b>
9.1. Poços de Estação .....	38
9.2. Túneis de Estação .....	39
9.3. Túneis de Via Sul .....	40
9.4. Túneis de Via Norte .....	40
9.5. Poço de Acesso e Túnel de Ligação .....	41
<b>10. CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>43</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>48</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização da região sudeste do município de São Paulo, onde está situado o trecho de estudo. ....	5
<b>Figura 2</b> - Planta e seção longitudinal do projeto geométrico da estação e dos túneis. ....	6
<b>Figura 3</b> - Relações entre a litoestratigrafia e a tectônica no Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989, modificado; Riccomini & Coimbra, 1992). ....	8
<b>Figura 4</b> - Bacia de São Paulo com principais zonas de cisalhamento e falhas associadas reativadas. 1. Zonas de cisalhamento e falhas reativadas; 2. Embasamento pré-cambriano; 3. Sedimentos terciários; 4. Sedimentos quaternários. Modificado de Riccomini & Coimbra (1992). ....	12
<b>Figura 5</b> - Variação da média geométrica dos teores de finos ao longo das cotas (Rocha, 1995). ....	14
<b>Figura 6</b> - Percentagens dos tipos de solos arenosos predominantes ao longo da cotas (Rocha, 1995). ....	15
<b>Figura 7</b> - Carta de Plasticidade e atividade das argilas cinza-esverdeadas da Formação Resende (Vargas, 1992). ....	15
<b>Figura 8</b> - Correlação entre SPT e Módulo de Elasticidade Tangente Inicial ( $E_o$ ) (Negro <i>et al</i> , 1992). ....	16
<b>Figura 9a e 9b</b> - Região sudeste da cidade de São Paulo mostrada na Carta Geológica da Região Metropolitana de São Paulo (Emplasa, 1980) acima, e Mapa Geológico da Região Metropolitana de São Paulo (Rodriguez, 1998) abaixo. ....	17
<b>Figura 10</b> - Mapa Topográfico antigo (modificado, 1934) com o esboço do poço de estação e dos túneis. ....	18
<b>Figura 11</b> - Imagem aérea recuperada no <i>Google Earth</i> da região de estudo. ....	19



## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Programa Inicial de Sondagens .....	<b>20</b>
<b>Tabela 2</b> – Índices de compacidade e consistência. Adaptado de Themag (1999); ABNT (2001).....	<b>21</b>
<b>Tabela 3</b> – Locação das sondagens complementares .....	<b>23</b>
<b>Tabela 4</b> – Programa de instalação de Piezômetros.....	<b>24</b>
<b>Tabela 5</b> – Unidades geológico-geotécnicas em uso pelo Metrô de São Paulo. ....	<b>26</b>
<b>Tabela 6</b> – Valores de RCU adotados em classificação geomecânica (Themag, 2004).....	<b>27</b>
<b>Tabela 7</b> – Parâmetros para a classificação de sondagens rotativa. Adaptado de Vaz (1996); Themag (1999).....	<b>28</b>
<b>Tabela 8</b> – Cronograma de atividades realizadas .....	<b>32</b>
<b>Tabela 9</b> – Valores de permeabilidade (K) adotados para as unidades geológico-geotécnicas. Adaptado de Themag (2001).....	<b>36</b>
<b>Tabela 10</b> – Zoneamento dos pacotes sedimentares quanto às suas características de estabilidade. Adaptado de Themag (2001).....	<b>37</b>



## RESUMO

Com a superfície da cidade de São Paulo densamente carregada em decorrência dos efeitos de sua acelerada urbanização, torna-se necessária a viabilização e construção de obras subterrâneas, principalmente de túneis, para o tráfego de automóveis ou para implantação de linhas do Metrô, sendo a última possivelmente a melhor solução para o trânsito e transporte na cidade. É imprescindível para a implantação de uma obra subterrânea, a realização de estudos geológico-geotécnicos, com o objetivo de determinar as características do maciço, seus condicionantes para escavações e, antecipar as técnicas mais apropriadas de intervenção a serem utilizadas.

Este trabalho teve como principal objetivo a caracterização geológico-geotécnica da sub-superfície de uma área específica situada na região sudeste da cidade de São Paulo, uma das mais urbanizadas desta cidade, visando determinar os possíveis condicionantes para as escavações de túneis e poços para uma estação metroviária, através da classificação das amostras de solo e dos testemunhos de rocha obtidos nas sondagens executadas, elaboração de seções geológico-geotécnicas e da utilização de mapas e bibliografias especializadas.

A área urbana da cidade de São Paulo encontra-se quase que em sua totalidade sobre os terrenos sedimentares da Bacia de São Paulo. Esta bacia compreende terrenos pré-cambrianos, sedimentos terciários, além de coberturas colúvio-aluviais quaternárias restritas ao longo das várzeas e baixos terraços. De acordo com as seções geológico-geotécnicas elaboradas, as escavações se darão principalmente nos sedimentos terciários ou no seu contato com os solos de alteração e maciço rochoso do embasamento cristalino. Dentre os condicionantes, destaca-se a interceptação de camadas arenosas terciárias saturadas e a necessidade da utilização de escavação a fogo nas regiões com presença de rocha dura.



## ABSTRACT

São Paulo city's surface is densely crowded in result of its accelerated urbanization effects, it's necessary the viability and construction of underground works, mainly tunnels, for traffic cars or construction of subway lines, as it is the last one possibly the best solution for the traffic and transportation in the city. It's essential for construction of underground works, the accomplishment of geologic-geotechnical studies, with objective to determine the underground's characteristics, its excavation conditions and, anticipate the intervention techniques appropriated to be used.

This work had as main objective the geologic-geotechnical characterization of underground in a specific area located in the southeast of São Paulo city, one of the most urbanized regions of this city, determining the possible conditions to tunnels and shafts excavations for a subway station, through the samples soil and rocks classification, obtained in the borehole executed, elaboration of geologic-geotechnical sections and the use of maps and specialized bibliography.

The urban area of São Paulo city is located almost in its totality on the sedimentary lands of San Paulo basin. This basin includes precambrians lands, tertiary sediments, beyond quaternary colluvium and alluvium coverings throughout fertile valleys and low terraces. In accordance to the geologic-geotechnical sections elaborated, the excavations will be mainly on the tertiary sediments or its limit with soil alteration and bedrock of basement. Among the conditions, it's distinguished interception of saturated tertiary sand layers and the necessity of the use fire excavation in regions with presence oh hard rock.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais

A Região Metropolitana de São Paulo, com uma população de aproximadamente 19 milhões de pessoas e mais de 6 milhões de automóveis circulando nas ruas (<http://www.detran.sp.gov.br>), vem sofrendo nas últimas décadas intensos congestionamentos, consequência da ausência de um plano diretor de expansão para uma metrópole que sofreu uma aceleração urbana espantosa a partir do início do século passado.

Com a superfície densamente carregada, torna-se necessária a viabilização e a construção de obras subterrâneas, principalmente de túneis, seja para o tráfego de automóveis, seja para a implantação de linhas do Metrô, sendo a última, sem dúvida a melhor solução para os problemas de trânsito e transporte na cidade de São Paulo.

A área urbana da cidade de São Paulo encontra-se em grande parte sobre os terrenos sedimentares da Bacia Sedimentar de São Paulo. Até meados da década de 50, havia pouco conhecimento das condições geológicas da bacia. As informações disponíveis eram provenientes, principalmente de descrições de furos de sondagem para fundações de edifícios e para água subterrânea. A partir da década de 80, o avanço em termos de consolidação dos conhecimentos e introdução de novas abordagens foi enorme, particularmente como subsídio às obras do Metrô.

De acordo com Francis & Rocha (1998) túneis são obras que exigem uma maior exatidão das investigações geológicas e geotécnicas em razão da ampla distribuição espacial linear e dos diferentes maciços atravessados. Cabe à Geologia de Engenharia como ciência aplicada, a missão de determinar as principais características do maciço para identificação dos condicionantes e otimizar a implantação da obra.

### 1.2. Justificativas

É imprescindível para a implantação de uma obra subterrânea a realização de um estudo geológico-geotécnico detalhado e bem elaborado, com o objetivo de antecipar, além dos diversos tipos de solo ou rocha que compõem a sub-superfície, as técnicas mais apropriadas para a escavação e a intervenção de tratamento para a estabilização dos maciços.

Para a realização de uma campanha de investigação em área densamente urbanizada, tornam-se praticamente inutilizáveis o mapeamento geológico superficial e o uso de fotointerpretação. Para se ter noção da superfície é necessário recorrer a mapas geológicos,



topográficos, ou fotos aéreas antigas, quando disponíveis. Levantamentos geofísicos podem ser realizados, entretanto são prejudicados em virtude da interferência causada por redes elétricas, tubulações metálicas enterradas e outras utilidades (Francis & Rocha, 1998).

Portanto, para regiões urbanizadas, a solução mais viável é uma campanha de investigação baseada na execução de sondagens mecânicas, onde é possível definir as unidades geológico-geotécnicas e suas características ao longo das perfurações. A partir dessas informações são elaboradas seções que auxiliam na visualização e criação de um modelo geológico para a região de estudo.

O projeto em questão foi desenvolvido em conjunto com a THEMAG ENGENHARIA LTDA, empresa que proporciona estágio de complementação profissional ao aluno. Por razões contratuais, em nenhum momento será citado o local exato desta obra, bem como outras empresas envolvidas.

## 2. OBJETIVOS

Este projeto tem como objetivo principal a caracterização geológico-geotécnica da sub-superfície de uma área específica situada na região sudeste da cidade de São Paulo, visando a implantação de poços para Estação metroviária e túneis adjacentes, procurando identificar os principais condicionantes para fins dos projetos de escavação, contenção, suporte e tratamento do maciço, de maneira geral.

## 3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO DE ESTUDO

O trecho a ser estudado está localizado na região sudeste da cidade de São Paulo (Figura 1). Esta região que engloba as subprefeituras da Moóca, Aricanduva, Vila Prudente e Ipiranga, é a mais desenvolvida e urbanizada da Zona Leste da cidade, contando com alto grau de verticalização em determinados locais e movimentadas avenidas. Suas principais vias de acesso são a Avenida do Estado, Radial Leste, Avenida Sapopemba e Avenida Prof. Luiz Ignácio de Anhaia Mello. Por razões contratuais, em nenhum momento será citado o local exato desta obra bem como as empresas envolvidas. Coordenadas e nomes de ruas estão alterados.

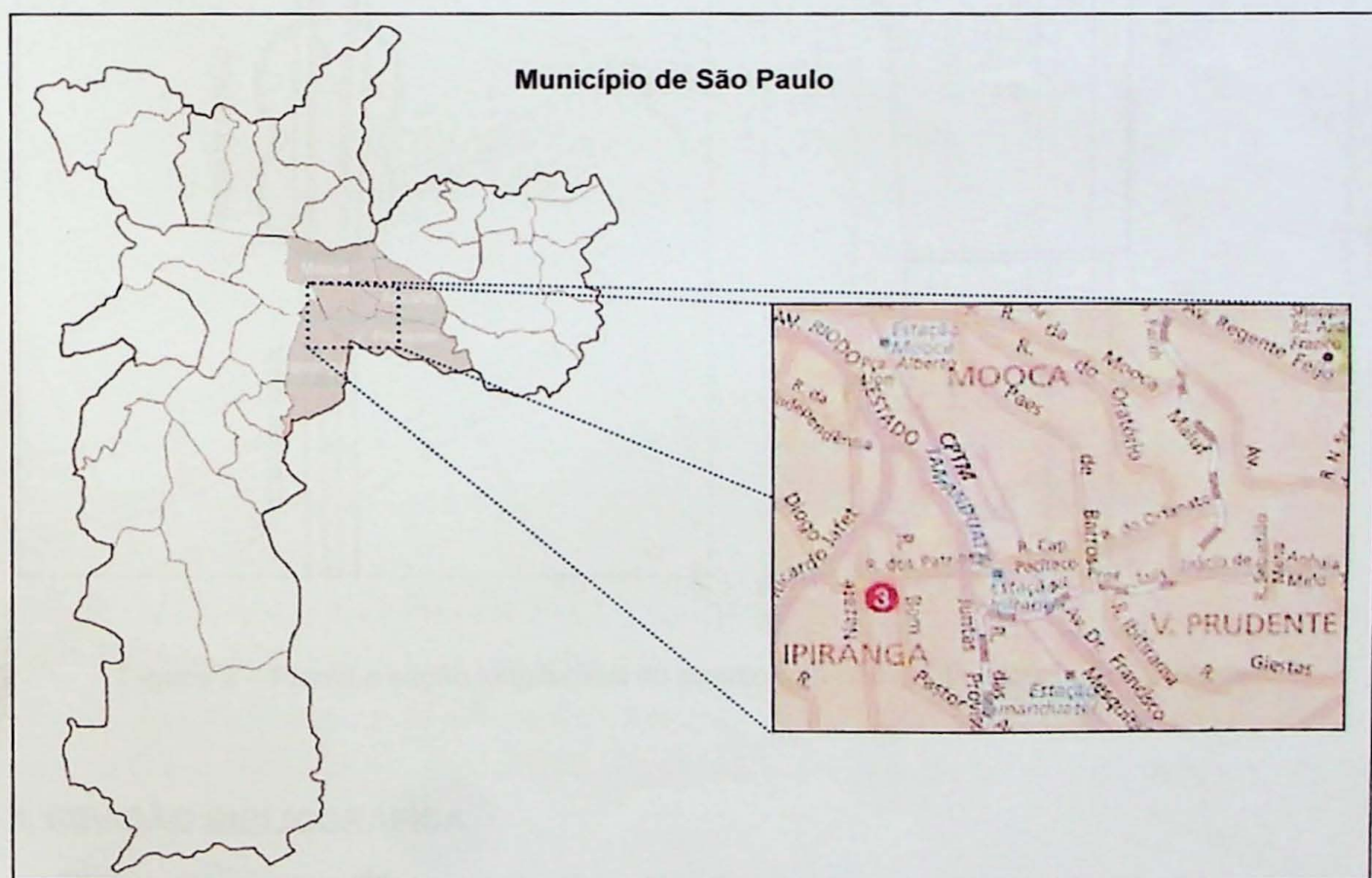
Estão previstos para este trecho as escavações e construções de:

- Poços (*shafts*), Sul e Norte, para estação.
- Túnel de estação.



- Túneis de via, um para cada sentido de destino do trem, nas regiões sul e norte da área.
- Poço de acesso e túnel de ligação.

Conforme a planta de projeto apresentada na Figura 2, os poços para estação terão de 24 m a 27 m de profundidade e 36 m de diâmetro cada. O túnel de estação, embocado no Poço Norte, terá 70 m de extensão e 12 m de altura. Os túneis de via, Sul e Norte, terão respectivamente 94 m e 115 m de extensão e, cada túnel, no total de 4, terá aproximadamente 5 m de largura por 7 m de altura. O Poço de acesso, localizado na porção norte da área, terá 30 m de profundidade e 10 m de diâmetro, e o túnel de ligação, escavado a partir deste poço e que servirá como ponto de partida para as escavações dos túneis Norte, terá 34 m de extensão, altura máxima de 10 m e largura de 10 m.



**Figura 1** – Localização da região sudeste do município de São Paulo, onde está situado o trecho de estudo.



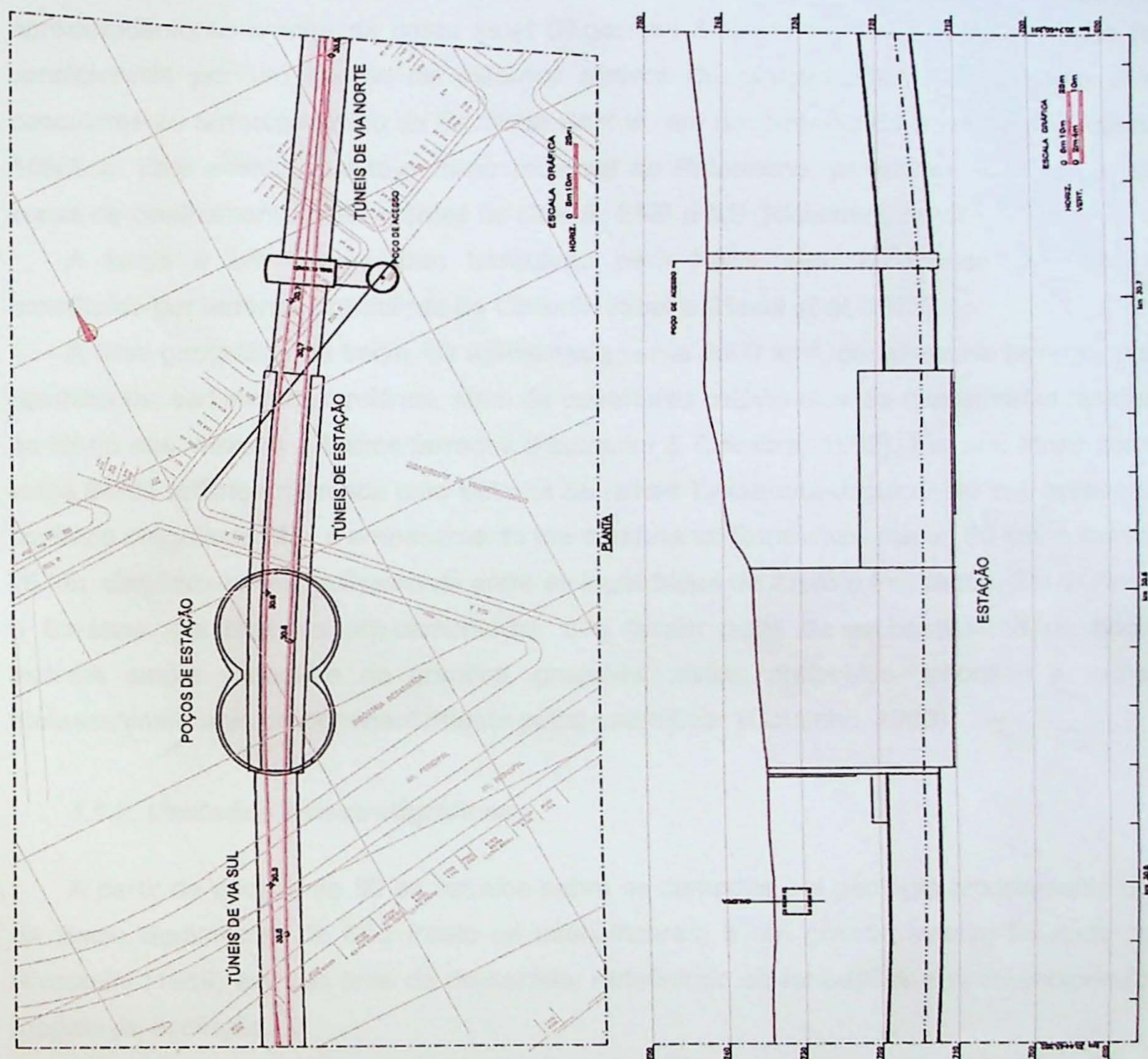


Figura 2 – Planta e seção longitudinal do projeto geométrico da estação e dos túneis.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Geologia Regional

#### 4.1.1. Contexto geológico regional

A Bacia Sedimentar de São Paulo é uma das unidades integrantes do denominado Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989). Este *rift* de idade cenozóica dispõe-se como uma estreita faixa alongada e deprimida de direção ENE numa extensão de quase



900 km entre as cidades de Curitiba (PR) e Barra de São João (RJ), seguindo aproximadamente a linha de costa atual (Riccomini & Coimbra, 1992). Sua formação foi condicionada por um campo de esforços trativos de direção NNW-SSE imposto pelo basculamento termomecânico da Bacia de Santos, em decorrência da abertura do Oceano Atlântico. Este evento, que teve início provável no Paleoceno, promoveu a reativação de zonas de cisalhamento preexistentes de direção ENE a NE (Riccomini, *op cit.*).

A bacia é um hemi-gráben basculado para NNW. Seu arcabouço geológico é constituído por terrenos policíclicos do Cinturão Ribeira (Hasui *et al*, 1975).

A área geográfica da bacia, de aproximadamente 5000 km<sup>2</sup>, compreende terrenos pré-cambrianos, sedimentos terciários, além de coberturas colúvio-aluviais quaternárias restritas ao longo das várzeas e baixos terraços (Riccomini & Coimbra, 1992). Em seu limite norte, exhibe borda retilínea marcada pelo sistema de falhas Taxaquara-Jaguari. No sul, apresenta contatos irregulares com o embasamento pré-cambriano. Seus eixos maior, 60 km, e menor, 25 km, dispõem-se respectivamente entre as localidades de Arujá e Interlagos, Santo André e Santana. Os terrenos pré-cambrianos, que fazem parte do embasamento da bacia, incluem ampla variedade de granitos, gnaisses, xistos, anfibolitos, milonitos e rochas metassedimentares predominantemente pelito-psamíticas (Coutinho, 1980).

#### 4.1.2. Unidades litoestratigráficas

A partir da década de 80 os estudos sobre as camadas e a geologia propriamente dita da Bacia Sedimentar de São Paulo se intensificaram e um grande avanço foi dado por Riccomini (1989) em sua tese de doutorado, redefinindo as formações e apresentando um modelo de evolução.

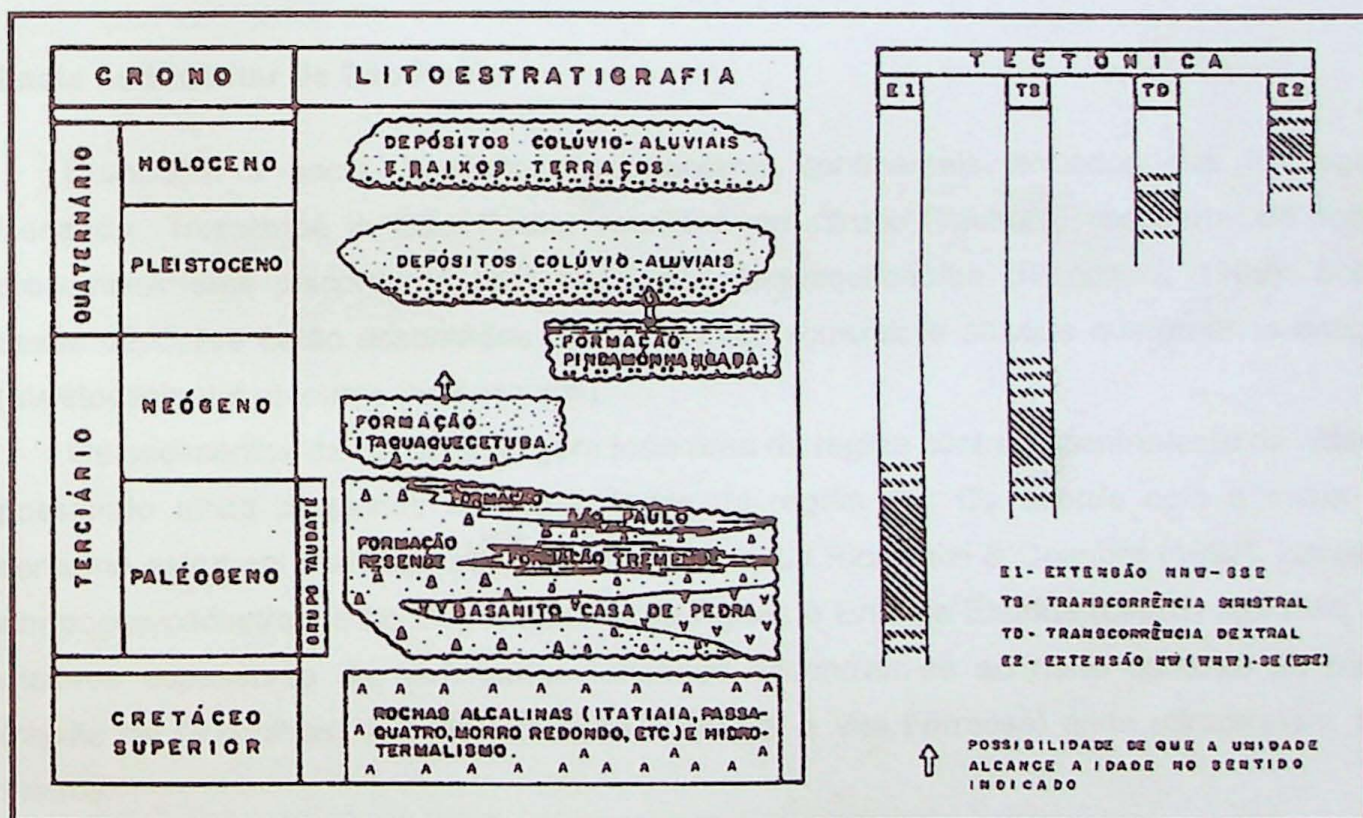
Segundo Rocha & Celestino (1992), o trabalho "O Rift Continental do Sudeste do Brasil" de Riccomini (1989) foi a primeira proposta de uma abordagem baseada mais na geologia do que nos aspectos geotécnicos das litologias. Conceitos como tectonismo sin e pós-sedimentares na bacia eram ausentes. Até então eram consideradas 5 camadas principais para os sedimentos terciários:

- 1) "**Areias Basais**", localizadas sob as atuais drenagens e sobre o embasamento pré-cambriano, abaixo da cota 715 m.
- 2) **Areias e argilas** cinzentas esverdeadas (taguá), localizadas quase sempre abaixo do atual nível de drenagens principais.
- 3) **Camadas intermediárias** de areias argilosas e argilas arenosas variegadas, localizadas entre as cotas 715 m a 790 m, sempre à meia encosta dos espigões.



- 4) **Argilas vermelhas rijas**, que ocorrem sob as camadas de argilas porosas entre as cotas 710 m e 800 m.
- 5) **Argilas porosas vermelhas**, localizadas nos topos dos espigões entre as cotas 790 m e 820 m.
- 6) **Aluviões antigos dos rios Tietê e Pinheiros**, ocorrendo sob os aluviões recentes destes rios.

A Geologia Regional da Bacia Sedimentar de São Paulo é composta por três grandes unidades litoestratigráficas: Embasamento Cristalino pré-cambriano, Sedimentos Terciários e Coberturas Neocenoicas. A Figura 3 mostra as relações entre litoestratigrafia e a tectônica no Rift Continental do Sudeste Brasileiro.



**Figura 3** – Relações entre a litoestratigrafia e a tectônica no Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989, modificado; Riccomini & Coimbra, 1992).

### Embasamento Cristalino

As rochas do embasamento pré-cambriano afloram principalmente nas regiões norte, sul e nas extremidades das regiões leste e oeste da cidade de São Paulo, sendo em grande parte recobertas pelos sedimentos terciários e quaternários nas regiões central, centro-leste, oeste e sudeste, conforme observado no Mapa Geológico da Região Metropolitana de São Paulo (Rodriguez, 1998). Essas rochas também ocorrem como altos topográficos preservados dos processos erosivos e/ou tectônicos.



Afloram essencialmente duas unidades geológicas na Região Metropolitana de São Paulo, separadas pelas falhas de Taxaquara e do Rio Jaguari, além de rochas granitóides intrusivas (Juliani, 1992). O conjunto situado a sul destas falhas, sobre o qual a maior parte da Bacia de São Paulo está assentada, foi denominado de Complexo Embu por Hasui & Sadowski (1976 *apud* Juliani, 1992), que juntamente com o Complexo Pilar comporiam o Grupo Açungui. Este conjunto está intensamente cortado por zonas de cisalhamento e falhas menores.

O Complexo Embu é constituído predominantemente por xistos, migmatitos e gnaisses migmatizados (Hasui & Sadowski *op cit*; Emplasa, 1980; Rodriguez, 1998). Nas regiões onde ocorrem zonas de cisalhamento, estas rochas encontram-se milonitizadas com foliação concordante à estruturação regional ENE-WSW.

## **Bacia Sedimentar de São Paulo**

Compõem a bacia, depósitos sedimentares continentais terciários das formações Resende, Tremembé e São Paulo, reunidas no Grupo Taubaté, recoberta de forma presumivelmente discordante pela Formação Itaquaquecetuba (Riccomini, 1989). Sobre esses depósitos estão assentados os sedimentos coluviais e aluviais quaternários antigos (pleistocênico) e recentes (holocênicos).

Os sedimentos da bacia abrangem toda área da região central e centro-leste da cidade, possuindo ainda pequenos corpos isolados na região sul. De acordo com o mapa de contorno estrutural realizado por Takiya (1991) *apud* Riccomini & Coimbra (1992), baseado em poços cadastrados no Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) até 1986, as maiores espessuras de sedimentos terciários encontram-se ao norte da área da bacia (região de Guarulhos) e a leste (Moóca, Tatuapé e Vila Formosa) onde ultrapassam 170 metros.

## **Grupo Taubaté**

### Formação Resende

Na Bacia de São Paulo a Formação Resende compreende mais de 80% do seu preenchimento sedimentar. Está depositada na base da bacia, diretamente sobre o embasamento cristalino ou sobre seus solos residuais. É constituída por depósitos fanglomeráticos de leques aluviais que gradam para depósitos relacionados à planície aluvial de rios entrelaçados (Riccomini, 1989; Riccomini & Coimbra, 1992). Através de análises palinológicas determinou-se idade eocênica-oligocênica para esta formação.



Os depósitos de leques aluviais do tipo proximal são representados por conglomerados polimíticos com seixos, matacões e blocos dispersos em matriz lamítica a arenosa. Os depósitos de fácies do tipo distal incluem lamitos arenosos e arenitos por vezes com estratificação cruzada acanalada e com níveis conglomeráticos (Riccomini & Coimbra, 1992). Estes arenitos corresponderiam às "areias basais" de Vargas (1980). A cor desses sedimentos seria originalmente cinza-esverdeada (popular "taguá"), em função do alto teor de esmectitas, porém deposições de óxidos de ferro imprimem também tons em marrom e amarelo (Cozzolino *et al*, 1994).

Localmente os sedimentos da Formação Resende encontram-se hidrotermalizados, como verificado em amostra de sondagem percussiva realizada na Avenida Prof. Luiz Ignácio de Anhaia Mello, na Vila Prudente, e em testemunho de sondagem rotativa na região do Parque Dom Pedro II.

### Formação Tremembé

Os depósitos da Formação Tremembé, de idade oligocênica, são constituídos por camadas de argila a argila siltosa, ricas em matéria orgânica, de coloração preta a cinza-esverdeada, decorrentes de depósitos lacustres do tipo *playa-lake* (Riccomini, 1989). A primeira ocorrência desta unidade na Bacia de São Paulo foi observada nas escavações para a Estação Barra Funda do Metrô. Outras ocorrências foram encontradas por Riccomini & Coimbra (1992) na área do Parque Antártica e no bairro do Pari.

### Formação São Paulo

Esta unidade está sobreposta de maneira transicional sobre os sedimentos da Formação Resende. Sua principal área de exposição é na região do "espigão central de São Paulo", ocorrendo ainda na Zona Oeste e Zona Sul da cidade.

A Formação São Paulo, de idade oligocênica, corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante, sendo constituída por duas litofácies principais (Riccomini, 1989). A primeira compreende arenitos grossos, conglomeráticos, localmente conglomerados, com estratificações cruzadas, que gradam para siltitos e argilitos lenticulares, que localmente podem conter folhelhos ricos em matéria orgânica. A segunda litofácies é constituída por arenitos médios a grossos que gradam para arenitos finos até siltitos e argilitos, apresentando ritmicidade com estratos plano-paralelos horizontais e grande continuidade longitudinal.

Em geral os sedimentos correspondentes a essa formação ocorrem acima da cota 750m, chegando até a cota 820 m. São muito afetados pelo intemperismo, apresentando



elevadas concentrações de óxido de ferro, principalmente acima da cota 800 m. Apresentam cores vermelha, roxa, rosa, amarela e branca, daí a denominação "argilas variegadas". Essas cores são decorrentes de processos de hidrólise e oxidação, devido à percolação de água a que estes solos foram submetidos (Cozzolino *et al.* 1994). Ocorrem também níveis de couraças limoníticas que se alojam no contato dos estratos argilosos e arenosos.

### **Formação Itaquaquecetuba**

Esta formação corresponde a depósitos de sistema fluvial entrelaçado que ocorrem diretamente sobre o embasamento pré-cambriano, alojados em contatos erosivos e tectônicos, não tendo sido verificada relação com as unidades terciárias do Grupo Taubaté. Estes depósitos ocorrem sob os depósitos aluviais holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí (Riccomini, 1989).

### **Coberturas Neocenoicas**

Correspondem a depósitos colúvio-aluviais de idade pliocênica e mais recentes, que acompanham a topografia atual. Estes depósitos compreendem conglomerados basais sobrepostos por sedimentos argilo-arenosos de cores variegadas, com seixos dispersos e incipiente granodecrescência ascendente (Riccomini & Coimbra, 1992).

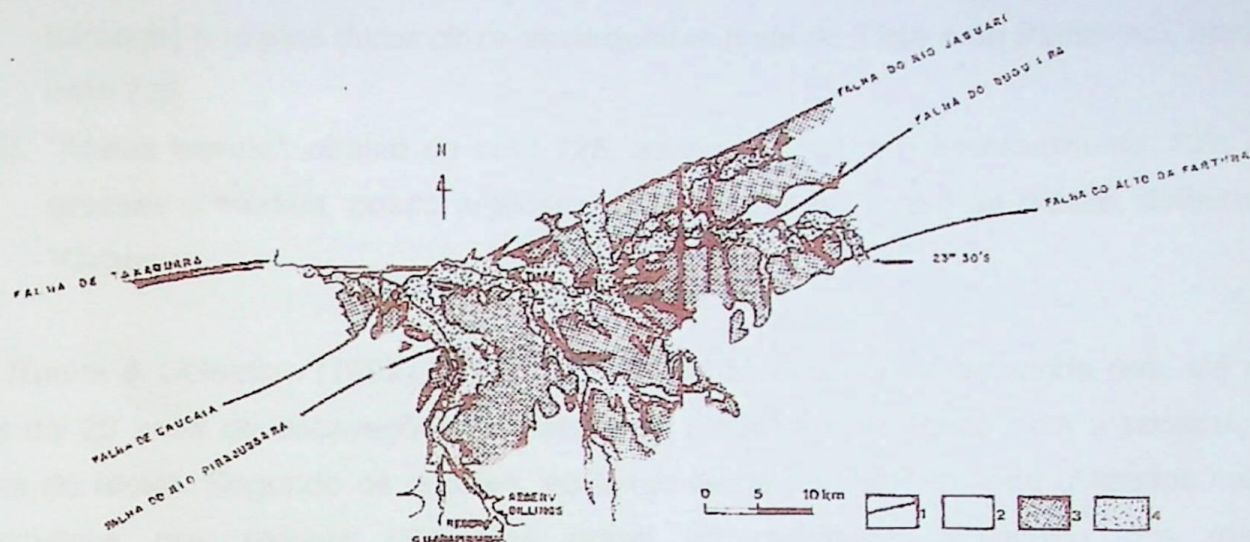
Ocupam predominantemente as planícies aluviais dos rios Tietê, Pinheiros, Tamanduateí e seus afluentes, recobrando os eixos atuais ou de drenagens mais antigas.

#### **4.1.3. Aspectos estruturais da bacia**

As estruturas identificadas na área da Bacia Sedimentar de São Paulo podem ser agrupadas em dois conjuntos principais, um compreendendo as referentes ao Pré-Cambriano até o Eopaleozóico e outro correspondente às estruturas de reativação que afetaram tanto o embasamento pré-cambriano quanto os sedimentos terciários (Riccomini, 1989). As primeiras representam as foliações metamórficas e de transposição, zonas de cisalhamento e juntas. As estruturas de reativação condicionaram o embaciamento e foram responsáveis pelas deformações posteriores nos sedimentos.

O padrão de falhamentos das reativações segue as direções estruturais ENE a E-W, NNE, NNW e WNW (Figura 4), apresentando ora movimentação predominantemente normal ou reversa, ora essencialmente direcional, dextral ou sinistral, resultando em milonitização e cataclase em uma faixa relativamente larga (Riccomini, 1989; Riccomini & Coimbra, 1992).





**Figura 4** – Bacia de São Paulo com principais zonas de cisalhamento e falhas associadas reativadas.

1. Zonas de cisalhamento e falhas reativadas; 2. Embasamento pré-cambriano; 3. Sedimentos terciários; 4. Sedimentos quaternários. Modificado de Riccomini & Coimbra (1992).

#### 4.2. Trabalhos Prévios

Vargas (1992) relata que a exploração do sub-solo da cidade de São Paulo teve início com as perfurações de poços para coleta de água subterrânea. Os dados obtidos através dessas perfurações, apesar de bastante precários, foram utilizados no reconhecimento das camadas atravessadas. Porém os primeiros conhecimentos sobre as propriedades geológicas e geomecânicas das formações da Bacia de São Paulo foram resultado do surgimento de problemas com fundações de edifícios, pontes e viadutos implantados na cidade. Portanto, a partir de 1939, o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) começou a extrair amostras de solo através de sondagens com a finalidade de obter dados sobre a resistência e compressibilidade.

Estudos mais apurados sobre as camadas da Bacia de São Paulo tiveram início com os projetos e obras para as linhas do Metrô. Cozzolino (1969) *apud* Vargas (1992) em sua tese de mestrado publicou dados referente ao projeto da linha Norte-Sul. Com base nestes dados e em um corte geológico ao longo da linha (de Santana ao Parque do Estado), Cozzolino propôs os seguintes tipos de solo:

- 1) Camadas superficiais de argila porosa vermelha entre as cotas 825 e 750.
- 2) Camadas de transição de argilas rijas e duras vermelhas, amarelas e cinzas, entre as cotas 800 e 750.
- 3) Camadas intermediárias do centro da cidade compostas por argilas rijas variegadas e areias finas e médias argilosas variegadas entre as cotas 750 e 720.



- 4) Camadas profundas compostas por areias duras, vermelhas e cinzas (vale do Rio Ipiranga) e argilas duras cinza-esverdeadas (vale do Tietê e do Pinheiros), abaixo da cota 725.
- 5) "Areias basais", abaixo da cota 725, assentada sobre o embasamento. São areias grossas a médias, pouco argilosas, encontradas no centro da cidade, definidas por Vargas.

Rocha & Celestino (1992) relatam um pouco da experiência adquirida nos, até então, mais de 20 anos de escavações nos solos da Bacia de São Paulo para a construção de linhas do Metrô. Segundo os autores, ao longo deste período têm sido utilizados métodos construtivos que exigem diferentes graus de qualidade geotécnica dos maciços, destacando-se o método mineiro por ser mais claramente influenciado pelos condicionantes geológicos. Após a sistematização do NATM (New Austrian Tunneling Method), as escavações mineiras ganharam confiabilidade e, desde então, este processo tem sido utilizado com sucesso pelo Metrô na construção de túneis e de grandes estações subterrâneas.

O NATM consiste na escavação seqüencial do maciço, utilizando concreto projetado como suporte, associado a outros elementos como cambotas metálicas, chumbadores e fibras de concreto, em função da necessidade de suporte do maciço (<http://www.metrô.sp.gov.br>).

A partir das escavações para um túnel da Eletropaulo de 3 metros de diâmetro, escavado pelo processo de NATM, desde a Ponte da Vila Guilherme até a Rua Lavapés na Várzea do Glicério, passando pela região central da cidade, Cozzolino *et al* (1994) observaram evidências de movimentos tectônicos sin e pós-sedimentares nas camadas atravessadas. Os autores enfatizaram a importância dessas estruturas na escavação de túneis, uma vez que poderiam influir de maneira decisiva nas previsões do comportamento do maciço sob ação do rebaixamento do lençol freático, processos de escavação e etc. Uma das ocorrências descritas pelos autores refere-se à presença de camadas de argila interrompidas de maneira abrupta com grande fluxo de água.

Rocha (1995) realizou um detalhado levantamento estatístico a partir de dados de sondagem de simples reconhecimento do acervo técnico do Metrô, compilado ao longo da construção de suas linhas. Conclui o autor que as areias terciárias da bacia possuem um volume de conhecimento muito menor que das argilas, principalmente quanto às suas características para construção de túneis. Dentre os principais motivos, destaca-se a limitação das investigações geológico-geotécnicas que, na maioria das vezes, baseiam-se apenas em sondagens de simples reconhecimento, nem sempre executadas seguindo a norma brasileira.



4.3. Parâmetros Geotécnicos das Unidades da Bacia de São Paulo

São incluídos aqui, alguns dos muitos resultados de ensaios realizados em vários locais da cidade de São Paulo, em especial os realizados nos sedimentos da Formação Resende, como subsídio às obras do Metrô. Mesmo não sendo este o enfoque principal, acredita-se que esses dados tenham relevância no trabalho em questão.

Rocha (1995) definiu estatisticamente algumas características granulométricas das areias terciárias da Bacia de São Paulo, com base na análise de 1275 amostras selecionadas de um acervo de 5000 sondagens de simples reconhecimento (SPT) do Metrô. A Figura 5 apresenta a distribuição dos teores de finos, percentagem de silte e argila ao longo das cotas topográficas, e a Figura 6 apresenta as percentagens dos tipos de solos arenosos predominantes ao longo das cotas. Os solos correspondentes à Formação Resende situam-se abaixo da cota 760 m, enquanto os solos da Formação São Paulo situam-se acima desta.

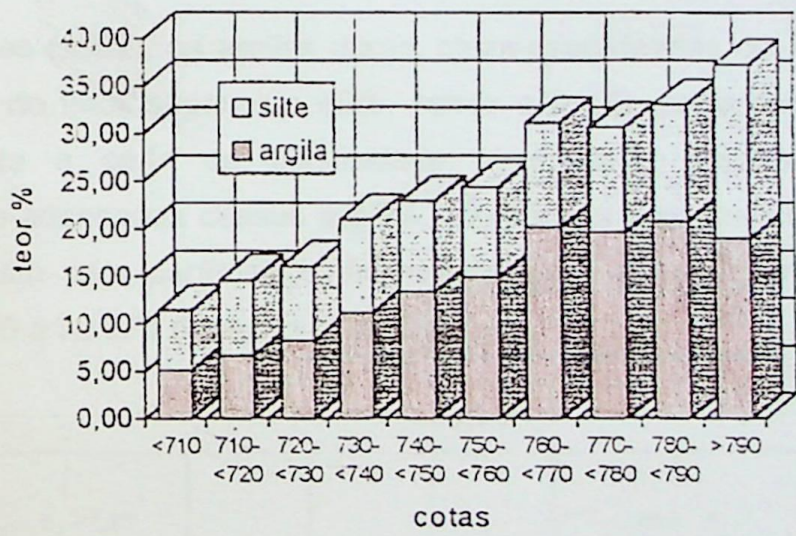
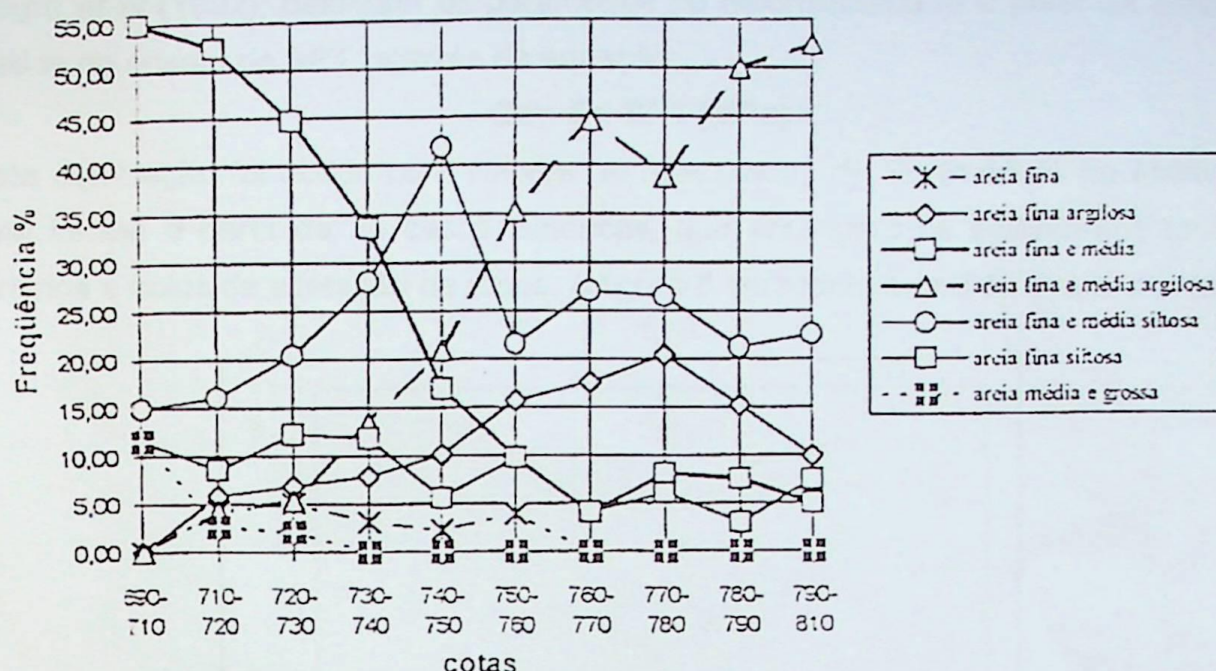


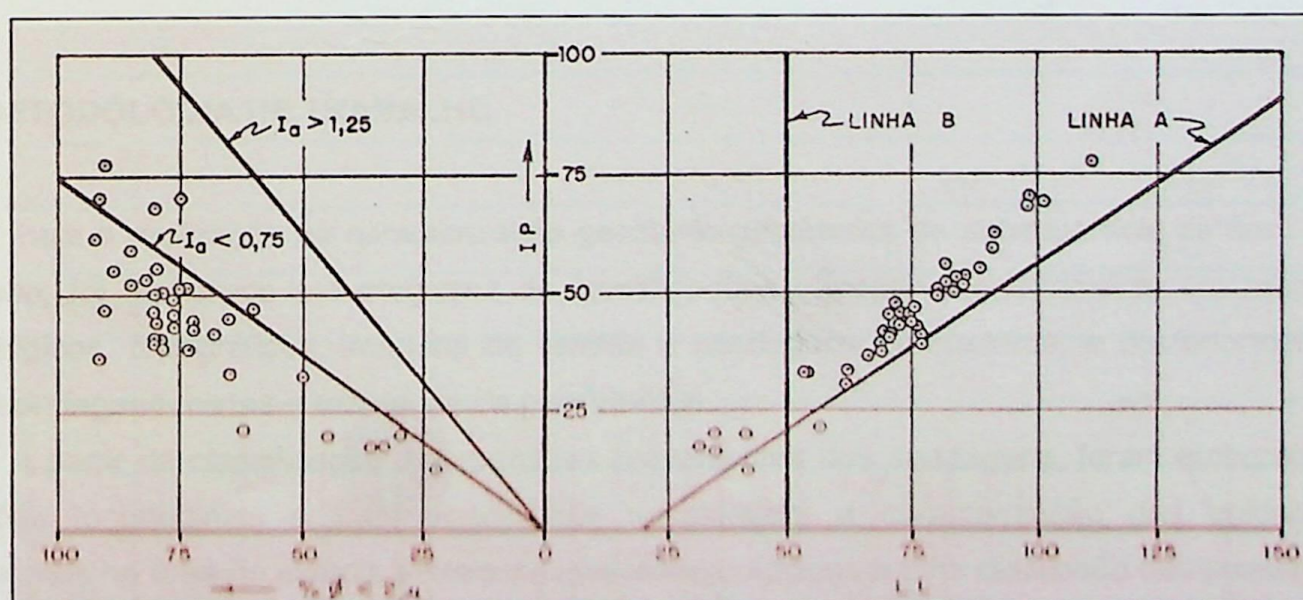
Figura 5 – Variação da média geométrica dos teores de finos ao longo das cotas (Rocha, 1995).





**Figura 6** – Percentagens dos tipos de solos arenosos predominantes ao longo da cotas (Rocha, 1995).

Segundo Vargas (1992), as argilas duras, cinza-esverdeadas da Formação Resende, apresentam fração de finos superior a 60%, sendo a fração areia essencialmente fina. A Figura 7 apresenta a carta de plasticidade e atividade dessas argilas. Amostras indeformadas sobre-adensadas dessas argilas, submetidas a ensaios triaxiais rápidos pré-adensados, indicaram para parâmetros de resistência, ângulo de atrito de 15° a 26°, e coesão efetiva de 40 a 70 kPa (Massad *et al*, 1992).



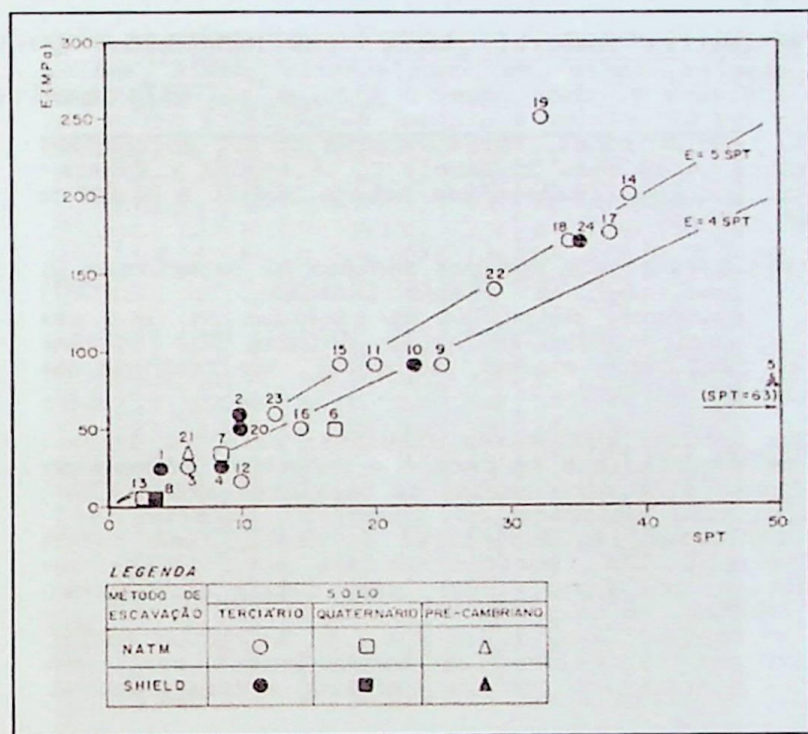
**Figura 7** – Carta de Plasticidade e atividade das argilas cinza-esverdeadas da Formação Resende (Vargas, 1992).



Negro *et al* (1992), definiram os parâmetros de deformabilidade a partir da correlação com dados do ensaio de SPT, através da equação:

$$E_o = 5 \times \text{SPT (MPa)}$$

Esta correlação foi obtida com valores retrocalculados de Eo (módulo de elasticidade tangente inicial) a partir de 24 casos históricos, que abrangem os sedimentos terciários, quaternários e solos de alteração de rocha. A figura 8 apresenta o gráfico dessa correlação.



**Figura 8** – Correlação entre SPT e Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (Eo) (Negro *et al*, 1992).

### 5. METODOLOGIA DE TRABALHO

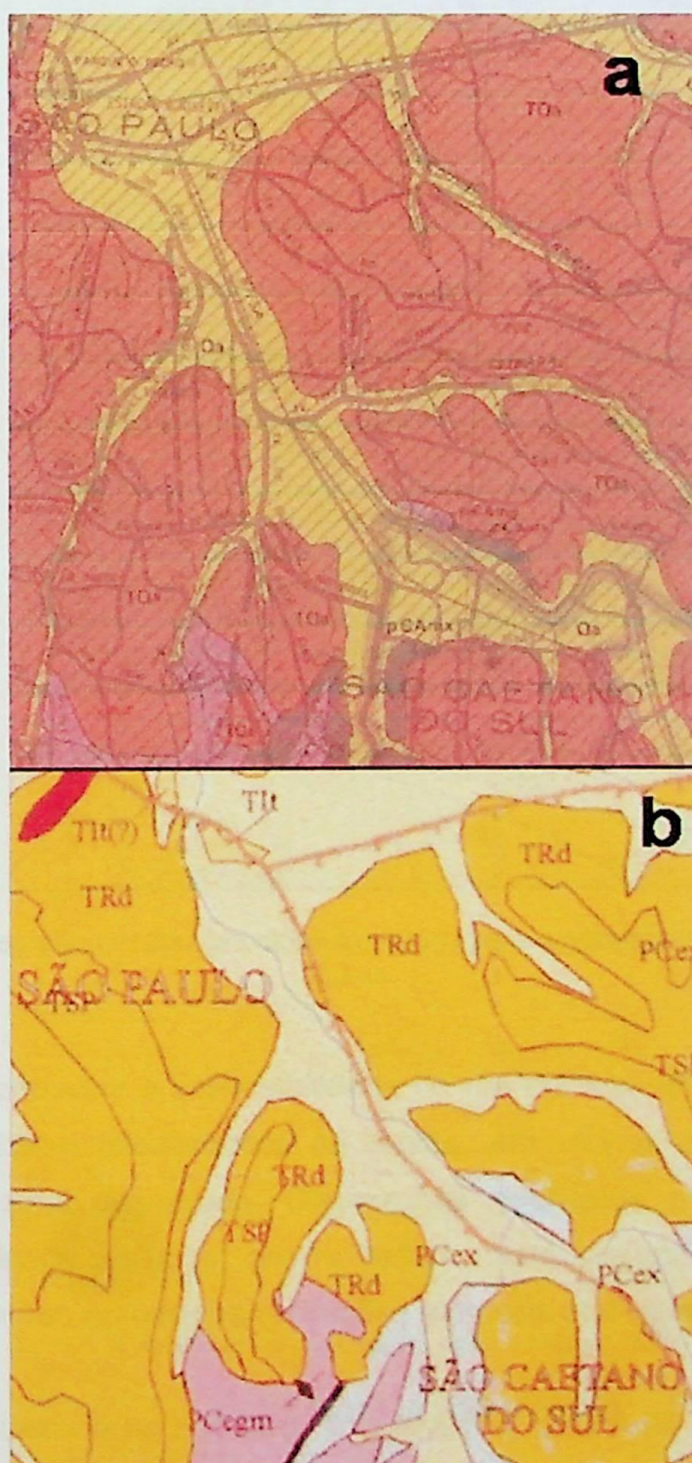
Para a realização da caracterização geológico-geotécnica de subsuperfície da área de estudo, foi elaborado um programa de investigações baseado primeiramente em mapas geológicos, topográficos, imagens de satélite e sondagens percussivas, e posteriormente em sondagens mistas e instalação de piezômetros.

A partir da classificação das amostras provenientes das sondagens, foram elaboradas seções longitudinais e transversais, que subsidiaram a caracterização das unidades presentes na área de estudo, seus aspectos hidrogeológicos e uma discussão dos possíveis condicionantes geológico-geotécnicos para fins de escavação dos poços e túneis.



### 5.1. Levantamentos Iniciais

De acordo com a Carta Geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo (EMPLASA, 1980), na região de estudo ocorrem os sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo (TQa) e também depósitos aluviais correspondentes ao rio Tamanduateí e ao antigo Córrego da Moóca, hoje canalizado e aterrado (Figura 9). No Mapa Geológico de Rodriguez (1998), os sedimentos terciários estão diferenciados, predominando nesta região os referentes à Formação Resende (TRd), já próximo do contato com a Formação São Paulo (TSP).



**Figura 9a e 9b** – Região sudeste da cidade de São Paulo mostrada na Carta Geológica da Região Metropolitana de São Paulo (Emplasa, 1980) acima, e Mapa Geológico da Região Metropolitana de São Paulo (Rodriguez, 1998) abaixo.



Utilizou-se também nesta etapa inicial de trabalho, um antigo mapa topográfico do município de São Paulo (1934), já que, possivelmente em decorrência da urbanização, o relevo atual pode estar alterado, seja por cortes ou aterros. Neste mapa é possível perceber o pequeno vale por onde corria o Córrego da Mooca, abaixo da cota 735, onde atualmente está implantada a Avenida Principal. A primeira estimativa é que ocorram depósitos aluvionares até as proximidades da cota 735. Nesta região estarão inseridos o túnel sul e uma parte do poço de estação, como mostra a Figura 10.



**Figura 10** – Mapa Topográfico antigo (modificado, 1934) com o esboço do poço de estação e dos túneis.

Visitas ao local mostraram a impossibilidade de um mapeamento geológico superficial, uma vez que não existem afloramentos na região, em virtude das ruas e residências, mesmo na área industrial desativada. Campanhas geofísicas poderiam ser feitas, em especial na área destinada ao poço, porém seriam muito prejudicadas pela presença de estruturas como tubulações enterradas ou fiações elétricas que causariam ruídos (Francis & Rocha, 1998).

Uma imagem recuperada no *software Google Earth* mostra na região de estudo a área industrial desativada destinada à escavação do poço para estação, a presença de áreas residenciais e comerciais, e da Avenida 1 com tráfego bastante intenso (Figura 11).





**Figura 11** – Imagem aérea recuperada no *Google Earth* da região de estudo.

## 5.2. Programa de Investigações

O programa de investigações para o trecho de estudo dividiu-se em duas etapas: um programa inicial que contou com execução de sondagens a percussão, e posteriormente um programa complementar. Estes programas visam a caracterização geológico-geotécnica do local.

O programa complementar de investigações foi elaborado com base na interpretação das seções geológico-geotécnicas confeccionadas a partir das informações obtidas das primeiras sondagens executadas. Este programa incluiu a execução de novas sondagens, a percussão e mistas, e a instalação de piezômetros multiníveis. Essas novas sondagens foram programadas de maneira a preencher "vazios" deixados nas seções pela falta de informação e sanar dúvidas em relação à disposição das unidades geológicas. Com a instalação de piezômetros pretendeu-se obter uma melhor informação dos aspectos hidrogeológicos da região.



### 5.2.1. Programa inicial

O programa inicial de sondagens (Tabela 1) contou com a execução de 18 sondagens a percussão e as informações de uma sondagem mais antiga recuperada junto ao proprietário da obra, denominada aqui SP-19. Estas sondagens foram locadas em planta de maneira a abranger e investigar toda a região na qual serão implantados os túneis de via, poço e túnel de estação. As profundidades foram definidas sobre as seções de projeto, de maneira a investigarem até 5 metros abaixo da base dessas estruturas. Em campo necessitou-se ajustar o local de algumas sondagens em virtude da presença de fiações elétricas aéreas ou mesmo locais em frente a residências que impediriam a saída ou entrada de carros.

**Tabela 1 – Programa Inicial de Sondagens**

Sod. Nº	Local	Coordenadas		Cota (m)	Prof. (m)
		N	E		
SP-01	Túnel sul	XX6.074,9600	XX4.896,5580	734,350	30,30
SP-02	Estação	XX6.136,1703	XX4.947,5916	734,936	30,00
SP-03	Estação	XX6.153,5992	XX4.916,8850	734,344	30,45
SP-04	Estação	XX6.178,6369	XX4.946,1227	735,723	30,45
SP-05	Estação	XX6.196,9713	XX4.963,8515	736,067	23,55
SP-06	Estação	XX6.170,4031	XX4.996,1808	735,066	18,00
SP-07	Estação	XX6.147,1570	XX5.019,4783	734,766	16,39
SP-08	Túnel norte	XX6.254,1325	XX4.999,0345	742,195	38,45
SP-09	Túnel norte	XX6.308,7078	XX5.038,3127	742,031	37,70
SP-10	Túnel norte	XX6.381,9217	XX5.085,7405	745,786	38,03
SP-11	Estação	XX6.142,4735	XX4.924,6756	734,262	30,45
SP-12	Estação	XX6.186,9622	XX4.924,8577	735,479	30,45
SP-13	Estação	XX6.201,1541	XX4.955,4704	736,141	30,07
SP-14	Estação	XX6.178,5121	XX4.974,1650	735,658	19,75
SP-15	Estação	XX6.155,3826	XX4.988,1972	735,134	24,13
SP-16	Estação	XX6.133,9593	XX4.986,6262	734,965	17,15
SP-17	Estação	XX6.160,0473	XX4.968,2119	735,535	30,00
SP-18	Estação	XX6.129,9609	XX4.964,4660	735,042	25,10
SP-19	Túnel sul	XX6.120,9390	XX4.928,0500	734,102	31,07

A execução das sondagens seguiu as diretrizes da ABGE para execução de sondagens e ensaios (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1999), do proprietário da obra e da NBR-6484 (2001). O equipamento utilizado para a realização de uma sondagem a percussão consta basicamente de um tripé, uma bomba e um tanque de água, ferramentas de corte do solo, hasteamentos e tubos para revestimento.

As sondagens a percussão foram efetuadas nos diâmetros 2 ½" e 4", utilizando-se equipamentos normatizados, com execução de ensaios de SPT a cada metro. A amostragem foi feita a cada metro e sempre que foi observado contato entre camadas. As amostras coletadas foram acondicionadas em recipientes plásticos - "copinho" e



devidamente identificadas, para caracterização tátil-visual. Toda a vez que a sondagem atingiu o nível d'água foi realizada a sua estabilização conforme critérios estabelecidos pelo proprietário da obra: 3 leituras a cada 10 minutos, 2 leituras a cada 15 minutos e 2 leituras a cada 30 minutos. A estabilização é caracterizada por 3 leituras consecutivas iguais com intervalos de 30 minutos entre elas. No avanço da perfuração, são medidos também os níveis d'água das camadas arenosas atravessadas e, sempre que possível, revestindo todo o furo acima deste trecho. No final de cada jornada de trabalho o furo foi esgotado e o NA medido no dia seguinte.

As sondagens que não atingiram as profundidades programadas foram paralisadas segundo os critérios de impenetrável ao ensaio SPT e depois à lavagem por tempo, caracterizando a presença ou proximidade de topo de rocha mole e rocha dura respectivamente (Vaz, 1996). Após a conclusão de cada uma das sondagens, o furo foi preenchido com calda de cimento, para se evitar "vazios" próximos às escavações, ou mesmo acidentes com pedestres.

O ensaio SPT (Standard Penetration Test) consiste no número de golpes necessários para penetrar os 30 cm finais do barrilete amostrador de 45 cm de comprimento, a partir do impacto de uma massa metálica de 65 kg caindo em queda livre de 75 cm de altura sobre a parte superior do hasteamento conectado ao barrilete. Este ensaio é realizado para efeito do índice de resistência do solo, além da coleta de amostra pouco deformada recuperada no barrilete. A Tabela 2 apresenta as relações dos números de golpes para a compactidade, em areias ou silte arenosos, e consistência, em argilas ou silte argilosos.

**Tabela 2** – Índices de compactidade e consistência. Adaptado de Themag (1999); ABNT (2001).

ENSAIOS SPT		
SOLO	CONSISTÊNCIA OU COMPACIDADE	NÚMERO DE GOLPES/30cm FINAIS
Areias e Siltes Arenosos	Fofa	≤ 4
	Pouco compacta	5 a 8
	Medianamente compacta	9 a 18
	Compacta	19 a 40
	Muito compacta	> 40
Argilas e Siltes Argilosos	Muito mole	≤ 2
	Mole	3 a 5
	Média	6 a 10
	Rija	11 a 19
	Dura	> 19

Critérios de impenetrável na sondagem a percussão, com base nos ensaios SPT (Themag, 1999).

- 1) 1<sup>os</sup> 15 cm – Relação 5 golpes/1cm, com um mínimo de 20 golpes.
- 2) 2<sup>os</sup> 15 cm – Relação 2 golpes/1cm, com um mínimo de 30 golpes.
- 3) 30cm finais - ≥ 50 golpes/30cm.



### 5.2.2. Programa complementar

Foram programadas para esta nova campanha 17 sondagens (Tabela 3). Algumas não puderam ser executadas em virtude de sua localização se dar em propriedades particulares, caso das sondagens SP-22, SP-25 e SP-31.

Nas sondagens SP-30, 33 e 34, localizadas na região do túnel sul, optou-se pela utilização do ensaio de SPT contínuo até a profundidade do teto do túnel, para uma melhor avaliação das unidades atravessadas e de suas propriedades.

As sondagens executadas foram iniciadas com sondagem a percussão, seguindo as mesmas diretrizes especificadas para as anteriores. As sondagens que não atingiram a profundidade especificada, paralisando na lavagem por tempo, caso das sondagens SM-21, SM-24, SM-26, mais as sondagens SP-05 e SP-14 do programa inicial, prosseguiram com uso de sondagem rotativa. As sondagens iniciadas com sondagem a percussão e que têm prosseguimento com o uso de sondagem rotativa são chamadas de sondagens mistas (SM). Para a execução e classificação dos trechos de sondagem rotativa foram seguidas as recomendações e os procedimentos fixados pela ABGE (1999).

A sondagem rotativa consiste no uso de um conjunto motomecanizado projetado para a obtenção de amostras contínuas de materiais rochosos com formato cilíndrico, através da ação perfurante e cortante dadas basicamente por forças de penetração e rotação. Os equipamentos principais utilizados são: sonda rotativa, tripé, bomba d'água, hastes, barriletes, coroas (diamantadas ou de vídea), tubos de revestimentos e os demais equipamentos exigidos para as sondagens a percussão.

A amostragem se dá por manobras de retirada do barrilete, e os testemunhos de rocha recuperados são acondicionados em caixas de maneira a ser mantida suas posições relativas de acordo com a profundidade da sondagem. Os diâmetros de sondagem utilizados neste trabalho foram NW (75,64 mm) e HW (99,23 mm).

Quando, no avanço da perfuração com sondagem rotativa, ocorre mais de 50 cm de material mole ou incoerente, é executado o ensaio de penetração SPT, seguido de outros intervalos de 1 m, até serem atingidas novamente as condições de impenetrável (presença de rocha).



**Tabela 3 – Locação das sondagens complementares**

Sod. Nº	Local	Coordenadas		Cota	Prof. (m)
		N	E		
SP-20	Túnel de Estação	XX6.264,81	XX4.989,58	743,526	38,00
SM-21	Túnel de Estação	XX6.212,86	XX4.984,81	735,600	35,00
SP-22	Túnel de Estação	XX6.249,00	XX5.015,00		
SP-23	Estação	XX6.172,01	XX4.926,10	735,109	30,31
SM-24	Estação	XX6.143,16	XX4.964,24	735,002	24,54
SP-25	Túnel de Estação	XX6.229,00	XX4.999,00		
SM-26	Túnel de Estação	XX6.220,92	XX4.967,32	740,397	35,00
SP-27	Túnel Norte	XX6.242,83	XX4.977,81	742,779	40,00
SP-28	Poço de acesso	XX6.280,10	XX5.058,67	740,864	35,00
SP-29	Acesso à estação	XX6.171,05	XX4.977,77	735,658	21,02
SP-30	Túnel Sul	XX6.079,68	XX4.916,85	733,944	30,15
SP-31	Poço de acesso	XX6.286,00	XX5.004,50		
SP-32	Túnel Norte	XX6.363,00	XX5.078,00	744,437	22,30
SP-33	Túnel Sul	XX6.124,82	XX4.919,02	734,149	30,03
SP-34	Túnel Sul	XX6.100,97	XX4.928,17	734,198	30,42
SP-35	Túnel Norte	XX6.274,29	XX5.015,51	742,042	34,70
SM-36	Poço de estação	XX6.188,38	XX4.954,67	736,015	35,00

Foi programada a instalação de piezômetros nas sondagens SP-33, SP-30, SP-28 e SM-21, objetivando uma melhor definição das características hidrogeológicas da região, entretanto, até o presente momento não foram instalados. Através destes piezômetros poderá se obter os níveis piezométricos das unidades onde serão instalados e também a realização de ensaios de recuperação, para a obtenção dos parâmetros de permeabilidade e condutividade hidráulica. A Tabela 4 mostra as profundidades programadas para a instalação dos piezômetros, definidas com base na classificação das amostras e nas seções geológico-geotécnicas elaboradas. Procura-se investigar sempre as unidades arenosas, por possuírem maiores permeabilidades e condutividades hidráulicas, além de constituírem aquíferos confinados pelas camadas argilosas, apresentando diferentes cargas hidráulicas, e conseqüentemente, seu estudo ser de fundamental importância para as escavações.

São previstos piezômetros duplos, sendo o de tipo A, mais profundo, e o de tipo B mais raso. Os de tipo A deverão ser instalados nos furos das sondagens ou em nova perfuração deslocada no máximo 1,0 metro da sondagem, que deverá ser por lavagem e sem recuperação de amostra. Para o piezômetro do tipo B, mais raso, uma nova perfuração deverá ser executada deslocada no máximo 1,0 metro da primeira, também por lavagem e sem recuperação de amostra.

Para esses serviços, devem ser seguidas as especificações indicadas pelo proprietário da obra. Deverá ser utilizado tubo de PVC reforçado, de 1" de diâmetro, com trecho de 0,50m de tubo fechado, na parte inferior, seguido por trecho ranhurado com comprimento ajustado à camada de areia e mínimo de 1,00 metro, envolto com tela filtrante de #0,6mm.



Espaçadores deverão ser colocados para garantir a verticalidade do mesmo. Após o posicionamento do piezômetro, o furo deverá ser preenchido, até pouco acima do nível do tubo ranhurado, com material filtrante constituído de areia grossa, seguindo-se logo acima desse material filtrante uma camada de 0,50m de areia fina. O material filtrante deverá ser constituído por areia com granulometria entre 1,0 e 3,0 mm, lavada, limpa, tipo pérola Jacareí. Acima do filtro deverá ser colocada uma camada de bentonita peletizada de 2,0m de espessura. O restante do furo, até a superfície, deverá ser preenchido por calda de solo cimento, imediatamente após a colocação da bentonita.

Tabela 4 – Programa de instalação de Piezômetros

Piezômetro	Sondagem de referência	Coordenadas Piezômetro		Profundidade do bulbo perfurado (m)		Unidade Geológica
		N	E	Topo	Base	
PZ-30A	SP-30	XX6.079,68	XX4.916,85	17	18,5	4Ar1
PZ-30B				10	12	4Ar2
PZ-21A	SM-21	XX6.212,86	XX4.984,81	15,5	17,5	4Ar1/SA
PZ-21B				14,5	12,5	4Ar1
PZ-28A	SP-28	XX6.286,00	XX5.004,50	16,0	17,0	4Ar1
PZ-28B				8,0	10,0	4Ar1
PZ-33A	SP-33	XX6.124,82	XX4.919,02	19,8	21,8	4Ar1
PZ-33B				11,3	13,3	4Ar2

5.3. Classificação das Sondagens

A classificação de sondagens deve ser realizada de forma a permitir a apresentação dos dados de maneira uniforme, sintetizados em perfis individuais de sondagem. Neste trabalho realizou-se a classificação tátil-visual, para as amostras de solo, e classificação para os testemunhos de rocha recuperados em sondagem rotativa.

É apresentado no Anexo 1, a título de ilustração, o perfil de sondagem da SM-14. Compõem este perfil basicamente a classificação sucinta das amostras de solo e dos testemunhos de rocha, considerando as diversas unidades geológico-geotécnicas, os índices SPT para trechos em solo, os parâmetros de classificação dos testemunhos de rocha, posição de revestimento da sondagem e as leituras dos níveis d'água.

5.3.1. Classificação de solos

Foi realizada a classificação tátil-visual para as amostras de solo coletadas, a cada metro, em todas as sondagens executadas. Esta identificação tátil-visual é na realidade uma estimação, baseada na sensação ao manuseio do solo, destacando as propriedades do solo como textura, cor e estrutura. Segundo Pinto (2006), cada profissional desenvolve sua



própria habilidade para identificar solos e esta experiência só vem através do confronto com os resultados de laboratório. A classificação de uma sondagem a percussão deve apresentar a caracterização do material perfurado, definindo-se as unidades geológico-geotécnicas e as respectivas características, considerando os diferentes tipos de solos transportados (aterros, aluviões, colúvios) e provenientes da atuação dos processos intempéricos "in situ" (Vaz, 1996).

Para a classificação dessas amostras seguiu-se a metodologia fixada na NBR-6484 (2001). As amostras foram examinadas individualmente e ordenadas pela profundidade. Basicamente determinou-se as granulometrias predominantes (no mínimo duas: principal e secundária), as cores, quando da presença de pedregulhos, cascalhos, concreções, detritos, matéria orgânica, entre outros, o tipo de solo e sua origem geológica. Amostras semelhantes e consecutivas foram agrupadas na mesma unidade.

A determinação tátil-visual das granulometrias predominantes baseia-se na separação das frações solo em:

**Argila e silte:** grãos inferiores a 0,1 mm (invisíveis a olho nu). As argilas se distinguem pela maior plasticidade e coesão, principalmente quando úmidas.

**Areia fina:** grãos da ordem de 0,2 mm.

**Areia média:** grãos da ordem de 0,5 mm.

**Areia grossa:** grãos da ordem de 1,0 mm.

**Pedregulhos:** grãos maiores que 2 mm.

Procurou-se adequar as descrições das amostras às unidades geológico-geotécnicas em uso pelo proprietário da obra para a Bacia Sedimentar de São Paulo (Tabela 5), com o intuito de agrupar as unidades descritivas semelhantes.



**Tabela 5 – Unidades geológico-geotécnicas em uso pelo Metrô de São Paulo.**

<b>1. Aterros</b>		
Depósitos de composição granulométrica variada e de materiais diversos.		
<b>2. Depósitos aluvionares</b>		
Unidades argilosas	2Ag <sub>0</sub>	Argila orgânica, muito mole, preta.
	2Ag <sub>1</sub>	Argila siltosa com matéria orgânica disseminada, plástica, muito mole, cinza e marrom.
	2Ag <sub>2</sub>	Argila arenosa (areia fina), com matéria orgânica, muito mole a média, marrom e cinza.
	2Ag <sub>3</sub>	Argila silto-arenosa, com pedregulhos e matéria orgânica, mole, cinza e marrom.
Unidades arenosas	2Ar <sub>1</sub>	Areia fina e média argilosa, pouco plástica, fofa, marrom e cinza.
	2Ar <sub>2</sub>	Areia média e grossa, pouco argilosa, fofa, cinza.
	2Ar <sub>3</sub>	Areia média e grossa, argilosa, com pedregulhos, fofa a medianamente compacta, cinza e marrom.
<b>3. Formação São Paulo</b>		
Unidades argilosas	3Ag <sub>p1</sub>	Argila siltosa pouco arenosa, porosa, mole a média, vermelha e amarela.
	3Ag <sub>p2</sub>	Argila siltosa pouco arenosa, porosa, média a rija, vermelha.
	3Ag <sub>1</sub>	Argila siltosa poucoa arenosa, rija a dura, variegada (amarela, cinza e vermelha).
	3Ag <sub>2</sub>	Argila arenosa pouco siltosa, média a dura, variegada (amarela, cinza e vermelha).
Unidades arenosas	3Ar <sub>1</sub>	Areia fina a média argilosa, medianamente compacta a compacta, amarela e vermelha.
	3Ar <sub>2</sub>	Areia de granulação variada argilosa, com pedregulhos finos e médios, med. compacta a compacta.
<b>4. Formação Resende</b>		
Unidades argilosas	4Ag <sub>1</sub>	Argila siltosa, pouco arenosa (areia fina e média), cinza esverdeada, rija a dura.
	4Ag <sub>2</sub>	Argila arenosa (areia fina e média), pouco micácea, cinza, rija a dura.
	4Ag <sub>3</sub>	Argila arenosa, pouco siltosa, com pedregulhos variados, cinza e marrom, rija a dura.
Unidades arenosas	4Ar <sub>1</sub>	Areia fina e média, argilosa, pouco siltosa, pouco micácea, cinza e amarela, pouco compacta a comp.
	4Ar <sub>2</sub>	Areia média e grossa, pouco siltosa, cinza e amarela, medianamente compacta a muito compacta.
	4Ar <sub>3</sub>	Areia média e grossa, pouco siltosa, com pedregulhos, cinza e amarela, méd. a muito compacta.

### 5.3.2. Classificação de rocha

A classificação dos testemunhos de rocha recuperados nas sondagens rotativas procurou detalhar os seguintes aspectos:

- Tipo litológico e caracterização petrográfica;
- Grau de alteração;
- Grau de fraturamento;
- Grau de coerência;
- Características e orientações das descontinuidades;
- RQD (Rock Quality Designation).

A Tabela 6 relaciona os parâmetros descritivos para a classificação de sondagens rotativas com suas respectivas legendas, em uso pela Themag (1999).

Primeiramente, é quantificada a recuperação da sondagem que se refere a porcentagem de material recuperado no barrilete em determinada manobra. A perda de material pode ocorrer pela presença de material alterado e pouco coeso ou mesmo pela má execução da sondagem. Portanto, quando ocorre uma baixa recuperação, mesmo que no



barrilete tenham sido recuperados fragmentos de rocha sã ou pouco alterada, tende-se a classificar o trecho como unidades mais alteradas.

O grau de alteração para fins de Engenharia considera prioritariamente o conjunto de modificações físico-químicas a que as rochas estão submetidas em virtude do intemperismo, que conduzem a degradação de suas características mecânicas (Serra Junior e Ojima, 1998). Com base na resistência do maciço à escavação e à perfuração, Vaz (1996) definiu as classes de rocha sã (R1), rocha alterada dura (R2), rocha alterada mole (R3), solo de alteração (S2) e solo eluvial (S1). A correlação dessas classes com as respectivas condições de escavação e perfuração estão apresentadas na Tabela 7. O grau de alteração também condiciona a coerência do maciço, que é caracterizada através da apreciação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâminas de aço (Guidicini *et al* 1972 *apud* Serra Junior & Ojima *op. cit*).

Na caracterização litológica são identificadas tátil-visualmente feições como granulação, estruturas, textura, cor e composição mineral. De acordo com Serra Junior & Ojima (1998), uma classificação litológica ou petrográfica para aplicação em engenharia, deve ser simplificada e objetiva, evitando-se nomenclaturas complexas. A caracterização litológica é de fundamental importância devido às particulares relações entre litologias e características do meio rochoso que condicionam o seu comportamento quando aproveitado em obras de engenharia. Seguiu-se a nomenclatura em uso pela Themag Engenharia, para os tipos litológicos do embasamento da Bacia de São Paulo:

- **Gr** – gnaiss granítico.
- **Gb** – gnaiss biotítico.
- **Pg** – pegmatito.
- **Bi** – zonas essencialmente constituídas por biotita.
- **Zx** – zonas cisalhadas, constituídas por milonitos e cataclasitos.

Com base em ensaios com testemunhos de rocha amostrados das sondagens executadas na região do Butantã-Vila Sonia, apresentados pelo IPT (1997), e nas reduções de resistência esperadas para os diferentes graus de alteração, Themag (2004) adotou os seguintes valores de resistência à compressão uniaxial (RCU) para os litotipos acima citados (Tabela 6):

**Tabela 6** – Valores de RCU adotados em classificação geomecânica (Themag, 2004)

Unidade	RCU (MPa)
R1-Gr	180
R2-Gr	100



R3-Gr	30
R1-Gb	150
R2-Gb	70
R3-Gb	30
R2/R3-Zx	40

O grau de fraturamento é expresso pela quantidade de fraturas, em trecho iso-fraturado, que interceptam o testemunho, expresso pela relação fraturas por metro. Neste quantitativo, não se consideram quebras mecânicas decorrentes da execução da sondagem. São denominadas as classes de fraturamento F1, F2, F3, F4 e F5, com grau de fraturamento em ordem crescente.

As descontinuidades são caracterizadas em relação às suas orientações, características de superfície e de preenchimento. Esta caracterização é de fundamental importância para a previsão de comportamento do maciço, uma vez que essas estruturas podem condicionar a alteração, deformabilidade, resistência e permeabilidade (Serra Junior & Ojima, 1998).

É utilizado também para a classificação dos testemunhos de rocha, o parâmetro RQD (*Rock Quality Designation*). Este parâmetro proposto para indicar a qualidade do maciço rochoso, baseia-se na soma dos testemunhos de rocha maiores que 10 cm em relação ao comprimento da manobra de avanço da perfuração. Quanto maior porcentagem de testemunhos maiores que 10 cm no trecho analisado, melhor a qualidade do maciço, conforme a Tabela 6. Entretanto, foi utilizado neste trabalho o IQR (Índice de Qualidade da Rocha), que consiste basicamente no mesmo critério do RQD, porém, ao invés da manobra, são considerados trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo (iso-fraturado) e o comprimento mínimo é de 0,5 m (Serra Junior & Ojima, 1998).

**Tabela 7** – Parâmetros para a classificação de sondagens rotativa. Adaptado de Vaz (1996); Themag (1999).

ALTERAÇÃO		
R1 RS	Rocha Sã	Sã ou praticamente sã. Alteração mineralógica nula ou incipiente. Cor original intacta. Escavável a fogo, perfuração com rotativa.
R2 RAD	Rocha Dura Alterada	Alteração mineralógica perceptível. Cores esmaecidas e pequenas transformações físico-químicas. Escavável a fogo, perfuração com rotativa.
R3 RAM	Rocha Mole Alterada	Alteração mineralógica acentuada. Cores parcialmente modificadas e intensas transformações físico-químicas. Escavável a picareta ou escarificador, perfuração com trépano e lavagem.
S2 SA	Solo de Alteração	Alteração mineralógica praticamente completa. Cores totalmente modificadas e transformações físico-químicas completas, exceto nos minerais resistentes. Escavável a enxadão, perfuração a percussão.



S1 SE	Solo Eluvial	Mineralogia constituída essencialmente por argilo-minerais. Ausência total da textura e das estruturas da rocha matriz. Processos pedológicos. Escavável a enxada, perfuração a percussão.			
COERÊNCIA					
C1	Coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo formando poucos fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente ou apenas levemente riscada por lâmina de aço. Características mecânicas elevadas.			
C2	Medianamente Coerente	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo em vários fragmentos com bordas que podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento. Características mecânicas boas.			
C3	Pouco Coerente	Quebra facilmente ao golpe do martelo, produzindo muitos fragmentos que podem ser partidos manualmente. A lâmina de aço produz sulcos profundos na superfície do fragmento. Características mecânicas baixas.			
C4	Incoerente	Esfarela ao golpe do martelo e desagrega sob a pressão dos dedos. Pode ser cortado por lâminas de aço. Friável. Características mecânicas muito baixas.			
FRATURAMENTO					
DENOMINAÇÃO			NÚMERO DE FRATURAS POR METRO		
F1	Muito pouco fraturada		0 a 1		
F2	Pouco fraturada		2 a 5		
F3	Medianamente fraturada		6 a 10		
F4	Muito fraturada		11 a 20		
F5	Extremamente fraturada		em fragmentos		
ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES					
H	Horizontal	Descontinuidades horizontais			
SH	Sub-Horizontal	Com mergulho de 0° a 20°			
I	Inclinada	Com mergulho de 20° a 70°			
SV	Sub-Vertical	Com mergulho de 70° a 90°			
TIPOS DE SUPERFÍCIE E PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES					
COM CONTATO ROCHA x ROCHA			SEM CONTATO ROCHA x ROCHA		
s1	Rugosa	Superfícies irregulares, os testemunhos se encaixam naturalmente (fratura travada)	PO		Descontinuidades com suspeita de preenchimento (os testemunhos não se encaixam)
s2	Estriada	Superfície com estrias, o deslizamento é mais fácil em uma direção	P1 (5)	Granular	Descontinuidades preenchidas por material granular incoerente (indicada espessura em mm)
s3	Plana	Superfícies planas, o deslizamento é fácil em qualquer direção	P2 (5)	Misto	Descontinuidades preenchidas por material granular e argiloso (indicada espessura em mm)
s4	Sedosa	Superfícies sedosas ou "talcosas" ao tato	P3 (5)	Argiloso	Descontinuidades preenchidas por material argiloso (indicada espessura em mm)

	Pox – película oxidada
	Pa – paredes alteradas
ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)	
PORCENTAGEM	QUALIDADE DA ROCHA
100 – 91	Excelente
90 – 76	Boa
75 – 51	Regular
50 – 26	Pobre
25 – 0	Muito Pobre

Para a definição das unidades geológico-geotécnicas referentes ao embasamento cristalino, foram utilizadas as classes de grau de alteração definidas por Vaz (1996), associadas ao tipo litológico e ao grau de fraturamento.



#### **5.4. Elaboração das Seções Geológico-Geotécnicas**

As seções foram elaboradas a partir das unidades geológico-geotécnicas definidas na classificação tátil-visual das amostras de solo e na classificação de rocha. São apresentados no Anexo 2, a legenda, a planta de localização e 5 seções geológico-geotécnicas, divididas em 3 desenhos, conforme se segue:

- Seção longitudinal pelo eixo de via.
- Seções transversais C e D.
- Seções transversais E e F.

Estas seções foram desenhadas em escala horizontal 1:500 e vertical 1:200, e estão impressas nas escalas 1:1000 e 1:400, horizontal e vertical respectivamente. Esta sobrelevação de 2,5 não deforma, de maneira relevante, a estratigrafia das unidades, uma vez que estas tendem a camadas horizontais na Bacia Sedimentar de São Paulo.

As seções apresentam, além da estratigrafia e da delimitação das unidades geológico-geotécnicas, a representação das sondagens, os índices de SPT, os níveis d'água e, nos trechos de rocha, o tipo litológico, o grau de alteração e o grau de fraturamento.

### **6. DESENVOLVIMENTO**

O presente trabalho teve início no mês de janeiro com a pesquisa bibliográfica, que buscou reunir informações relevantes sobre a geologia regional da Bacia Sedimentar de São Paulo e também um breve relato de alguns trabalhos realizados anteriormente. Foram utilizadas para tal, principalmente informações de artigos, simpósios e teses disponíveis.

Toda a primeira etapa de investigações foi concluída no começo do mês de julho com a execução das sondagens referentes ao programa inicial, a classificação tátil-visual dessas amostras, a elaboração de seções geológico-geotécnicas preliminares, a caracterização preliminar das unidades e a elaboração do programa de investigação complementar.

Com o atraso na execução das sondagens referentes ao programa complementar, não foi possível apresentar estes dados no Relatório de Progresso entregue na segunda semana do mês de agosto, conforme estabelecido no Cronograma de atividades apresentado no Projeto Inicial. A execução dessas sondagens teve término na última semana do mês de setembro. Como a classificação das amostras foi feita quase que simultaneamente ao



término das sondagens, levou-se apenas mais uma semana (início de outubro) para sua realização. A instalação de piezômetros, que também constava no programa complementar de investigações não pode ser concluída a tempo de entrega deste trabalho.

Os ajustes e a inserção das novas informações de sondagem nas seções geológico-geotécnicas foram sendo realizados logo após a classificação de cada sondagem, tendo sido finalizados na primeira semana de outubro.

A partir das informações obtidas na classificação das sondagens e nas seções geológico-geotécnicas, juntamente com dados encontrados na pesquisa bibliográfica, foram elaborados a caracterização geológico-geotécnica e os aspectos hidrogeológicos do subsolo estudado. Isto tornou possível a discussão sobre as condições de escavação para os poços e túneis.



**Tabela 8 – Cronograma de atividades realizadas**

Atividades	Meses de 2008											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Levantamento e revisão bibliográfica												
Elaboração do projeto inicial												
Classificação das sondagens do programa inicial												
Elaboração das seções geológico-geotécnicas preliminares												
Programa complementar de investigações												
Elaboração do relatório de progresso												
Classificação das sondagens do programa complementar												
Complementação das seções												
Resultados e conclusões												
Elaboração da monografia												
Apresentação pública												

## 7. CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

As seguintes unidades geológico-geotécnicas foram observadas na área estudada: aterros, aluviões, sedimentos terciários da Formação Resende e unidades pertencentes ao embasamento cristalino: solo de alteração (SA ou S2), rocha alterada mole (R3), rocha alterada dura (R2) e rocha sã (R1). A classificação efetuada está de acordo com a nomenclatura e com os critérios da Tabela 5 para as unidades da Bacia de São Paulo e da Tabela 6 para as unidades do embasamento pré-cambriano. Para os parâmetros geotécnicos dos sedimentos terciários, pode-se considerar inicialmente, os citados anteriormente no item 4.3, já que até o momento não foram realizados ensaios para o projeto em questão.

### 7.1. Aterro

Os depósitos de aterro abrangem toda a superfície do terreno, que se desenvolve entre as elevações 734 e 744 m. As maiores profundidades são encontradas desde o início do trecho até o km 30.575 onde atingem até 6,0 m, coincidindo com área de depósitos aluvionares. Já na porção norte, as profundidades são da ordem de 0,6 a 3 m. Em geral



possuem composição granulométrica variada, entretanto, os aterros localizados na porção sul da área investigada foram predominantemente efetuados com material dos depósitos aluvionares e terciários.

## **7.2. Depósitos Aluvionares**

Os depósitos aluvionares ocorrem na porção sul da área investigada, desde o início do trecho até os limites do Poço Sul e Poço Norte. Predominam as unidades argilosas 2Ag<sub>0</sub>, 2Ag<sub>1</sub> e 2Ag<sub>2</sub>, sendo que as unidades arenosas, 2Ar<sub>1</sub> e 2Ar<sub>2</sub> apresentam-se com espessuras pequenas, variáveis entre 0,25 a 1,0m. As maiores profundidades e espessuras encontram-se na região do Poço Sul, como indicado pela sondagem SP-03 que atingiu 12,30 m nestes depósitos. Pode-se presumir nesta região, baseado no contorno das camadas nas seções geológico-geotécnicas, a presença de um meandro abandonado, uma vez que os depósitos no entorno do atual canal do Córrego da Moóca, hoje canalizado sob a Avenida Principal, não ultrapassam profundidades da ordem de 9,30 m como indicado pela sondagem SP-01. No Anexo 3 é apresentado o contorno estrutural da base destes depósitos, baseado nas profundidades indicadas pelas sondagens, que ilustra os locais com maiores espessuras na região estudada.

Os ensaios SPT mostraram valores menores ou iguais a 2 golpes para a penetração de 30,0 cm do amostrador, classificando as unidades argilosas como muito moles. Em algumas sondagens, apenas com o peso da composição de ensaio, houve penetração de até 66 cm nessas unidades argilosas. No caso das unidades arenosas, os valores de SPT apresentaram-se menores ou iguais a 4, classificando as areias como fofas.

## **7.3. Sedimentos Terciários**

Os sedimentos da Formação São Paulo não estão presentes na área, sendo que os sedimentos terciários são representados apenas pela Formação Resende. Ocorrem até profundidades entre 7,50m e maiores que 30,30m, nesse caso como indicado pela sondagem SP-01, paralisada antes de atravessar o contato dos sedimentos terciários com o solo de alteração. O contato com o solo de alteração do embasamento cristalino, quando atravessado pelas sondagens, desenvolve-se entre cotas 706,6 a 727,3 m.

### **7.3.1. Unidades argilosas**

Foram identificadas as unidades argilosas denominadas 4Ag1, 4Ag2 e 4Ag3, sendo que as camadas de 4Ag1 são mais espessas e extensas. Predominam as cores cinza-



esverdeado ("taguá") e cinza e marrom, por vezes com tons amarelados, em função da presença de areia. Acima da cota 730 m, predominam cores avermelhadas a roxas, possivelmente em função da maior exposição à alteração intempérica ou mesmo à proximidade do contato com a Formação São Paulo. Apresentam concreções ferruginosas, que devem corresponder a níveis limonitizados e com cimentação por compostos de ferro. No contato com o solo de alteração do embasamento cristalino ocorrem predominantemente argilas arenosas com fragmentos milimétricos a centimétricos de feldspato.

Os valores obtidos nos ensaios de SPT conferem às unidades argilosas consistências desde média até dura. Na porção sul do trecho, até as proximidades da seção D, as argilas adquirem consistência dura por volta profundidade de 10 m (cota 724). A partir desta seção, seguindo para norte no trecho, as argilas adquirem a consistência dura já a partir de 5 m de profundidade.

### **7.3.2. Unidades arenosas**

Foram identificadas as unidades arenosas 4Ar<sub>1</sub>, 4Ar<sub>2</sub> e 4Ar<sub>3</sub>. A proporção de finos nessas unidades é bastante variável e sem localizações preferenciais. Algumas camadas possuem maior extensão e continuidade, como as localizadas entre as cotas 719 m e 723 m, e entre 710 m e 720 m. Predominam as unidades de 4Ar<sub>1</sub>, siltosas a pouco argilosas, de cor cinza, por vezes com tons amarelados e amarronzados, em virtude da presença de concreções ferruginosas. Assim como as argilas, aproximadamente acima da cota 730, as unidades arenosas possuem cores avermelhadas, amareladas ou amarronzadas. Os valores obtidos nos ensaios de SPT conferem às unidades arenosas, compacidade desde medianamente compacta até compacta.

## **7.4. Embasamento Cristalino**

As unidades referentes ao embasamento cristalino encontram-se na área investigada sempre abaixo da cota 727 m, a partir do solo de alteração. O topo rochoso ocorre como um "alto" do km 30.580 ao km 30.640, abaixo da cota 718 m, onde será interceptado pela base de escavação do poço norte e do túnel de estação.

### **7.4.1. Solo de alteração**

Os solos de alteração (SA ou S2), produtos da alteração de gnaisses, são constituídos por silte arenoso (areia fina a média) e areia fina e média siltosa ou argilosa, compactos e predominantemente muito compactos, com porções silto-argilosas ou argilo-siltosas pouco



arenosas, duras, pouco micáceos e micáceos, freqüentemente com fragmentos de rocha, e cores cinza, cinza esverdeado e cinza esbranquiçado e amarelado.

#### **7.4.2. Maciço rochoso**

O maciço rochoso é constituído predominantemente por gnaisses graníticos (Gr) de granulação fina a grossa, coloração cinza e cinza-esbranquiçado, com porções de gnaiss biotítico (Gb) cinza-escuro, e pegmatito (Pg) cinza-esbranquiçado a róseo. A foliação, inclinada em relação aos testemunhos de rocha, varia de 30° a 70°. As fraturas variam de inclinadas (paralelas à foliação) a sub-horizontais, predominando as fraturas com superfícies oxidadas, tanto lisas como rugosas, e sem preenchimento.

Compartimentou-se este maciço rochoso com base no perfil de intemperismo elaborado por Vaz (1996):

- R3/S2 ou S2/R3: rocha alterada mole e/ou solo de alteração com pequenos trechos de rocha alterada dura.
- R3/R2: Rocha alterada mole com intercalações de rocha alterada dura e eventualmente pequenos trechos de solo de alteração.
- R2/R3: Rocha alterada dura com intercalações de rocha alterada mole e, eventualmente, pequenos trechos de solo de alteração.
- R1/R2 ou R2/R1: Rocha sã e/ou rocha alterada dura.

Predominam na área os gnaisses R3/S2 e R3/R2. Os gnaisses R1/R2 ou R2/R1 foram observados apenas na sondagem SM-21. Acredita-se que alteração do maciço ocorra principalmente através da foliação, devido à presença de termos biotíticos mais alterados, ocasionando porções de solo e rocha mole abaixo de regiões de rocha alterada dura ou sã. Para comprovação torna-se necessária a execução de sondagens orientadas para a obtenção desta foliação ou a execução de mapeamento geológico-geotécnico durante as escavações dos túneis. A delimitação deste maciço rochoso no trecho estudado foi prejudicada pela falta de informações na região da concessionária de automóveis, onde não foi possível a execução de sondagens, portanto sua extensão pode ser maior ou menor do que indicado na seção.

No Anexo 3 é apresentado um contorno estrutural de topo de rocha alterada dura e rocha sã, baseado nas profundidades obtidas nas sondagens que perfuraram estas rochas, SM-05, SM-14, SM-21 e SM-36. O contorno mostra que as curvas de nível deste topo de rocha dura seguem aproximadamente a mesma direção da foliação regional do embasamento cristalino da Bacia de São Paulo, ou seja, N70E.



## 8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

As investigações efetuadas mostram a existência de no mínimo dois níveis d'água estabilizados. O primeiro, referente ao lençol freático, situa-se por volta de 1,0 a 4,0 m de profundidade e possui fluxo em direção ao córrego canalizado abaixo da Avenida Principal. Outros níveis encontram-se por volta de 8,0 a 13,0 m de profundidade e são correspondentes ao nível piezométrico das areias confinadas pelas argilas dos sedimentos terciários e contato destes com os solos de alteração de gnaisses.

Nessas condições, parte do aterro e todo o pacote aluvionar apresentam-se saturados. Os níveis arenosos dos sedimentos terciários constituem aquíferos confinados por sedimentos argilosos e as suas respectivas cargas hidráulicas são menores que aquelas do lençol freático. As descontinuidades do maciço rochoso, embora não investigadas, certamente constituem um sistema aquífero cristalino.

A permeabilidade dos níveis arenosos confinados é bastante variada em função da porcentagem de finos e de heterogeneidades texturais, verificadas na classificação tátil-visual das amostras de solo. A Themag (2001) apresentou uma delimitação de pacotes sedimentares da Bacia de São Paulo que apresentam comportamento homogêneo quanto às suas características de permeabilidade. Esta delimitação constitui uma estimativa da ordem de grandeza do comportamento relativo de permeabilidade entre os pacotes sedimentares. A Tabela 9 apresenta os valores de permeabilidade para as diferentes unidades geológico-geotécnicas e que, inicialmente, podem ser admitidas para as unidades deste projeto.

**Tabela 9** – Valores de permeabilidade (K) adotados para as unidades geológico-geotécnicas. Adaptado de Themag (2001).

Unidades geológico-geotécnicas	Permeabilidade - K(m/s)
Areia média a grossa pouca argilosa	$10^{-5}$
Areia fina e média pouco argilosa	$10^{-6}$
Areia argilosa	$10^{-6}$ a $10^{-7}$
Argila arenosa	$10^{-7}$ a $10^{-8}$
Argila pouco arenosa	$10^{-8}$ a impermeável
Argila siltosa	impermeável

Com base em testes de bombeamento no trecho Incor / Faria Lima da Linha Amarela do Metrô, Themag (2001) adotou para as unidades 4Ar<sub>1</sub> e 4Ar<sub>3</sub>, areias da Formação Resende, respectivamente os valores de  $5$  a  $9 \times 10^{-5}$  m/s e  $9 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-4}$  m/s, enquanto



para a unidade 4Ar<sub>2</sub>, adotou o valor  $2 \times 10^{-4}$  a  $10^{-6}$  m/s, com base na correlação  $k(\text{cm/s}) = 100 \times D_{10}^2 (\text{cm})$ .

Atenta-se para a necessidade da instalação dos piezômetros programados, onde a verificação das cargas hidráulicas e a realização de ensaios de recuperação, permitirão a obtenção dos valores de coeficientes de permeabilidade e condutividades hidráulicas específicos para as unidades geológico-geotécnicas deste projeto.

## 9. CONDICIONANTES DE ESCAVAÇÃO

Condicionantes de escavação referem-se ao grau de facilidade ou dificuldade para as operações de escavação e suporte em um maciço geológico. Os condicionantes geológico-geotécnicos, quando não previstos, são capazes de afetar a segurança e a velocidade de avanço de uma escavação, provocando instabilizações durante essa operação.

Themag (2001), a partir da experiência adquirida nos projetos e escavações para a construção das linhas do Metrô de São Paulo, realizou um zoneamento dos pacotes sedimentares quanto às suas características de estabilidade (Tabela 10).

**Tabela 10** – Zoneamento dos pacotes sedimentares quanto às suas características de estabilidade. Adaptado de Themag (2001).

	Estabilidade
Areias, areias média e grossa pouco argilosa	Ruim
Areias média/fina e média pouco argilosa	Ruim a mediana
Areia argilosa e argila arenosa	Mediana a boa
Argila pouco arenosa e argila	Boa

As escavações dos túneis se darão sempre nas unidades terciárias ou na sua interface com o embasamento cristalino (solo de alteração e maciço rochoso). Para os poços de estação, serão escavadas praticamente todas as unidades: aterro, depósitos aluvionares, unidades argilosas e arenosas da Formação Resende, e solos de alteração e maciço rochoso do embasamento cristalino.

Um dos principais condicionantes para as escavações é o comportamento das unidades arenosas saturadas da Formação Resende, sob condições de diferentes cargas hidráulicas devido ao confinamento propiciado pelas unidades argilosas. Essas unidades quando escavadas podem ocasionar uma série de instabilidades como fluxos de água descontrolados, carreamento de material e *piping*.



Rocha & Celestino (1992) citam como exemplo dos problemas decorridos da presença de unidades arenosas da Formação Resende na frente de escavação, a construção do túnel Zuquim, extensão norte da linha Norte-Sul do Metrô. Uma camada de areia fina a média esteve em posições variadas na frente de escavação, ao longo de cerca de 350 m de extensão. Mesmo com a utilização de drenos horizontais profundos (DHP's) na frente de escavação, os gradientes de saída de água eram elevados logo acima do contato inferior da areia. Foi utilizada então uma bomba de vácuo conectada aos drenos, o que melhorou as condições de escavação.

Já as unidades argilosas terciárias, têm-se mostrado bastante competentes para a escavação de túneis (Rocha & Celestino, 1992). Os problemas relatados se referem em sua maioria à presença de fraturas no maciço, o que propicia por vezes o desprendimento de blocos junto à frente de escavação. Essas fraturas são decorrentes de movimentações tectônicas, conforme observado por Cozzolino *et al* (1994), ou pelo alívio de tensões provocado pelas escavações do túnel, que ocorre predominantemente pela deficiência de suporte na frente de escavação.

Martinati (1999), apresenta os casos típicos de escavação ao longo da construção do túnel da Eletropaulo, já citado em Cozzolino *et al* (1994). Nas frentes de escavação onde se encontrou interfaces entre camadas argilosas e arenosas, ocorreram problemas para a contenção de fluxos descontrolados de água e carreamento de material nos contatos das unidades. Como o sistema de rebaixamento externo foi insuficiente, utilizou-se como alternativas um intenso sistema de drenagem interna a vácuo, compostos por DHP's e poços de alívio, e também consolidação localizada, com estabilidade e vedação.

A seguir são apresentados os condicionantes de escavação para cada trecho deste projeto, juntamente com sugestões de suporte e/ou tratamento para as regiões a serem escavadas.

### **9.1. Poços de Estação**

Para a implantação dos poços para estação, estão previstas escavações até a cota 710m, em geral com ocorrência de aterros, depósitos aluvionares, sedimentos terciários, solos de alteração e rochas alteradas moles de gnaisses. No entanto, na região do Poço Norte, os aterros possuem menor espessura, bem como os depósitos aluvionares, encontrados apenas nos limites com o Poço Sul. Além disso, as escavações para este poço também interceptarão o maciço rochoso, R2/R3 com porções de R3/S2, a partir da cota 714m.



Deve-se considerar para as escavações, tratamentos e métodos construtivos, principalmente o comportamento do aterro, das argilas moles e areias fofas saturadas do aluvião, das unidades arenosas saturadas da Formação Resende, e também a presença de rocha alterada dura no Poço Norte.

Os principais aspectos referentes aos aterros e aluviões são as baixas resistências e a elevada deformabilidade. A drenagem das águas subterrâneas propiciada pelas escavações e por eventuais poços de rebaixamento, poderá ocasionar recalques nas regiões de aluvião, devido à presença principalmente de argilas moles, sujeitas aos processos de adensamento, e de areias, sujeitas a processos de compactação.

No caso das escavações dos poços em sedimentos terciários, podem ocorrer processos de instabilização, de desestruturação e carreamento de materiais arenosos, além de grandes vazões, causados pela condição saturada e confinada das unidades arenosas. A utilização de poços de rebaixamento no entorno dos poços para a drenagem dos aquíferos confinados, de paredes diafragmas para impermeabilização e o uso de concreto projetado para revestimento das paredes, podem minimizar estes problemas e permitir as escavações com maior segurança.

Embora as porções de solo de alteração e rocha alterada mole, S2/R3 e R3/S2, sejam facilmente escavadas com o uso de picaretas e escavadeiras, atenta-se a necessidade de escavação a fogo nas porções de R2/R3 na região da base do Poço Norte.

## 9.2. Túneis de Estação

As escavações para os túneis de Estação, a partir do emboque no Poço Norte, interceptarão o contato dos sedimentos terciários com os solos de alteração ao longo de todo o trecho, e também o maciço rochoso composto por R1/R2 e R2/R3 com passagens de S2/R3 na região da base.

Um importante condicionante será a presença de unidades arenosas  $4Ar_1$  e, principalmente,  $4Ar_2$ , situadas no teto do túnel ao longo de todo o trecho. Essas unidades, com pouca porcentagem de finos e saturadas, poderão resultar em diversas instabilidades na frente de escavação, como *pipings*, fluxos descontrolados, carreamentos e até mesmo desmoronamentos. A superfície de contato dos sedimentos terciários com os solos de alteração, também pode representar caminhos de percolação da água subterrânea, influenciando na presença de fluxos.

Para a minimização destes problemas, pode-se utilizar o *jet grouting* para a consolidação das areias no teto, ou mesmo concreto projetado, usado como revestimento primário. Os fluxos de água podem ser controlados com o uso de DHP's conectados a



bombas de vácuo e/ou poços de rebaixamento, conforme relatado por Rocha & Celestino (1992) e Martinati (1999).

As frentes de escavação com presença de maciço rochoso R1/R2 e R2/R3 juntamente com solos, implicarão em métodos de escavação diferenciados, já que para os solos utiliza-se apenas escavadeiras, e para rocha sã e rocha alterada dura haverá a necessidade de utilização de explosivos. Conforme dito no item 7.4.2., a delimitação deste maciço rochoso foi prejudicada pela falta de informações na região da concessionária de automóveis, portanto não se pode precisar a extensão a ser escavada.

### **9.3. Túneis de Via Sul**

Os túneis singelos que se iniciarão na estação e se desenvolverão no rumo sul, interceptarão apenas as unidades da Formação Resende. Os tetos dos túneis estarão em uma camada argilosa (4Ag<sub>1</sub>) impermeável, entretanto de pequena cobertura, situada logo abaixo de uma camada de areia (4Ar<sub>1</sub>), colaborando para a ocorrência de processos de instabilização. Outro condicionante fundamental para a estabilidade dos túneis é a posição do contato do aluvião com os sedimentos terciários, que se desenvolve muito próximo do teto do túnel. A aplicação de *jet grouting*, a partir da superfície, para a consolidação das areias e o uso de concreto projetado associado à cambota como revestimento primário, assim como para os túneis de estação, podem facilitar as operações de escavação. Para o controle dos fluxos de água e carreamentos na frente de escavação, gerados pela interceptação da camada de 4Ar<sub>1</sub>, podem ser usados os DHP's conectados a bombas de vácuo ou poços de rebaixamento a partir da superfície.

Da mesma forma que no caso dos poços de estação, a drenagem das águas subterrâneas propiciada pelas escavações e por possíveis sistemas de rebaixamento necessários, poderá apresentar como consequência recalques na região dos aluviões, caracterizados principalmente por argilas moles, sujeitas aos processos de adensamento, afetando principalmente a Avenida Principal, localizada acima dessa região.

### **9.4. Túneis de Via Norte**

Os túneis de via que terão início a partir dos túneis estação e seguirão rumo norte, estarão em região onde a superfície do terreno situa-se em cotas elevadas, e apresentarão uma cobertura de sedimentos terciários da Formação Resende da ordem de 20 m. Este trecho irá interceptar as unidades arenosas e argilosas da Formação Resende e o solo de alteração do embasamento cristalino. Pacotes arenosos (4Ar<sub>1</sub> e 4Ar<sub>3</sub>) que se desenvolvem



junto ao teto do túnel do teto serão os principais condicionantes para a escavação, com possibilidades de aporte de água para o túnel e processos de instabilização. O contato entre os sedimentos terciários e o solo de alteração a ser interceptado pelas escavações do km 30,675 ao km 30,760, também poderá condicionar aportes significativos de água para os túneis. Sugere-se o mesmo tipo de tratamento usado anteriormente: uso de *jet grouting* nas regiões do teto com presença de camadas arenosas, aplicação da cambota juntamente com concreto projetado para revestimento primário, poços de rebaixamento a partir da superfície e DHP's nas frentes de escavação.

### **9.5. Poço de Acesso e Túnel de Ligação**

O Poço de acesso atravessará as unidades arenosas e argilosas da Formação Resende e, a partir da cota 721 m, solos de alteração de gnaisses, possivelmente com presença de rocha alterada mole (R3). Já o túnel de ligação, terá presença de 4Ar1 no teto e interceptará o contato dos sedimentos terciários com o solo de alteração. Não foi possível investigar a parte final deste túnel em função da não execução da sondagem SP-31.

O principal condicionante para as escavações do poço de acesso será as unidades arenosas terciárias saturadas. A utilização de um sistema de rebaixamento neste caso não trará grandes problemas, uma vez que nesta região só ocorrem argilas terciárias adensadas, com mínimas possibilidades de recalques.

A presença de areia na região do teto do túnel de ligação, requer cuidados conforme observado para os outros trechos, assim como a interceptação do contato dos solos terciários com o solo de alteração.

## **10. CONCLUSÕES**

A partir dos trabalhos de investigação realizados, a elaboração das seções e a caracterização das unidades geológico-geotécnicas, foi possível identificar os condicionantes para as operações de escavação dos túneis e poços programados na região de estudo. Com base neste conhecimento, é possível antecipar a escolha dos melhores métodos para intervenção no maciço, os locais a serem instrumentados e os tipos de instrumentos a serem utilizados.

Dentre os principais condicionantes para as escavações, destaca-se as unidades arenosas saturadas da Formação Resende, com diferentes cargas hidráulicas e confinadas



pelas unidades argilosas também terciárias. Será na interceptação dessas unidades que deverão ocorrer os principais problemas de instabilidade, como carreamentos de material, *pipings*, fluxos descontrolados de água, entre outros.

Este trabalho também mostrou a dificuldade encontrada para a realização de investigações geológico-geotécnicas visando a implantação de obras subterrâneas em áreas densamente urbanizadas, onde não é possível a utilização de mapeamento geológico superficial e fotointerpretação e os levantamentos geofísicos são prejudicados em virtude de interferências. Mesmo uma campanha de sondagens é prejudicada em função da impossibilidade de realização de sondagens em locais onde se situam residências, comércio e outros, a exemplo das sondagens SM-22, SM-24 e SM-31, deixando locais sem investigação alguma.

Embora exista amplo conhecimento sobre as propriedades geológicas e geotécnicas das unidades que compõem a Bacia de São Paulo e seu embasamento, e estes dados, a princípio, possam ser correlacionados às unidades deste projeto, deve-se prosseguir com as investigações, conforme sugerido anteriormente, com a instalação dos piezômetros programados e a realização de ensaios com as amostras de solo em laboratório, para a determinação dos parâmetros geotécnicos específicos para este projeto. Durante a implantação da obra, deverão ser realizados trabalhos de mapeamento geológico-geotécnico das frentes de escavação e acompanhamento da instrumentação.



## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia). 1999. Manual de Sondagens. Boletim nº 3, 4ª edição. São Paulo. 73 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2001. NBR-6484 – Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos. 17 p.

COUTINHO, J.M.V. 1980. Carta geológica da região metropolitana da Grande São Paulo, 1:100.000. São Paulo, EMPLASA, 2 folhas.

COZZOLINO, V.; MARTINATI, L.R.; BUONO, A.V.D. 1994. Contribuição ao estudo dos movimentos tectônicos sin e pós-sedimentares na Bacia de São Paulo a partir de evidências observadas nas escavações do túnel da Eletropaulo. *Solos e Rochas - Revista Brasileira de Geotecnia*, v. 17(1): 13-29.

DETRAN: Banco de dados 2008. Disponível em: <http://www.detran.sp.gov.br>. Acesso em 04 mar 2008.

EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO (EMPLASA). 1980. Mapa Geológico da Grande de São Paulo. São Paulo, 2 folhas. Escala 1:100.000.

FRANCIS, F.O.; ROCHA, H.C. 1998. Obras subterrâneas civis. In: Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A ed. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE. p.439-456.

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

IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.). 1997. Caracterização Geomecânica do Maciço Rochoso do Trecho Faria Lima-Vila Sonia, Linha 4-Amarela. Documento técnico.

JULIANI, C. 1992. O Embasamento Pré-cambriano da Bacia de São Paulo. In: *Problemas geológicos e geotécnicos na região metropolitana de São Paulo*. ABAS, ABGE, SBG/SP, p.3-20.



MAPA TOPOGRAPHICO DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. 1934. Folha 53. Escala 1:5000.

MARTINATI, R. 1999. Aspectos construtivos e geotécnicos relativos à construção de um túnel de 5,4 km de extensão escavado ao longo da Bacia Sedimentar de São Paulo. In: 3º Simpósio sobre túneis urbanos – TURB 99. São Paulo. ABGE, Comitê Brasileiro de Túneis, Instituto de Engenharia. p. 113-125.

MASSAD, F.; PINTO, C.S.; NADER, J.J. 1992. Resistência e deformabilidade. In: Negro Jr, A.; Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L. ed. *Solos da cidade de São Paulo*. São Paulo, ABMS/ABEF. p.141-180.

METRÔ (Companhia do Metropolitano de São Paulo): Tecnologia – Construção - Subterrâneo. Disponível em: [www.metro.sp.gov.br](http://www.metro.sp.gov.br). Acesso em: 23 jul 2008.

NEGRO, A., SOZIO, L.E., FERREIRA, A.A. (1992). Túneis. In: Negro Jr, A.; Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L. ed. *Solos da cidade de São Paulo*. São Paulo, ABMS/ABEF. p.297-328.

PINTO, C. de S. 2006. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3ª Edição. 350 p. São Paulo, Oficina de Textos.

RICCOMINI, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo). 256 p

RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. In: Negro Jr, A.; Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L. ed. *Solos da cidade de São Paulo*. São Paulo, ABMS/ABEF. p.37-94.

ROCHA, H.C. 1995. *Algumas características dos solos arenosos terciários de São Paulo e suas implicações em obras subterrâneas*. São Carlos. (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo). 156 p.

ROCHA, H.C.; CELESTINO, T.B. 1992. Conhecimentos recentes sobre a bacia de São Paulo e o projeto e construção de túneis. In: *Problemas geológicos e geotécnicos na região metropolitana de São Paulo*. ABAS, ABGE, SBG/SP, p.97-113.



RODRIGUEZ, S.K. *Geologia urbana da região metropolitana de São Paulo*. 1998.. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo). 171 p.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L.M. 1998. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A ed. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE. p.211-226.

THEMAG (Themag Engenharia de Projetos Ltda). 1999. Classificação de sondagens. Documento técnico 900-810-NP-033. Divulgação interna. 8 p.

THEMAG (Themag Engenharia de Projetos Ltda). 2001. Documento técnico 6345-01-GL-500-RT-00019. Divulgação interna. 23 p.

THEMAG (Themag Engenharia de Projetos Ltda). 2004. Documento técnico 6416-01-GL-510-RT-00020. Divulgação interna. 31 p.

VARGAS, M. 1980. Geotecnia do Terciário de São Paulo – Histórico. In: *Mesa Redonda – Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo*. Publicação Especial. São Paulo, ABGE/SBG, p. 37-45.

VARGAS, M. 1992. Evolução dos conhecimentos. In: Negro Jr, A.; Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L. ed. *Solos da cidade de São Paulo*. São Paulo, ABMS/ABEF. p.1-35.

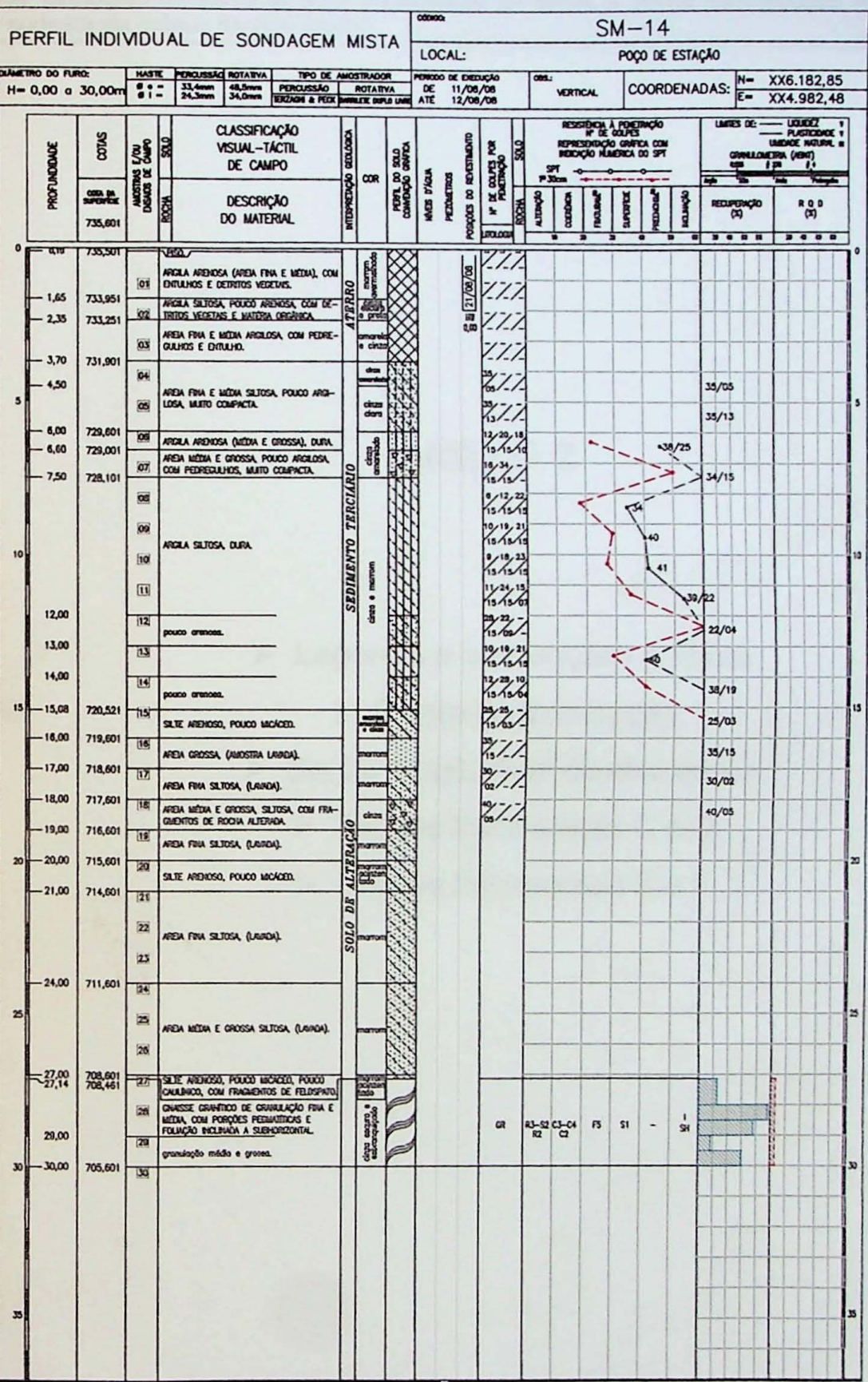
VAZ, L.F. 1996. Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. *Solos e Rochas - Revista Brasileira de Geotecnia*, v. 19 (2): 117-136.



## **ANEXO 1**

### **➤ Perfil de sondagem da SM-14**





GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	GRAU DE FRATURAMENTO (f/m)	SUPERFÍCIE/ALTERAÇÃO	PREENCHIMENTO/ABERTURA	INCLINAÇÃO/ORIENTAÇÃO
R1 - ROCHA SA	C1 - MUITO COERENTE	F1 = < 1 (POUCO FRATURADO)	S1 - MACISA	P0 - COM SUSPEITA DE PREENCHIMENTO	N - HORIZONTAL
R2 - POUCO ALTERADA	C2 - COERENTE	F2 = 1 a 5 (FRATURADO)	S2 - ESTRADA	P1 (S) - ORÇALUR (indica espessura em mm)	SH - SUB HORIZONTAL (0° a 30°)
R3 - MODERADAMENTE ALTERADA	C3 - MODERADAMENTE COERENTE	F3 = 6 a 10 (MUITO FRATURADO)	S3 - PLANA	P2 (S) - MOTO (indica espessura em mm)	I - INCLINADA - (30° a 70°)
R4 - MUITO A EXTREMAMENTE ALTERADA	C4 - POUCO COERENTE	F4 = 11 a 20 (EXTREMAMENTE FRATURADO)	S4 - SEDIMENTOS	P3 (S) - ABILIS (indica espessura em mm)	SV - SUB VERTICAL (70° a 90°)
		F5 = > 20 (FRAGMENTADO)			

LEITURAS DE NÍVEL D'ÁGUA						CÍRCULOS DE LOCALIZAÇÃO DA SONDEADORA					
DATA	NOTA	TEMPERATURA DA SONDEADORA	TEMPERATURA DO FLOCO	TEMPERATURA DO FLOCO	TEMPERATURA DO FLOCO	DATA	NOTA	TEMPERATURA DA SONDEADORA	TEMPERATURA DO FLOCO	TEMPERATURA DO FLOCO	TEMPERATURA DO FLOCO
14/07/08	12,30	3,17	0,00	3,17		16/07/08	9,31				3,04
14/07/08	12,40			3,03		16/07/08	10,06				3,78
14/07/08	12,50			2,60		16/07/08	10,21				3,75
14/07/08	13,00			2,97		16/07/08	10,51				3,73
14/07/08	13,15			2,93		16/07/08	11,21				3,73
14/07/08	13,30			2,88		16/07/08	11,51				3,73
14/07/08	14,00			2,83		16/07/08	12,54	11,37	8,14		8,42
14/07/08	14,30			2,78							
14/07/08	15,00			2,75		17/07/08	7,23	11,37	8,14	4,79	
14/07/08	15,30			2,73		17/07/08	10,15	10,15	10,15		12,61
14/07/08	16,00			2,71							
14/07/08	16,30			2,69		18/07/08	7,35	16,15	16,15	11,38	
14/07/08	17,00			2,69							
15/07/08	7,00	3,17	0,00	2,69		19/07/08	7,28	16,15	16,15	8,79	
						19/07/08	10,45	24,03	22,33		13,37
16/07/08	7,10	3,17	0,00	2,68		21/07/08	7,30	21,03	22,33	18,11	
16/07/08	9,31	3,08	3,50		4,65	21/07/08	12,17	30,00	27,14		18,47
16/07/08	9,31			4,17							
16/07/08	9,41			3,94		23/07/08	7,38	30,00	27,14	17,45	



## **ANEXO 2**

- Legenda e convenções gráficas
  - Planta de localização
- Seção longitudinal de eixo de via
  - Seções transversais C e D
  - Seções transversais E e F



## LEGENDA

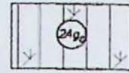
### 1 DEPÓSITOS TECNOGÊNICOS



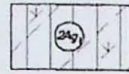
Aterros de materiais diversos com predominância de argila siltosa pouco arenosa, geralmente com pedregulhos e/ou matéria orgânica

### 2 DEPÓSITOS ALUVIONARES (QUATERNÁRIO)

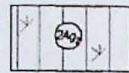
#### \* FÁCIES ARGILOSO



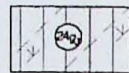
Argila orgânica muito mole, preta



Argila siltosa com matéria orgânica disseminada, plástica, muito mole, cinza e marrom

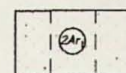


Argila arenosa (areia fina), com matéria orgânica, muito mole a medianamente consistente, marrom e cinza

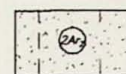


Argila siltosa arenosa, com pedregulhos e matéria orgânica, plástica, mole, cinza e marrom

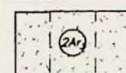
#### \* FÁCIES ARENOSO



Areia fina e média argilosa, pouco plástica, fofa, marrom e cinza



Areia média e grossa pouco argilosa, fofa, cinza



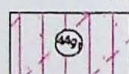
Areia média e grossa argilosa com pedregulhos, fofa a medianamente compacta, cinza e marrom

### 3 FORMAÇÃO SÃO PAULO (TERCIÁRIO)

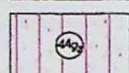
(NÃO PRESENTE NA ÁREA)

### 4 FORMAÇÃO RESENDE (TERCIÁRIO)

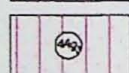
#### \* FÁCIES ARGILOSO



Argila siltosa pouco arenosa (areia fina e média), medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza esverdeada

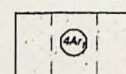


Argila arenosa (areia fina e média), pouco micécea, pouco a medianamente plástica, rija a dura, cinza

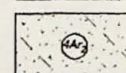


Argila arenosa, pouco siltosa, com pedregulhos variados, medianamente plástica a plástica, rija a dura, cinza e marrom

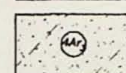
#### \* FÁCIES ARENOSO



Areia fina e média argilosa, pouco siltosa, pouca micécea, pouco plástica, pouca compacta a compacta, cinza e amarela

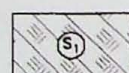


Areia média e grossa, pouco siltosa, medianamente a muito compacta, cinza e amarela

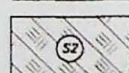


Areia média e grossa pouco siltosa, com fragmentos de quartzo e pedregulhos variados, medianamente a muito compacta, cinza e amarela

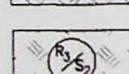
### 5 EMBASAMENTO CRISTALINO:



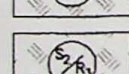
Solo eluvial (SE)



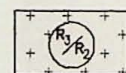
Solo de alteração (SA) - Silte arenoso (areia fina e média) e areia fina e média siltosa ou argilosa, compactos e predominantemente muito compactos, com porções silta-argilosas ou argila-siltosas pouco arenosas, duras, pouca micécea e micéceas, frequentemente com fragmentos de rocha, cinza, cinza-esverdeada, cinza-esbranquiçada e amarelada.



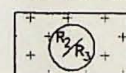
Rocha alterada mole (RAM) e/ou solo de alteração (SA) com pequenos trechos de rocha alterada dura (RAD).



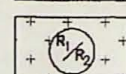
Rocha sã (RS) e/ou rocha alterada dura (RAD).



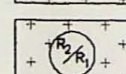
Rocha alterada mole (RAM) com intercalações de rocha alterada dura (RAD) e eventualmente pequenas trechos de solo de alteração (SA).



Rocha alterada dura (RAD) com intercalações de rocha alterada mole (RAM) e eventualmente pequenas trechos de solo de alteração (SA).



Rocha sã (RS) e/ou rocha alterada dura (RAD).



Rocha sã (RS) e/ou rocha alterada dura (RAD).

## CONVENÇÕES GRÁFICAS

Linha de divisão entre unidades geológicas com características genéticas diferentes (UNIDADES 1, 2, 4 e 5)  
Linha de divisão entre materiais geológicos com características geotécnicas distintas (MATERIAIS 2Ag, 2Ar, 4Ag, 4Ar, 5Z)

Linha de divisão entre unidades lito-faciológicas diferenciadas (FÁCIES 2Ag0, 2Ag1, 2Ag2, 2Ag3, 2Ar1, 2Ar2, 2Ar3, 4Ag1, 4Ag2, 4Ag3, 4Ar1, 4Ar2, 4Ar3)

TOPO DA ROCHA ALTERADA MOLE

TOPO DA ROCHA ALTERADA DURA

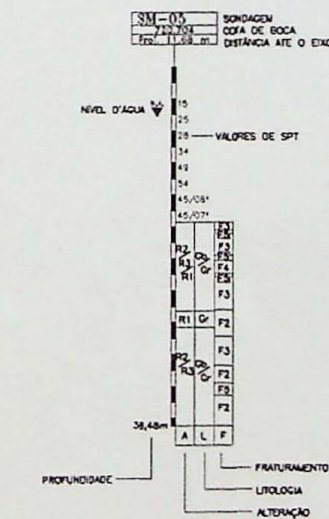
Concreção limonítica

Impermeável à lavagem por tempo

Representação do nível d'água

Representação das geratrizes superior e inferior do túnel e do topo do boleto

Representação da seção transversal do túnel e do topo do boleto



## CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÕES

### GRAU DE ALTERAÇÃO (A)

- S<sub>1</sub> - SOLO ELUVIAL (SE)
- S<sub>2</sub> - SOLO DE ALTERAÇÃO (SA)
- R<sub>3</sub> - ROCHA ALTERADA MOLE (RAM)
- R<sub>2</sub> - ROCHA ALTERADA DURA (RAD)
- R<sub>1</sub> - ROCHA Sã OU PRATICAMENTE Sã (RS)

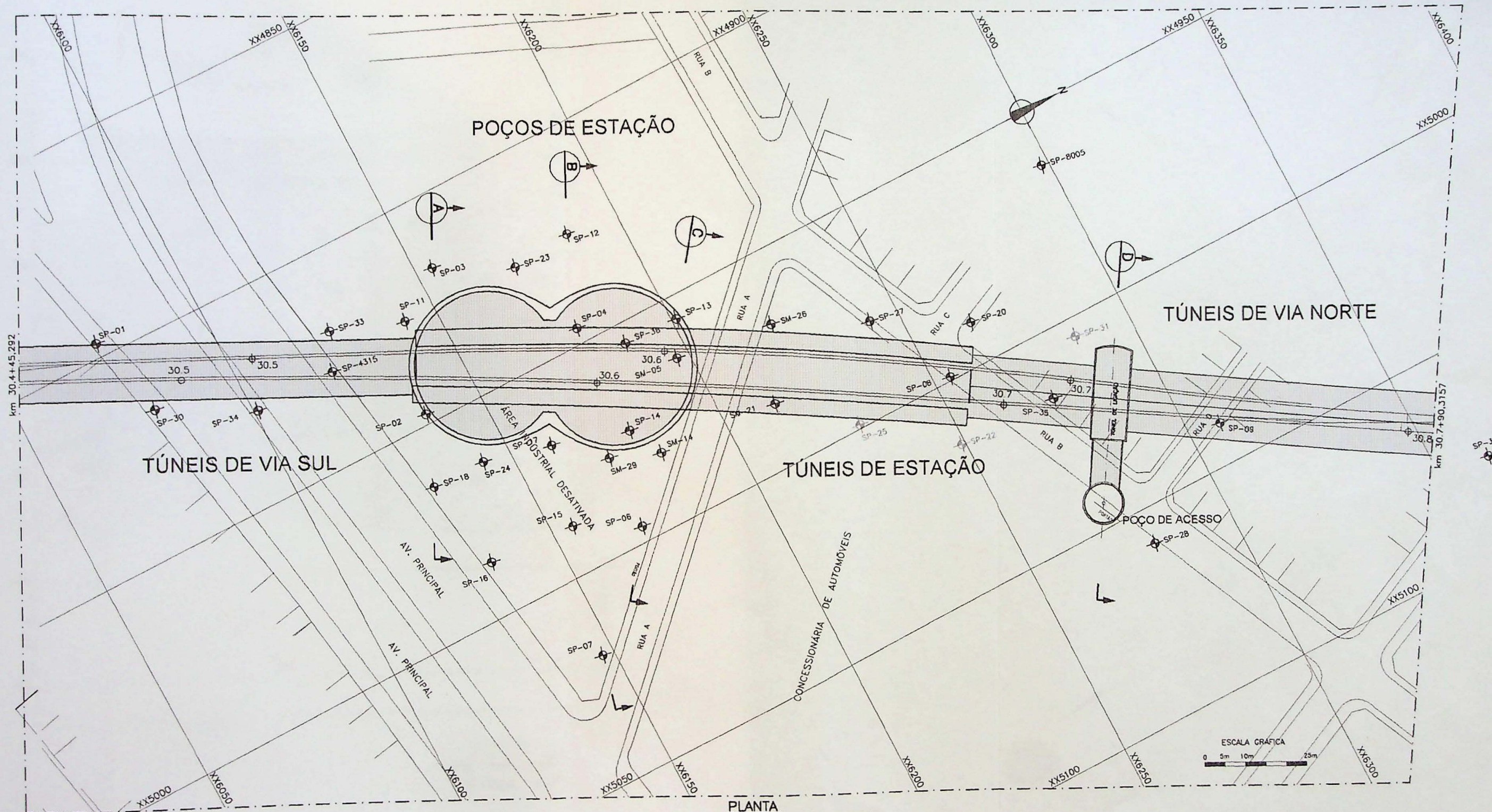
### TIPOS LITOLÓGICOS:

- Gr - Gnaíse granítica de coloração cinza escuro e esbranquiçada, granulção fina a grossa, composto predominantemente por quartzo e feldspato.
- Gb - Gnaíse biotítica de coloração cinza escuro e esbranquiçada, granulção fina a média, composto predominantemente por quartzo, feldspato e biotita.
- Pg - Pegmatitas, compostas essencialmente por quartzo e feldspato.
- Bi - Zonas compostas quase exclusivamente por biotita.
- Zx - Zonas cisalhadas, representadas por milonitos e cataclastos, geralmente enriquecidas em epidoto.

### GRAU DE FRATURAMENTO (F)

Fraturamento		
classe	fratura/m	grau de fraturamento
F1	0 a 1	pouco fraturado
F2	2 a 5	fraturado
F3	6 a 10	muito fraturado
F4	11 a 20	extremamente fraturado
F5	> 20	fragmentado





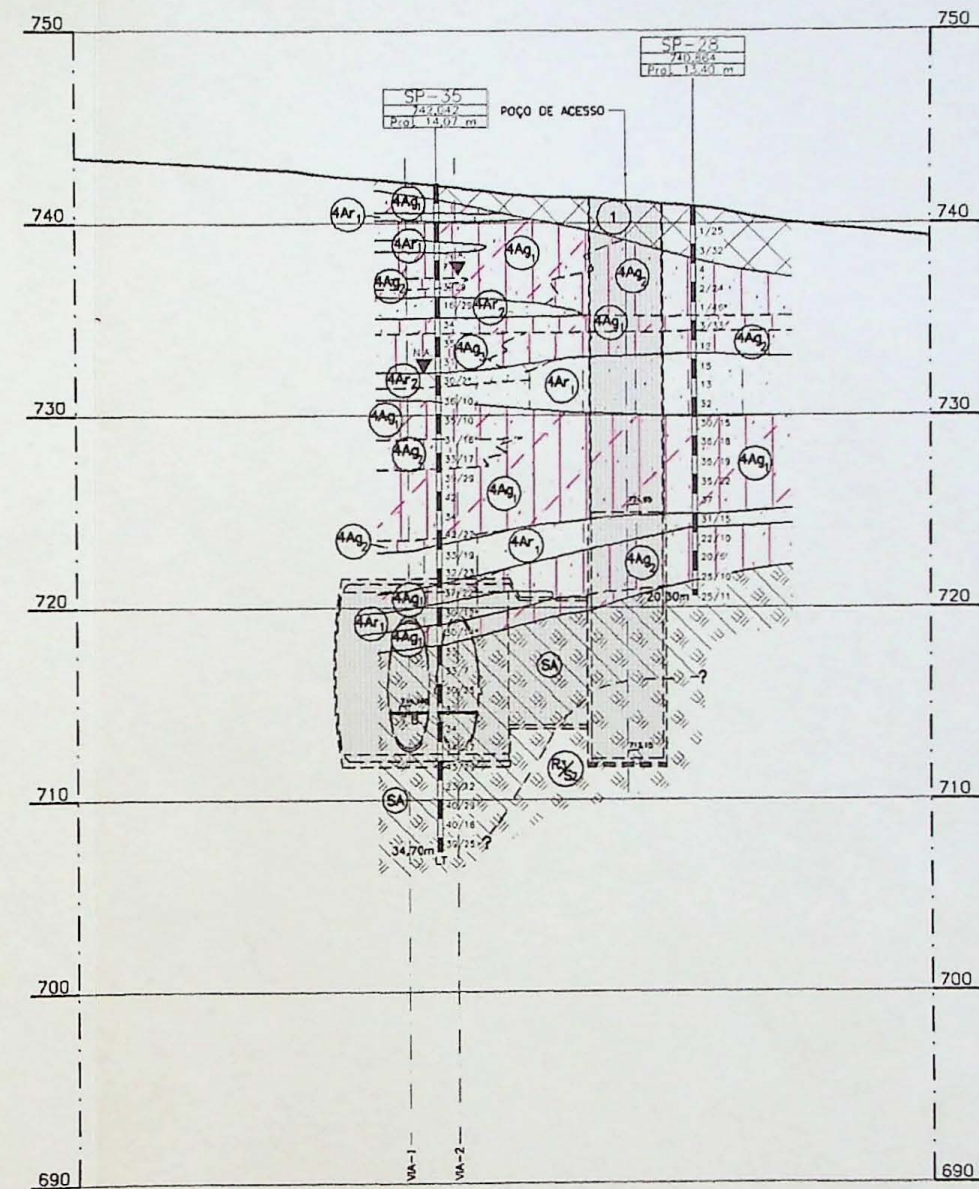
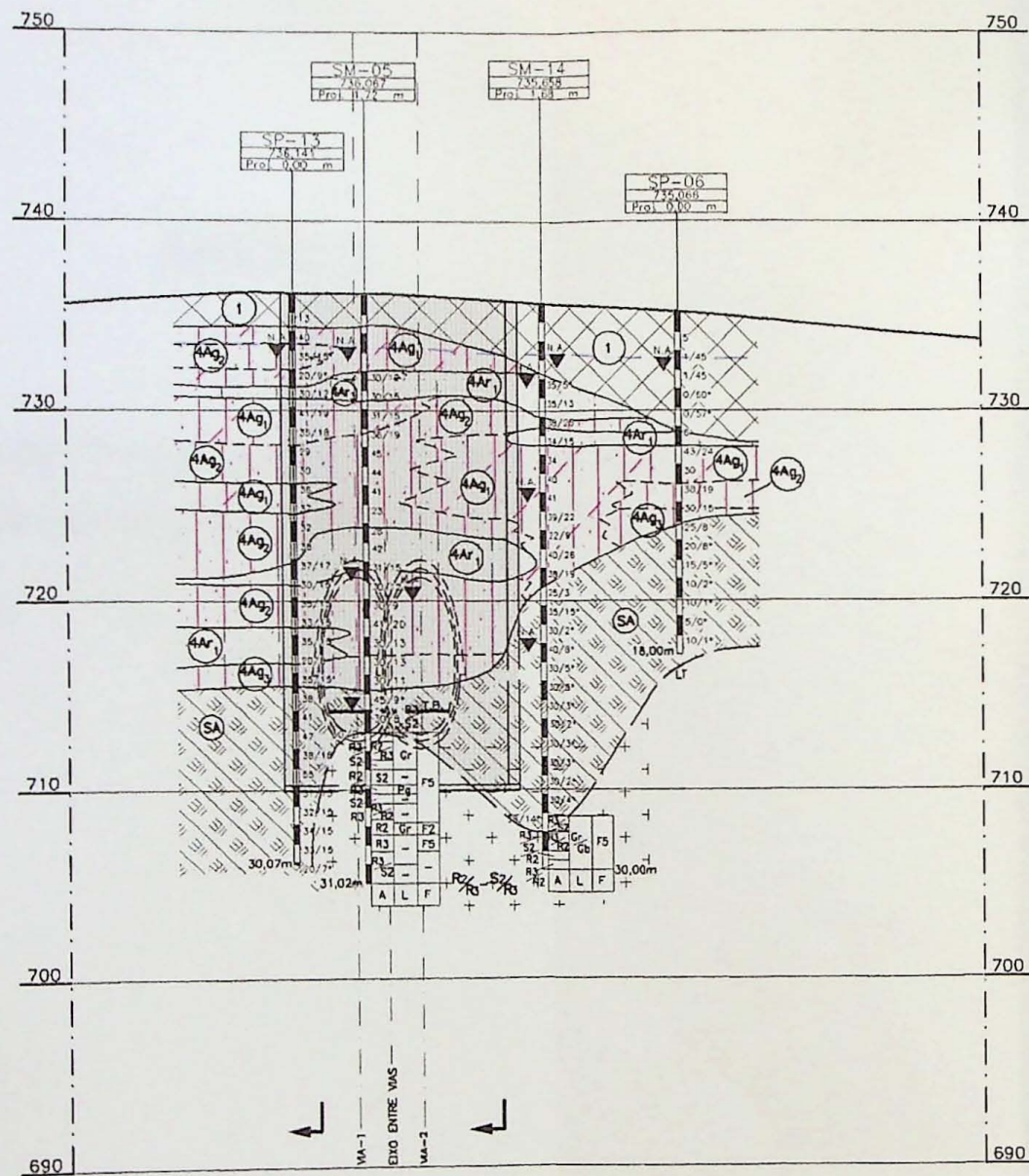












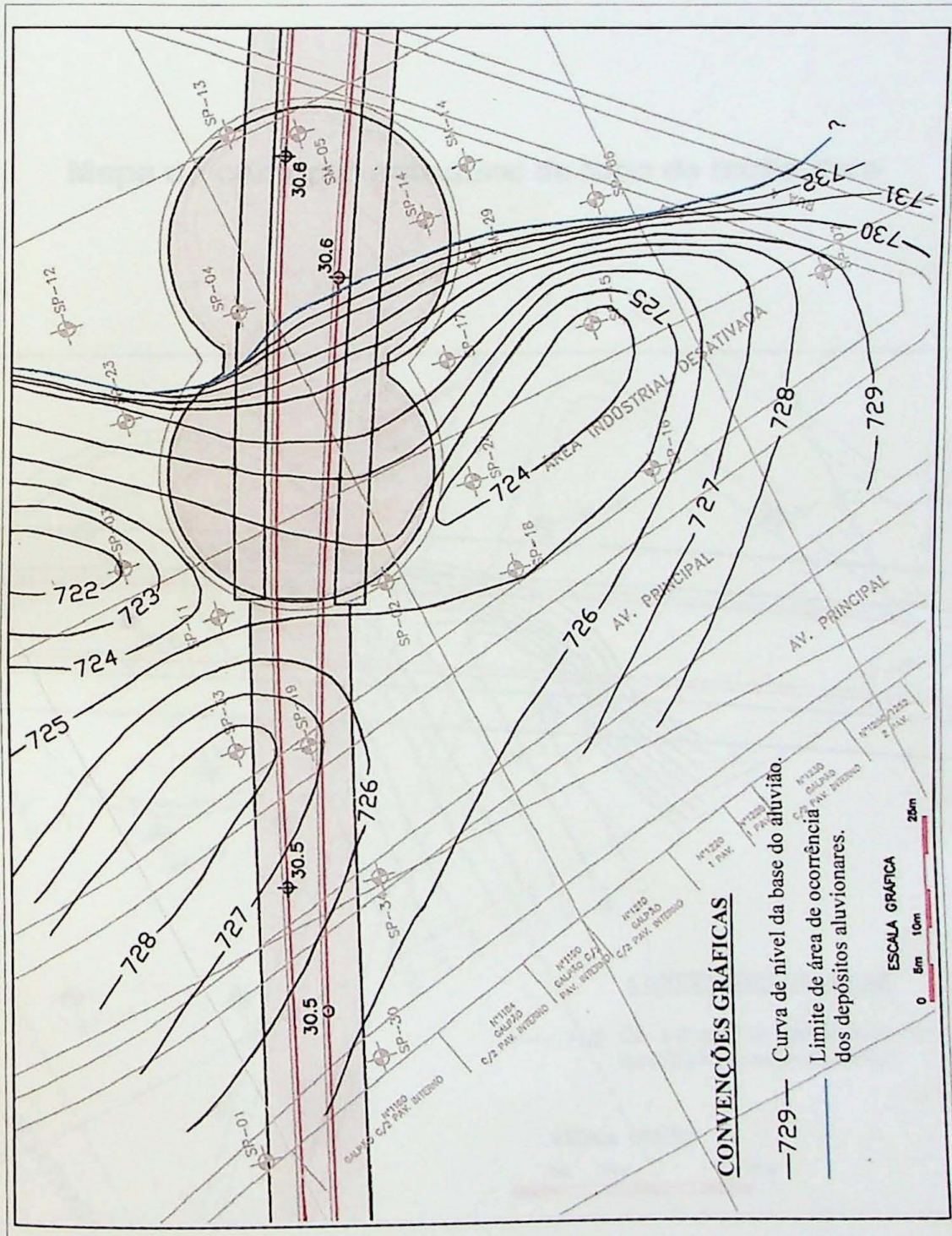


## **ANEXO 3**

- Mapa de contorno estrutural de base do aluvião
- Mapa de contorno estrutural de topo de rocha dura

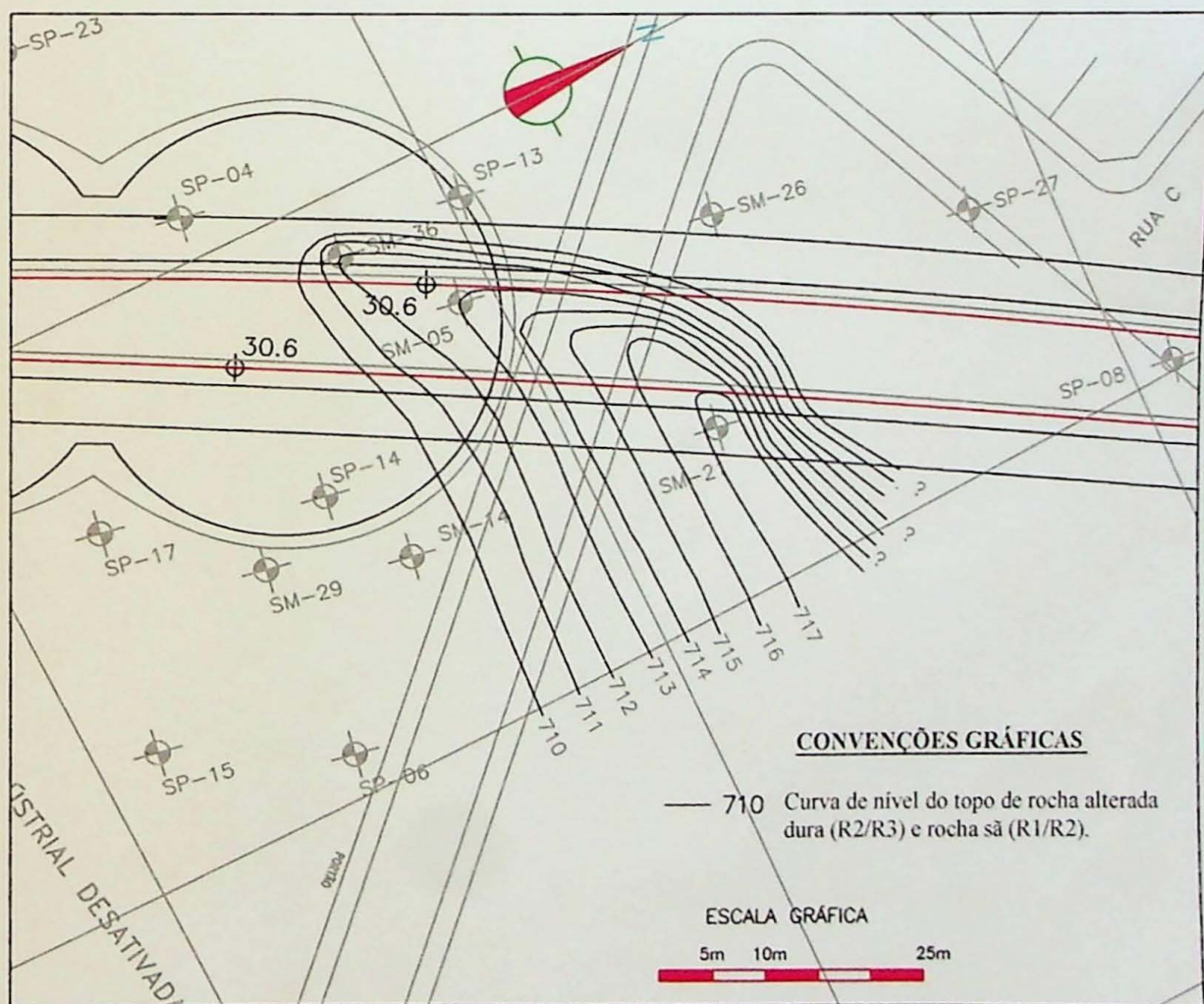


## Mapa de contorno estrutural da base do aluvião





## Mapa de contorno estrutural de topo de rocha dura





Mapa de contorno geológico da área de estudo



DOAÇÃO \_\_\_\_\_  
IGC-USP  
Data: 20/02/09



