

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DOS
TERRENOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO APLICADA
AOS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

Aluisio da Silva Ramos

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 02)

SÃO PAULO
2011

TF
R175
AS.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DOS
TERRENOS DA BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO APLICADA
AOS MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

Aluisio da Silva Ramos

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato



MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2011 / 02)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900030265

SÃO PAULO
2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DOS TERRENOS DA
BACIA SEDIMENTAR DE SÃO PAULO APLICADA AOS MÉTODOS DE
ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

Aluisio da Silva Ramos

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato



De acordo:

Prof. Dr. Edilson Pissato

Aluisio da Silva Ramos

SÃO PAULO
2011

Resumo

A implantação de obras subterrâneas em regiões densamente urbanizadas, como a região metropolitana de São Paulo, requer intensa campanha de investigação geológica e geotécnica, alem da escolha de um método que garanta segurança e economia na execução da obra. No entanto, para a escolha do método correto é necessário que se conheça os parâmetros geológicos e geomecânicos do maciço onde se implantara a obra. Partindo dessa premissa, a companhia metropolitana de São Paulo executou uma intensa campanha investigativa para a implantação da linha 6 – laranja do Metro na qual se identificou a compartimentação do arcabouço geológicos em embasamento cristalino, sedimentos terciários e sedimentos holocênicos. Com base em resultados de ensaios dessa campanha foram realizadas análises para a elaboração desse trabalho, com ênfase nos parâmetros abrasivos das litologias identificadas. A abrasividade dos litotipos é um dos parâmetros fundamentais à escolha do método de escavação, pois está relacionada à vida útil das ferramentas de corte. Para a caracterização da abrasividade das litologias encontradas, foram analisados resultados de ensaios de compressão uniaxial, compressão diametral, CERCHAR e quartzo-equivalente para as amostras de rochas, e análise granulométrica para as amostras de sedimentos. Os valores encontrados mostraram que as rochas do embasamento, apresentam abrasividade extrema nos granitóides que ocorrem na borda NNE e abrasividade média a alta nos gnaisses que ocorrem na região do Vale do Pacaembu. Nos sedimentos terciários a análise granulométrica apontou para abrasividade média, contudo há a necessidade de outros ensaios testes para a identificação mais precisa da abrasividade dos sedimentos.

Abstract

Underground civil engineering works in densely urbanized areas such as the Greater São Paulo require intense geological and geotechnical investigation as well as the choice of methods that assure both safety and low cost of implementation. The choice of the optimal method requires the previous knowledge of geological and geomechanical features of the massif where the works will then take place. For this reason the Companhia Metropolitana de São Paulo has intensively worked in the previous investigation and data acquisition before and during the construction of the Orange Line – Line 6 (underground service expansion) where there have been found rocks from the crystalline basement, Tertiary and Holocene sediments. The abrasivity of rock types is one of the main parameters considered when making the choice of the suitable method for drilling mainly due to the lifetime of the tools. For the rocks abrasivity determination, data from uniaxial compression, diametral compression, CERCHAR and quartz-equivalent analysis were used. For the sediments found, granulometric analysis was performed.

Agradecimentos

Sendo essa monografia o final da mais bela e importante das minhas histórias, gostaria de registrar aqui meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para o que sou hoje. Quero de antemão pedir desculpas àqueles que eu possa ter esquecido nesse momento.

Primeiramente agradeço aos meus pais, irmãs e cunhado que acreditaram no meu sonho e a toda minha família que acompanharam esse meu percurso me apoiando e incentivando. Agradeço também:

Ao Professor Edilson Pissato por ter aceitado o desafio de me orientar nesse projeto que se iniciou, perigosamente, apenas com a idéia, agradeço-o também pela paciência e tranquilidade com que tratou a minha ausência.

Aos meus amigos de São José dos Campos; Erica, Daura, Juarez, Paola, Silvana, Célia, Geraldo, Andrea, Julio, Paula, Paulinho..., que acreditaram em mim e que mesmo com a distância e o tempo sempre me recebem de braços a aberto.

Aos sinceros amigos, Maria e Willian, pelo apoio e incentivo no inicio do curso.

Aos amigos “especiais” do 401, Paula, Denise, Bruna e Renato pela amizade nesses 5 longos anos e aos também longos e alegres cafés, às piadas, o companherismo,

À Denise companheira de “bondade, tolerância e afabilidade” no trato com os vizinhos e afins e a Paula pelo seu “bom humor” matinal que muito me divertiu.

Aos colegas do Instituto de geociênciа, Diego Chumaço, Daniela Piroca, Henrique Pereba, Sheila Sertão, Rodolfo Pink, João Paulo Tsé, Diego Lambe, Pâmela, Bruna loira, Bruna Gorda, Sueca, Exu, Wellington xaxim, Daniel Kuduru.... Entre muitos outros pelo respeito e amizade.

Aos Geólogos Vitor e Weder da EPT pelo apoio na conclusão desse trabalho.

À Geóloga Alethea Sallun pela orientação no estágio no IG e principalmente pela amizade e ensinamentos.

Especialmente a minha amada Fernanda, por ser parte da minha vida nesse momento tão especial, e por todos esses 5 anos de dedicação, compreensão e carinho.

À Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ) por autorizar a utilização de dados internos publicação dos estudos em especial Geólogo Marcelo Denser Monteiro.

E a todos que contribuíram para a conclusão dessa caminhada, professores, funcionários e principalmente a própria USP que deu condições para que eu pudesse concluir sem maiores percalço a graduação.

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução..... | 3 |
| 2 | Objetivo..... | 4 |
| 3 | Justificativa..... | 4 |
| 4 | Revisão Bibliográfica | 5 |
| 4.1 | A Bacia Sedimentar de São Paulo | 5 |
| 4.2 | Geologia Regional..... | 7 |
| 4.3 | O embasamento Pré-Cambriano..... | 7 |
| 4.4 | Sedimentação na Bacia de São Paulo | 9 |
| 4.4.1 | Formação Resende | 10 |
| 4.4.2 | Formação Tremembé | 10 |
| 4.4.3 | Formação São Paulo | 11 |
| 4.4.4 | Formação Itaquaquecetuba..... | 11 |
| 4.5 | Abrasividade do arcabouço geológico da RMSP | 11 |
| 5 | Métodos de escavação | 12 |
| 5.1 | Perfuração e detonação..... | 12 |
| 5.1.1 | Trincheira ou VCA..... | 12 |
| 5.1.2 | Novo Método Austríaco (NATM)..... | 13 |
| 5.2 | Escavação Mecanizada | 15 |
| 5.2.1 | Obras em rochas “brandas” ou solos pouco coesos | 15 |
| 5.2.2 | Obras em rochas “duras” (<i>Tunnel Boring Machine - TBM</i>) | 16 |
| 6 | O Metrô de São Paulo | 17 |
| 6.1 | A Linha 6 – Laranja..... | 18 |
| 6.1.1 | Geologia local | 19 |
| 6.1.2 | Obras e métodos construtivos..... | 22 |
| 7 | Materiais e métodos..... | 22 |
| 7.1 | Métodos e técnicas de Ensaios | 22 |
| 7.1.1 | CERCHAR..... | 23 |
| 7.1.2 | Compressão Uniaxial..... | 25 |
| 7.1.3 | Compressão diametral | 25 |
| 7.1.4 | Equivalente quartzo | 26 |
| 7.1.5 | Agregado miúdo – Análise granulométrica | 28 |
| 7.1.6 | O teste de abrasão LCPC..... | 29 |

| | | |
|-------|--|----|
| 7.1.7 | O teste de abrasão NTNU | 32 |
| 7.2 | Ensaios Realizados | 33 |
| 7.2.1 | Ensaio de Abrasividade CERCHAR..... | 33 |
| 7.2.2 | Ensaio de Compressão Simples (Uniaxial)..... | 34 |
| 7.2.3 | Ensaio de Compressão Diametral..... | 34 |
| 7.2.4 | Ensaio de Agregado | 35 |
| 8 | Discussão | 36 |
| 9 | Conclusão..... | 41 |
| 10 | Referências Bibliográficas | 42 |
| 11 | Anexos | 47 |

1 Introdução

Obras subterrâneas são alternativas não destrutivas à superfície para solucionar questões espaciais e viárias em grandes cidades, como a região metropolitana de São Paulo, cuja superfície encontra-se em processo avançado de urbanização e onde fatores socioambientais e a valorização imobiliária são implicações relevantes à execução de obras viárias. Dentro desse contexto, busca-se por meio da construção de túneis - sejam rodoviários ou metroviários - a solução para o caótico trânsito da região metropolitana de São Paulo - RMSP.

Acredita-se que o primeiro túnel do Brasil tenha sido escavado por volta de 1860 para obras da antiga Estrada de Ferro D. Pedro II (Telles, 2006); no final dessa década, teve início a construção de túneis rodoviários com a função de sanar os problemas urbanísticos da cidade do Rio de Janeiro. Na cidade de São Paulo, em 1938, teve-se o registro da construção do primeiro túnel rodoviário; depois de 1950, foram feitos túneis em várias capitais do país (Carvalho, 2006), não superando em metragem, porém, as obras em túneis ferroviários.

A construção de túneis ferroviários foi suplantada em 1970 com a construção dos metrôs de São Paulo e do Rio de Janeiro e com o declínio da construção de estradas de ferro, já em 1990, em capitais como Brasília, Salvador, Belo Horizonte, Recife, Curitiba, além de obras em Goiânia e Porto Alegre (Rocha, 2006).

As obras do metrô de São Paulo iniciaram-se no final da década de 1960 com a construção da Linha 1- Azul, de Santana a Jabaquara. Nesse trabalho, foram requeridos métodos avançados de construção de túneis, já que era realizado em trechos com diferentes traçados, terrenos heterogêneos e condições ambientais adversas. Foi nesta obra também que ocorreu a primeira experiência de utilização de tuneladoras – *shield* (METRÔ DE SÃO PAULO – 01/06/2011).

A escolha do método de escavação, mecanizado ou convencional, deve ser estabelecida depois de acurada investigação geológico-geotécnica, para que sejam elaborados projetos de tunelamento específicos ao modelo geológico. A representação precisa do maciço, com as características geológicas e geomecânicas bem definidas, serve não somente para escolher o método de escavação como também para gerir o uso da ferramenta correta frente aos desgastes e/ou danos aos equipamentos tuneladores.

Grande parte da região metropolitana de São Paulo está localizada na bacia sedimentar de São Paulo, segmento central do Rift Continental do Sudeste Brasileiro

(Riccomini, 1989). Possui um substrato heterogêneo e complexo, sobre o qual existem volumosos acervos de dados, gerados por conta da grande quantidade de poços para água subterrânea, edificações, obras de saneamento, eletricidade, etc., o que sugere um conhecimento avançado desse substrato.

No entanto, um projeto de obra subterrânea em meio urbano requer medidas severas para que se evite pôr em risco as estruturas próximas a ela. Para tal, é preciso que haja um projeto de pesquisa que forneça um conhecimento ainda mais amplo das estruturas, da composição e do comportamento do maciço em que se realizará a obra e de suas vizinhanças, a fim de se evitar danos à obra e às áreas que a circundam (Assis, 1999).

Assim, dadas as características da região metropolitana de São Paulo, como o intenso adensamento em superfície e o substrato bastante heterogêneo, a necessidade de investigação geológico-geotécnica em detalhe é ainda maior. Porém, este adensamento urbano traz fatores que dificultam os processos investigativos indiretos, tais como a falta de afloramentos, imagens para sensoriamento remoto e análises geofísicas (Assis, 1999).

2 Objetivo

O presente trabalho propõe uma análise de resultados de ensaios laboratoriais executados em amostras obtidas na campanha de investigação geológico-geotécnica preliminar realizada para a implantação da linha 6 - Laranja do Metrô, que será instalada no trecho NNE-Centro da região metropolitana de São Paulo, abrangendo o terreno sedimentar e embasamento cristalino para obtenção dos parâmetros de abrasividade das unidades geológicas e suas implicações quanto ao uso e desgaste das ferramentas de corte na utilização dos métodos mecanizados (TBMs/Shields) e do convencional (NATM).

3 Justificativa

O transporte em superfície na cidade de São Paulo está em um momento caótico, com vias saturadas e poluídas, situação em que soluções rodoviárias se tornam paliativas diante da velocidade do aumento da frota particular e do número de usuários de transportes públicos. A solução para esses problemas apresenta-se somente com obras de grande porte, vias que possam transportar grandes massas sem prejuízos

ambientais e financeiros, como obras subterrâneas. No entanto, a abertura de túneis em regiões urbanizadas pode ser onerosa e de grande risco.

Para solucionar tais problemas, o uso de equipamentos, tuneladoras, fresa, perfuratrizes, etc é a opção que proporciona resultados mais rápidos e seguros, respondendo às urgências dos problemas viários. Contudo, os métodos mecanizados de abertura e construção de túneis requerem estudos detalhados do arcabouço geológico-estrutural a fim de evitar imprevistos geológicos e desgaste excessivo das ferramentas de corte e furo, sendo esses os principais fatores de risco que podem gerar resultados negativos na obra subterrânea, ou seja, prejuízo financeiro e/ou humano.

Os instrumentos de corte que constituem as tuneladoras e perfuratrizes (fresas e *button bit*) desgastam-se de forma diferente quando cortam rochas/solos de coerências, estruturas, durezas e abrasividades diferentes. Assim, a falta de conhecimento sobre essas características implica na ocorrência de imprevistos estruturais e constante manutenção das ferramentas, acarretando atrasos e prejuízos. Para antecipar-se a estes problemas, é preciso conhecer ou prever com bastante precisão a composição e o comportamento do maciço/terreno em que será instalado o projeto.

4 Revisão Bibliográfica

4.1 A Bacia Sedimentar de São Paulo

Muito se tem estudado sobre a Bacia Sedimentar de São Paulo, principalmente depois da década de 1960, com o “boom imobiliário”, a intensa ocupação e a existência de grande quantidade de poços para água subterrânea na região então denominada Planalto de São Paulo (Almeida, 1964). Os primeiros registros remontam a 1827, quando Andrada e Silva e seu irmão Martim Francisco Ribeiro da Silva publicaram em Paris sobre o tema (Leinz, 1980).

G. W. Washburne, em 1930, cita a existência da Camada São Paulo na Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo (Leinz, 1980) e Moraes Rego, em 1933, realiza estudos intensivos sobre a camada terciária paulistana, descrita como “Argilas de São Paulo”. Moraes Rego e Tarcísio D. S. Santos, em 1938 (Apud Leinz, 1980), dedicam dois capítulos para descrever as “Camadas Terciárias Paulistanas”, descrevendo os sedimentos compostos e os arenitos limoníticos.

Segundo Vargas (1992), em 1945, são publicados os primeiros estudos sobre a natureza das camadas terciárias do centro da cidade de São Paulo, realizados sobre dados obtidos através de sondagens feitas para a construção de edifícios e para investigações destinadas à implantação do metrô. Neste mesmo trabalho, Vargas cita a compilação de dados geológico-geotécnicos da Bacia São Paulo, realizada por Ernesto Pichler e apresentada em 1945 na Conferência Internacional de Mecânica de Solos. Nessa mesma época, em investigações para a implantação da Usina Siderúrgica de Volta Redonda, na cidade homônima, foram descritos sedimentos semelhantes aos descritos na cidade de São Paulo.

Em 1951, Vargas apresentou um trabalho bastante relevante com características geológicas e geotécnicas, no qual interpretou a espessura original das argilas considerando suas características pré-adensadas. Leinz *et al* apresentaram em 1957 um mapa do topo do embasamento, baseados em sondagens diretas, com as quais verificaram a correlação entre drenagens antigas e atuais, observaram também a ausência da componente orgânica e carbonática e da deposição em ambientes calmos nos sedimentos terciários (Leinz, 1980).

Vargas (1992) discorda dessa afirmação ao analisar as areias basais da bacia, nas quais observa a ocorrência de pedregulhos, o que indica energia elevada na deposição. Nessa mesma linha de raciocínio, Melo *et al* (1986) observam a ocorrência de matéria orgânica em sedimentos terciários durante investigações da obra do Metrô Barra Funda. Riccomini *et al* (1992) descrevem crostas carbonáticas em sedimentos cinza observados em investigações da obra do Metrô Norte-Sul

Cozzolino (1980) apresenta uma síntese de sua tese de mestrado sobre solos da Bacia de São Paulo realizada com estudos de dados obtidos da linha Norte-Sul do Metrô e de sua tese de doutoramento sobre “Os tipos de sedimentos que constituem a Bacia de São Paulo”. A partir dos anos de 1970, muitos estudos relevantes foram realizados sobre a Bacia de São Paulo, o que culminou com a realização da mesa-redonda, em 1980, intitulada “Aspectos geológicos e geotécnicos da Bacia de São Paulo”. Nessa ocasião, sinteticamente, foi publicado todo o conhecimento sobre a bacia. Um marco desse evento foi o lançamento do Mapa Geológico de São Paulo.

Riccomini (1989) faz a classificação geológica da Bacia Sedimentar de São Paulo, inserindo-a no quadro litoestratigráfico desenvolvido para a porção central do Rift Continental do Sudeste do Brasil. Vargas (1992) traça a evolução dos conhecimentos geológicos acumulados. Riccomini *et al* (1992) resumem todo o conhecimento

geológico da Bacia de São Paulo, parte integrante do Rift Continental do Sudeste Brasileiro, e apresentam dados estruturais, tectônicos e estratigráficos.

4.2 Geologia Regional

A Bacia de São Paulo está inserida no segmento central do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini, 1989). Trata-se originalmente de um *hemigráben* basculado para NNW que sofreu retrabalhamento por falhas pós-sedimentares, resultando em soerguimentos e abatimentos controlados pelas falhas de Taxaquara e Jaguari (Riccomini et al. 2004), com espessura máxima de 263 m, sondagem executada no astroblema de Colônia.

A bacia possui forma irregular elíptica com área de 1.000 km², sendo que seu eixo maior, com 75 km, compreende-se entre os municípios de Arujá e Embu-Guaçu e o seu eixo menor, com 25 km, abrange os municípios de São Paulo, Guarulhos, Itaquaquecetuba, Mogi das Cruzes, São Bernardo do Campo, entre outros. A borda norte é retilínea, controlada pela zona de cisalhamento Taxaquara-Jaguari, segundo Riccomini (1989). Pode ser dividida em embasamento Pré-Cambriano, sedimentos Terciários e sedimentos Holocênicos.

4.3 O embasamento Pré-Cambriano

A Bacia sedimentar de São Paulo se desenvolveu sobre terrenos denominados Cinturão Ribeira, formado por rochas do grupo São Roque e Açungui - também chamado de Província Mantiqueira por Almeida e Hasui (1984). É condicionada por um importante grupo de falhas - Taxaquara, Rio Jaguari, Jundiuívira, Caucaia e Cubatão - que influenciou sua forma atual (Figura 1).

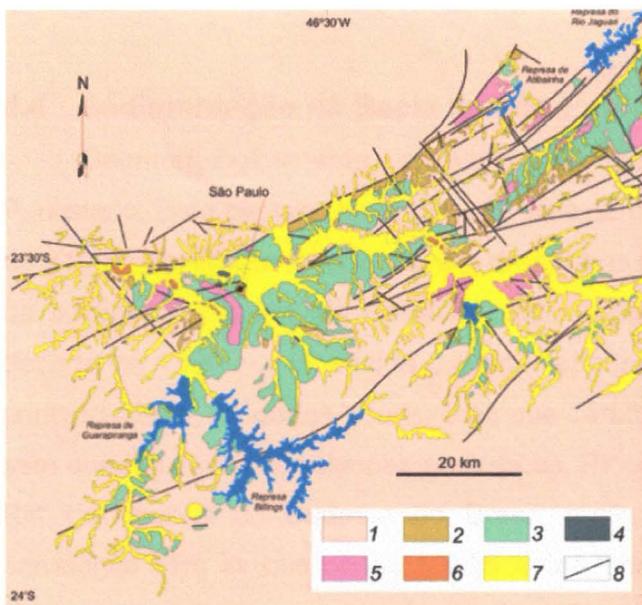


Figura 1 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo – 1) embasamento pré-cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais); 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquecetuba; 7) Sedimentos quaternários; 8) Falhas Cenozóicas. Fonte: Modificado de Riccomini, Sant'anna & Ferrari (2004).

Ao sul da Bacia ocorrem rochas gnáissico-migmatíticas, conhecidas como Complexo Costeiro, onde os gnaisses são predominantes. Subordinadamente ocorrem gnaisses granítóides, gnaisses granatíferos, rochas charnockíticas e lentes embutidas de quartzitos, rochas calciosilicáticas, mármore, anfibolitos e rochas metabásicas (Juliani, 1992).

Nas regiões ao norte, sudoeste e sul da Bacia de São Paulo ocorrem metassedimentos diversos, de idade proterozóica, essencialmente filitos e xistos, respectivamente nas regiões ao norte e ao sul-sudoeste, denominados Grupo São Roque por vários autores (e.g. Hasui, 1975; Almeida *et al.*, 1981; Schobbenhaus *et al.*, 1984). Localmente, ocorrem intercalados aos filitos lentes de metadolomitos, metamargas, quartzitos, calciosilicáticas, metabásicas ou metaconglomerados. Posteriormente, estas rochas foram divididas nos grupos Serra do Itaberaba, contendo três sequências - vulcão-sedimentar, clasto-química e clástica -, e São Roque, essencialmente clástica (Juliani, 1992).

Os metassedimentos ao sul e sudoeste da bacia foram reunidos no complexo Pilar pertencente ao Grupo Açuengui, a designação de Complexo Embu (Hasui & Sadowski, 1976) tem sido dada às rochas gnáissicas e migmatíticas que contêm bandas micáceas xistosas, muitas vezes caracterizando xistos, formados essencialmente por biotita, e bandas gnáissicas ou de mobilizados neossomáticos. As rochas desta unidade estão a leste da Bacia, como faixas estreitas intercaladas no Complexo Paraíba do Sul e, a oeste, em contato com os metassedimentos do Grupo Açuengui (Machado Filho *et al.*, 1983).

4.4 Sedimentação na Bacia de São Paulo

Geomorfologicamente, a Bacia de São Paulo está inserida no Planalto Paulistano. Este planalto abrange uma área de cerca de 5.000 km² com altitude média de 810 m, apresenta relevo suave e drenagens meandrantes que seguem a montante da soleira de Barueri, na Serra do Japi. A estratigrafia desta Bacia até o final da década de 1980 era indefinida e todo o conhecimento existente sobre ela provinha, principalmente, de dados geotécnicos que caracterizavam as argilas e areias da bacia sem que houvesse correlações geológicas. Riccomini (1989), em seu trabalho sobre o Rift Continental do Sudeste do Brasil, realizou estudos na bacia em busca de correlação com as que ocorrem adjacentes, como a Bacia de Taubaté e a Bacia de Resende, e definiu um quadro litoestratigráfico para a bacia (Figura 2).

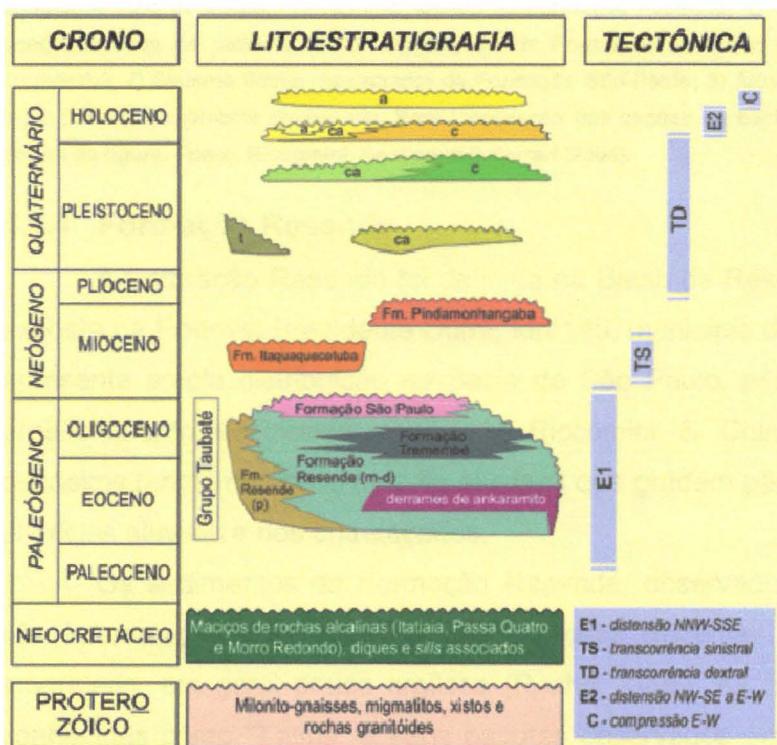


Figura 2 – Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RSCB. Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados à planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c - depósitos coluviais; ca - depósitos colúvioaluviais; a - depósitos aluviais. Fontes: modificado de Riccomini, Sant'anna & Ferrari (2004).

Nessa nova concepção, Riccomini (1989) e Riccomini e Coimbra (1992) interpretam os sedimentos como continentais terciários numa sequência basal de idade paleógena que reúne, do Grupo Taubaté, as Formações Resende, Tremembé e São Paulo, sotopostas em discordância pela Formação Itaquaquecetuba (Figura 3).

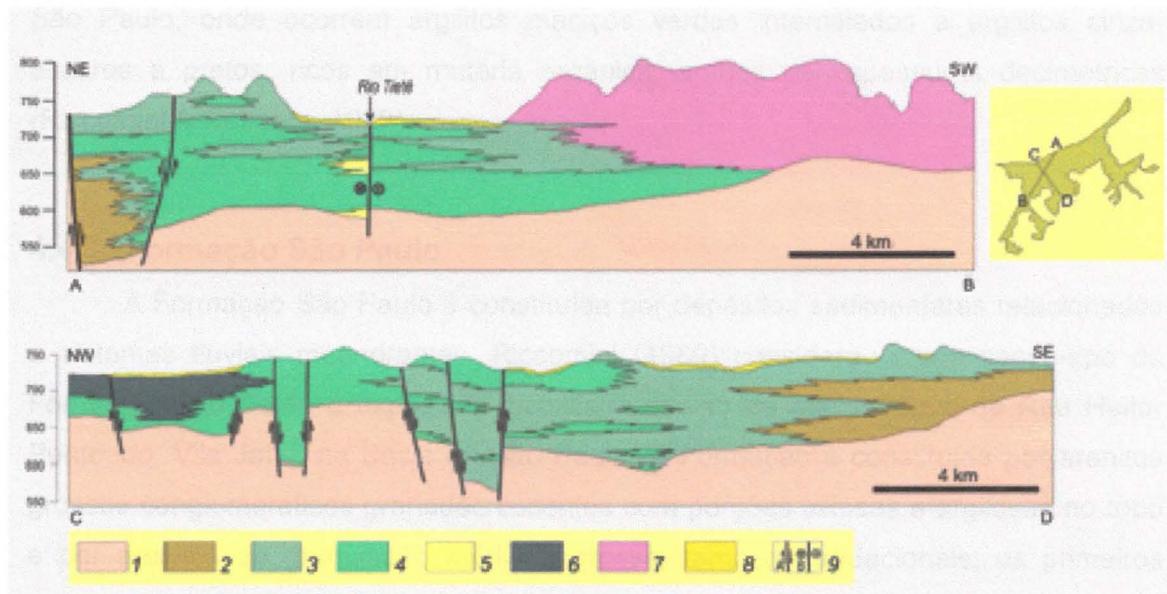


Figura 3 – Seções geológicas da Bacia de São Paulo 1) Embasamento Pré-Cambriano; 2) Orthoconglomerados e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) Lamitos de leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) Lamitos de leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) Predominância de areias grossas e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 6) Sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) Sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) Aluviões quaternários; 9) Falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B). Para localização das seções na bacia, ver esquema no canto superior direito da figura. Fonte: Riccomini, Sant'anna & Ferrari (2004).

4.4.1 Formação Resende

A Formação Resende foi definida na Bacia de Resende e sua seção-tipo está exposta na Rodovia Presidente Dutra, km 145, município de Resende (RJ). A unidade apresenta ampla distribuição na Bacia de São Paulo, perfazendo cerca de 80% do preenchimento sedimentar, segundo Riccomini & Coimbra (1992). Ela engloba depósitos fanglomeráticos (leques aluviais) que gradam para depósitos relacionados a planícies aluviais e rios entrelaçados.

Os sedimentos da Formação Resende, observados na Bacia de São Paulo, são intercalações de argilas pouco arenosas cinzentas e areia siltosa cinzenta e amarelada, em geral pouco argilosa (Rocha, 1995). As argilas dessa formação são conhecidas como “Taguá” e seus pacotes observados em escavações do metrô, na região da Vila Prudente, predominam em relação aos pacotes arenosos também denominados como “Areias basais”.

4.4.2 Formação Tremembé

A Formação Tremembé foi descrita na cidade de Tremembé, Vale do Paraíba, e sua ocorrência, na Bacia de São Paulo, foi observada na parte centro-norte em escavações para a construção da Estação Barra Funda da Cia. do Metropolitano de

São Paulo, onde ocorrem argilitos maciços verdes intercalados a argilitos cinza-escuros a pretos, ricos em matéria orgânica, ambos de espessuras decimétricas (Riccomini & Coimbra, 1992).

4.4.3 Formação São Paulo

A Formação São Paulo é constituída por depósitos sedimentares relacionados a sistemas fluviais meandrantes. Riccomini (1989) considerou como seção-tipo da Formação São Paulo a exposição localizada abaixo da caixa-d'água da Rua Heitor Penteado, Vila Jataí, na Bacia de São Paulo. A Formação é constituída por arenitos grossos conglomeráticos granodecrescentes com porções siltosas e argilosas no topo e por arenitos de granulação média a grossa, também gradacionais; os primeiros apresentam estratificações cruzadas e os segundos, estratificações plano-paralelas.

A Formação São Paulo recobre concordantemente a Formação Resende e tem grande persistência lateral (Riccomini, 1989). Apresenta variações bruscas de permeabilidade e ocorrências frequentes de concreções limoníticas entre as camadas arenosas, o que torna sua identificação pormenorizada de grande importância para obras subterrâneas.

4.4.4 Formação Itaquaquecetuba

A Formação Itaquaquecetuba (Coimbra *et al.*, 1983) representa um sistema fluvial entrelaçado, ocorrendo sob aluviões das principais drenagens da Bacia de São Paulo e também em Carapicuíba, região do Pari e Cidade Universitária, (Riccomini et AL, 1992); contudo, sua área tipo foi determinada em portos de areias na cidade de Itaquaquecetuba, às margens do Rio Tietê. É constituída de areias grosseiras com conglomerados, blocos e matações sem argilas (Rocha, 1995), que ocorrem assentados diretamente sobre rochas do embasamento pré-cambriano, sem que tenha sido verificada a sua relação com as demais unidades sedimentares da bacia.

4.5 Abrasividade do arcabouço geológico da RMSP

Pouco se sabe sobre a abrasividade do arcabouço geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Isso se deve ao recente processo de mecanização e, consequentemente, o recente interesse em prever o desgaste das ferramentas de corte e perfuração e a implicação no resultado final da obra, tendo em vista evitar imprevistos geológicos e prejuízos econômicos e humanos (Azevedo, 2002).

Ribeiro (2010) analisou ensaios de abrasividade de um pequeno grupo representativo de amostras das principais rochas encontradas no Brasil, dentre elas o

biotita monzogranito porfirítico do Complexo Embu que ocorre na região de Suzano, parte leste da Bacia de São Paulo. Neste estudo, foi verificada, por comparação de métodos de ensaio, a alta abrasividade do Granito Mauá (biotita monzogranito porfirítico), rocha do Complexo Embu.

Monteiro *et al* (2011) apresentaram no 13º Congresso de Geotecnia um estudo da abrasividade das rochas do embasamento cristalino da Bacia sedimentar de São Paulo. Nesse trabalho, os autores analisaram ensaios de amostra de granitos pertencentes à unidade dos granitóides intrusivos existentes na zona norte de São Paulo e rochas gnáissicas do Complexo Embu. Os granitos foram classificados como extremamente abrasivos enquanto as rochas gnáissicas foram classificadas como abrasivas.

5 Métodos de escavação

Os métodos de escavação são:

- Perfuração e detonação ou método mineiro, utilizado principalmente para rochas e solos muito rígidos.
- Mecanizada, utilizada principalmente para condições de rochas brandas, solos moles (tuneladoras, perfuratrizes, etc).

Ambos os métodos podem ser utilizados no mesmo projeto, dependendo da variação geológica geotécnica do maciço. A escolha do método fica a cargo do contratante, depois de feita a análise dos resultados investigativos (sondagens, ensaios, etc).

5.1 Perfuração e detonação

A princípio, qualquer maciço pode ser escavado a fogo, dependendo da heterogeneidade do terreno, do comprimento do túnel, da seção transversal da obra e da escolha do método mais viável para a execução da obra. A técnica mais usual é o desmonte por bancada em seção parcial com atenção na estabilização do maciço. Neste trabalho, trataremos do método de Trincheira ou VCA (Vala a Céu Aberto) e NATM (*New Austrian Tunneling Method* – Novo Método Austríaco).

5.1.1 Trincheira ou VCA

O VCA é um método construtivo raso, sua abrangência vertical é de até 20 m de profundidade e tem por característica ser um método invasivo destrutivo, ou seja, para a realização da obra há significativa interferência na superfície. Pode ser utilizado

nas mais variadas condições geológicas e em obras de qualquer amplitude horizontal. Esse modelo de obra é recomendado para áreas pouco urbanizadas, onde questões imobiliárias e viárias (Metrô)

Os procedimentos para execução de obras no VCA são:

- Abertura de valas
- Aplicação de suportes laterais provisórios
- Aplicação de suportes laterais definitivos
- Construção do teto

“O VCA, também conhecido como *cut-and-cover*, foi o método mais utilizado para a construção da Linha 1 - Azul, tendo sido aplicado de forma contínua no trecho entre Jabaquara e Liberdade” (Metrô).

5.1.2 Novo Método Austríaco (NATM)

O NATM foi desenvolvido no final da década de 1950 e começo da década de 1960, baseado nos métodos utilizados na mineração; por isso, também é conhecido como método mineiro. Um dos principais idealizadores, e a quem é atribuída a autoria do método, é Rabcewicz que, em 1964, publicou os princípios e a metodologia desse novo método de abertura subterrânea.

Nessa publicação, o NATM é caracterizado como um conjunto de métodos e princípios que abordam o comportamento do maciço rochoso sob carga, monitorando-o durante e depois da abertura da frente de escavação. Em linhas gerais, o método de abertura subterrânea com o NATM é executado em etapas cíclicas de escavação, com aplicação do suporte primário, aplicação do suporte secundário e monitoração (Rabcewicz, 1964).

O método NATM apresenta grande versatilidade quanto ao tipo do terreno e às dimensões das obras. Tal adaptabilidade decorre da adequação das características dos terrenos encontrados ao método de escavação. Para tanto, é realizado o acompanhamento visual da frente e a monitoração das paredes, superfície, comportamento do terreno sobre o teto, das construções sobrejacentes e controle do nível e pressões hidrostáticas.

Os procedimentos para execução de uma obra em NATM podem ser discriminados em método de escavação e abertura da frente, aplicação dos suportes

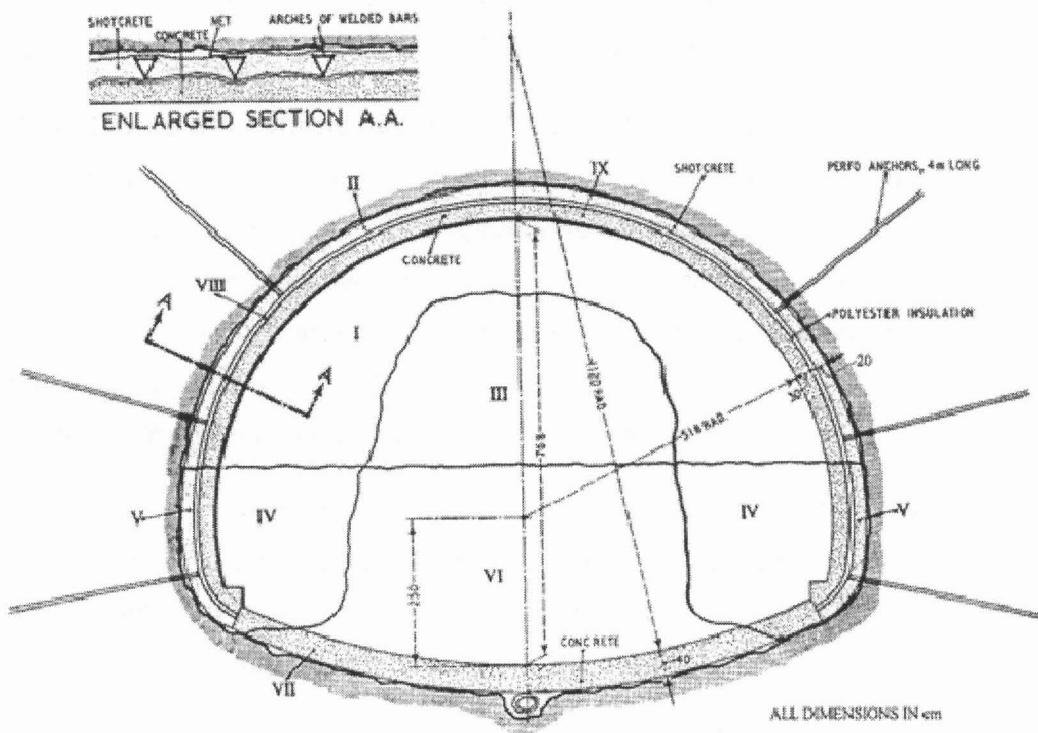
primários e secundários e completo monitoramento durante e depois da abertura do túnel e da aplicação dos suportes.

Uma das técnicas mais comuns de escavação é a por bancada, onde se cava primeiramente o teto ou calota, depois, o primeiro rebaixo ou bancada e, por fim, o segundo rebaixo ou arco invertido. Essa técnica é aplicada em condições de maciços pouco coesos e locais com grande pressão hidrostática.

O suporte primário tem a função de absorver e equilibrar as tensões iniciais impostas na abertura do maciço. Esse suporte é feito pela aplicação de concreto projetado associado a outros elementos, como cambotas metálicas, chumbadores e fibras no concreto, conforme a capacidade autoportante do maciço.

O suporte secundário é aplicado após o alívio das tensões iniciais e depois que todas as deformações estejam controladas e calculadas. Então é realizada a aplicação de concreto projetado em espessuras definidas e específicas para o projeto.

O monitoramento é realizado com uma intensa instrumentação nas paredes internas da obra e na superfície. Esse procedimento visa medir as deformações internas, o recalque na superfície, as variações no maciço e as construções sobrejacentes de modo a prevenir o comportamento anômalo. A figura 4 apresenta um modelo de túnel (Rabczewicz, 1964) cavado pelo método NATM.



O NATM pela versatilidade e segurança de execução, todavia, tem sido utilizado para construção do metro de São Paulo em obras cuja abertura do vão e a extensão do túnel não sejam viáveis à utilização dos métodos mecanizado, principalmente, em tuneis curtos de acesso e ventilação e nas grandes aberturas para estações.

5.2 Escavação Mecanizada

As escavações por método mecanizado estão se tornando usuais e competem economicamente e na versatilidade com os métodos de escavação a fogo. A velocidade de avanço, a possibilidade de atuar sem passivos ambientais e a segurança operacional fazem com que uso de autoperfuratrizes seja preferível aos demais métodos. Capazes de perfurar desde terrenos moles a rochas intactas com resistências superiores a 60 MPa, atingindo a velocidade para perfurar a seção plena em até 30 m/dia em rocha branda, essas características amortizam o alto valor do equipamento e o tornam economicamente vantajoso em relação aos métodos convencionais (Francis & Rocha, 1998).

O registro do uso desse equipamento remonta ao final do século XIX, quando Brunel utilizou, pela primeira vez, uma máquina para escavações nas obras do túnel sob o Rio Tâmisa, em Londres Brunel (Pike, 2005).. O tipo e o dimensionamento das tuneladoras, TBMs, EBPMs (*Earth Pressure Balanced Machine*) e Shields a serem utilizadas dependerão das características geomecânicas das “rochas”, distintas em rochas “duras” e em rochas “brandas” (Francis & Rocha, 1998).

5.2.1 Obras em rochas “brandas” ou solos pouco coesos

Em condições geológicas de solos ou rochas brandas, o uso de tuneladoras requer maior atenção devido à dificuldade de controlar as pressões de frente e operar em solos com alta condutividade hidráulica, sob cargas variáveis de água e variações bruscas de tensões geoestáticas. Nesse caso, são utilizadas Shields e EPBMs, máquinas que operam com o controle de pressões, limpeza e lubrificação da cabeça de corte com a injeção de água e lama (bentonita) (Figuras 5 e 6).

Túneis nessas condições sempre constituíram grandes desafios, como os enfrentados e solucionados por Marc I. Brunel em 1825. EPBMs são capazes de cavar seções plenas, circulares, com média de 10 m de diâmetro, já tendo atingido valores de 15,2 m (EPBs, obra de um túnel em Madri, 2007).

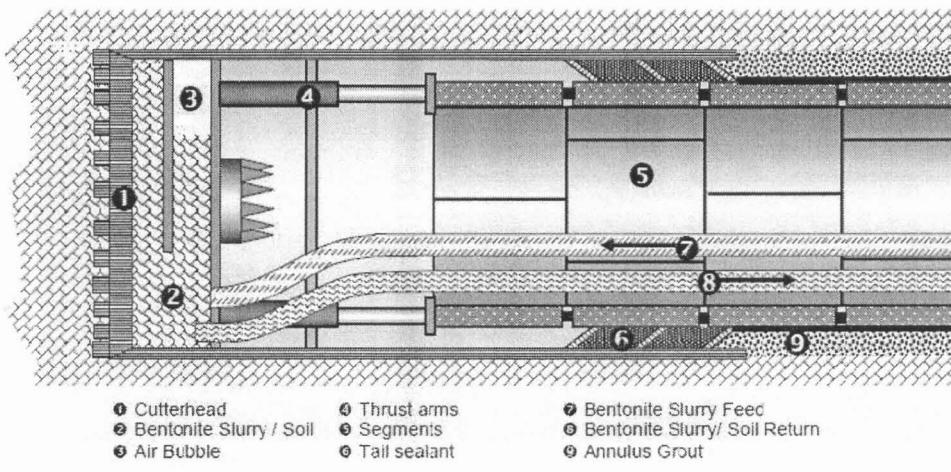


Figura 5 – Representação esquemática de Shield. Fonte: EFNARC, Abril 2005.

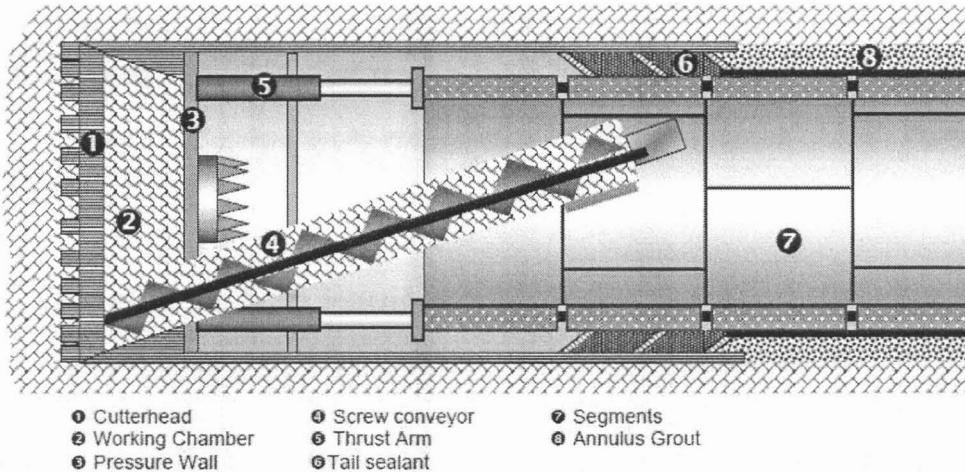
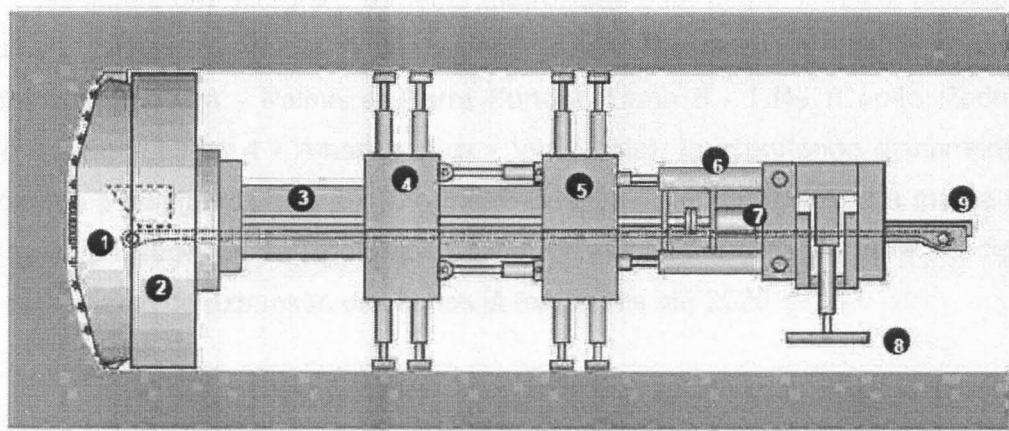


Figura 6 – Representação esquemática de EPBM. Fonte: EFNARC, Abril 2005.

No metro de São Paulo foram utilizadas tuneladoras, EPBMs ou *Shields*, primeiramente na obra da linha 1 Azul para os trechos em que o traçado passava pelo centro da cidade, região densamente urbanizada e que alterações na superfície seriam inviáveis. Desde então tem sido utilizado em todas as linhas para os túneis de via.

5.2.2 Obras em rochas “duras” (*Tunnel Boring Machine - TBM*)

Tuneladoras para rochas duras têm sido usadas por décadas, o que resulta em grande experiência. De forma simplificada, uma TBM funciona com uma cabeça giratória equipada com ferramentas de corte que avança impulsionada por macacos hidráulicos apoiados em anéis, já colocados durante o avanço do túnel, e pressiona os cortadores (normalmente cortadores de disco) contra a face da escavação; estes penetram na rocha, pulverizando localmente a superfície de contato e gerando intensas tensões de cisalhamento (Figura 7).



Seitenansicht TBM

- | | | |
|----------------------|------------------------|-------------------|
| 1 Cutter Head | 4 Front Gripper System | 7 CH-Drive Motors |
| 2 Cutter Head Jacket | 5 Rear Gripper System | 8 Rear Support |
| 3 Inner Kelly | 6 Thrust Cylinder | 9 Muck Conveyor |

Figura 7 – Representação esquemática de TBM para rochas “duras”. Fonte: EFNARC, Abril 2005.

6 O Metrô de São Paulo

A Companhia do Metropolitano de São Paulo foi constituída no dia 24 de abril de 1968. Inicialmente, optou-se pela construção da linha Norte-Sul Jabaquara-Santana, hoje linha 1 – Azul. Atualmente, o metrô de São Paulo possui cinco linhas operando em 70,6 quilômetros de rede, com 62 estações e 984 carros. No ano de 2010, foram transportados 1.044 milhões de passageiros (Metrô).

O metrô de São Paulo, o primeiro do Brasil escavado sob área urbana, foi o marco para o desenvolvimento da geotecnica na construção de túneis do país. Escavado sob uma região densamente povoada e em substrato heterogêneo então geologicamente desconhecido, o metrô trouxe, com o decorrer do seu desenvolvimento e a partir das dificuldades encontradas, e também por conta de uma política de transferência de tecnologia, um vasto conhecimento geológico e avanços tecnológicos para esse tipo de obra no Brasil.

Dentre as principais inovações implantadas nesse modelo de obra no Brasil estão a construção de túneis superpostos, o rebaixamento do nível d’água, a utilização de anéis de revestimento em aço e em concreto, a estabilização de fundações (de construções em superfície), o uso intensivo de tuneladoras (*Shields*), além da consolidação do uso do NATM para obras em áreas urbanas e dos métodos para equilibrar pressões em frentes de escavações.

As linhas que integram a malha metroviária são: Linha 1 - Azul (Jabaquara - Tucuruvi), Linha 2 - Verde (Vila Prudente - Vila Madalena), Linha 3 - Vermelha (Corinthians-Itaquera - Palmeiras-Barra Funda), Linha 5 - Lilás (Capão Redondo - Largo Treze) e Linha 4 - Amarela (Luz - Vila Sônia), transportando diariamente 3,6 milhões de passageiros. Em 2010, o metrô de São Paulo ultrapassou a marca de 20 bilhões de passageiros transportados desde a sua inauguração, em 1974. Na figura 8 tem-se o projeto de expansão das linhas já existentes até 2020.

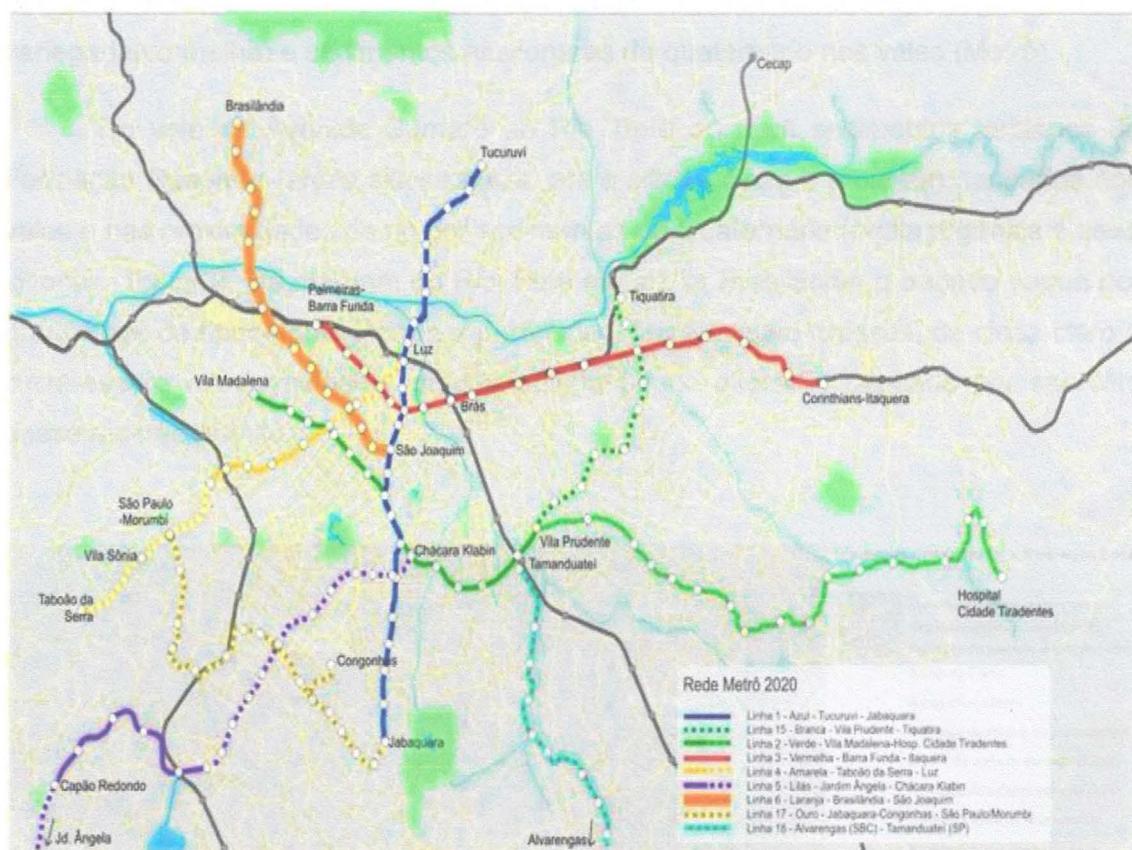


Figura 8 - Projeto para o metrô até 2020. Fonte: Metrô.

6.1 A Linha 6 – Laranja

A Linha 6 – Laranja interligará a região da Vila Brasilândia (NNE) ao terminal São Joaquim Linha 1 - Azul (centro da cidade de São Paulo). O trecho definido para a execução da obra possui variações geológicas e geomorfológicas diferentes das demais onde foram construídas as linhas já existentes. O traçado passará por uma região com grande diferença topográfica, atravessando espigões em cota máxima e vales em cota mínima além de cruzar drenagens; por isso, todo o trecho está sendo projetado em subterrânea com túneis e estações em grandes profundidades.

6.1.1 Geologia local

O traçado da linha parte da estação São Joaquim, onde atravessa o maciço terciário posicionado no limite de transição entre a Formação São Paulo (areia argilosa variegada e argila arenosa variegada/vermelha) e a Formação Resende (argila siltosa cinza, areia siltosa cinza e amarela). Rumo a NNE, nas proximidades do Vale do Pacaembu, o traçado segue em gnaisses graníticos do Complexo Gnáissico-Migmatítico do Complexo Embu mediamente alterados e saprolito gnáissicos, capeado por sedimentos da Formação São Paulo (areia argilosa variegada e argila arenosa variegada/vermelha) e sedimentos aluvionares do quaternário nos vales (Metrô).

Do vale da Avenida Sumaré ao Rio Tietê ocorrem sedimentos terciários da Formação Resende (argila siltosa cinza, areia siltosa cinza e amarela) capeados nos vales e nas proximidades do rio por sedimentos do Quaternário (argila orgânica e areia siltosa) - figura 9. Da margem do Rio Tietê até a Vila Brasilândia o traçado segue por granitóides de tipos homogêneos e porfiróides, finos a muito grossos, de cinza-claro a cinza-escuro e avermelhado, mediamente a pouco alterado, capeado por saprolito desse mesmo granito.

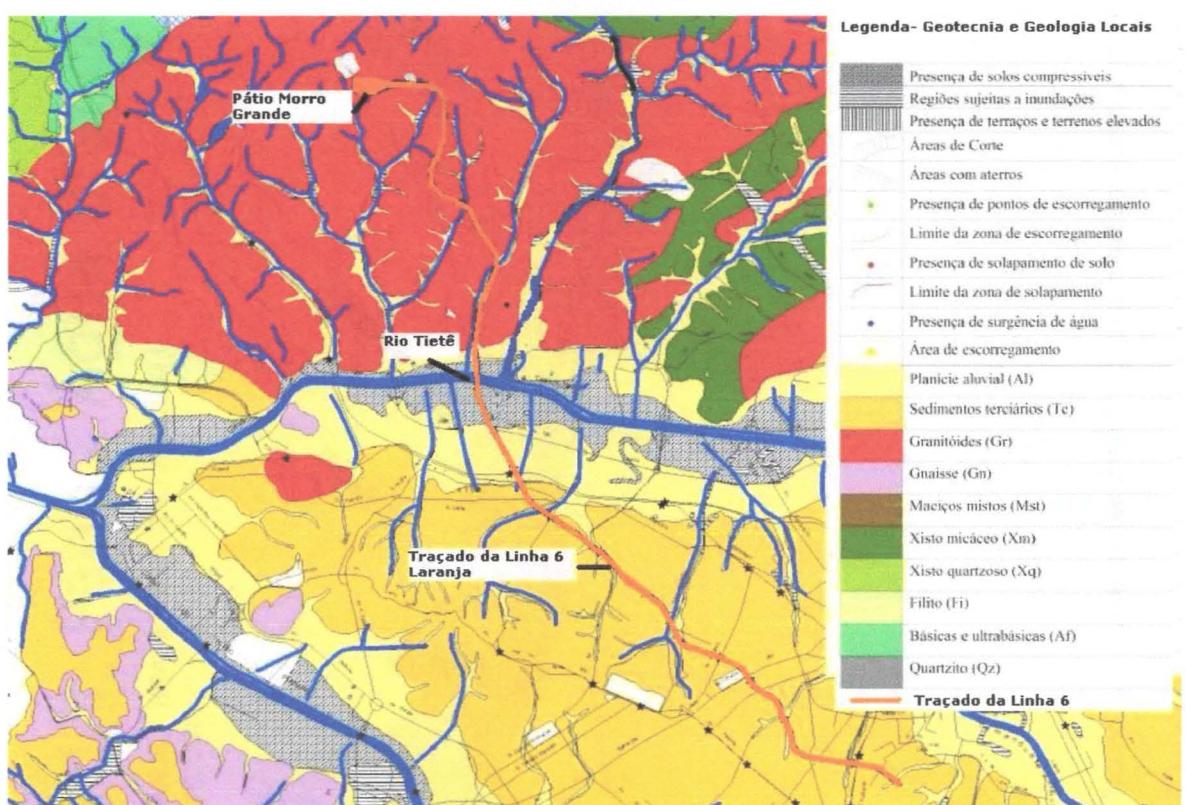


Figura 9 - Carta geotécnica do município de São Paulo com indicação do traçado da Linha 6 – Laranja do metrô. Fonte: Metrô.

As figuras 10 e 11 apresentam um perfil simplificado do traçado da Linha 6.

Parte 1 : Pátio / Água Branca

LINHA 6 - LARANJA - BRASILÂNDIA- SÃO JOAQUIM
PERFIL LONGITUDINAL

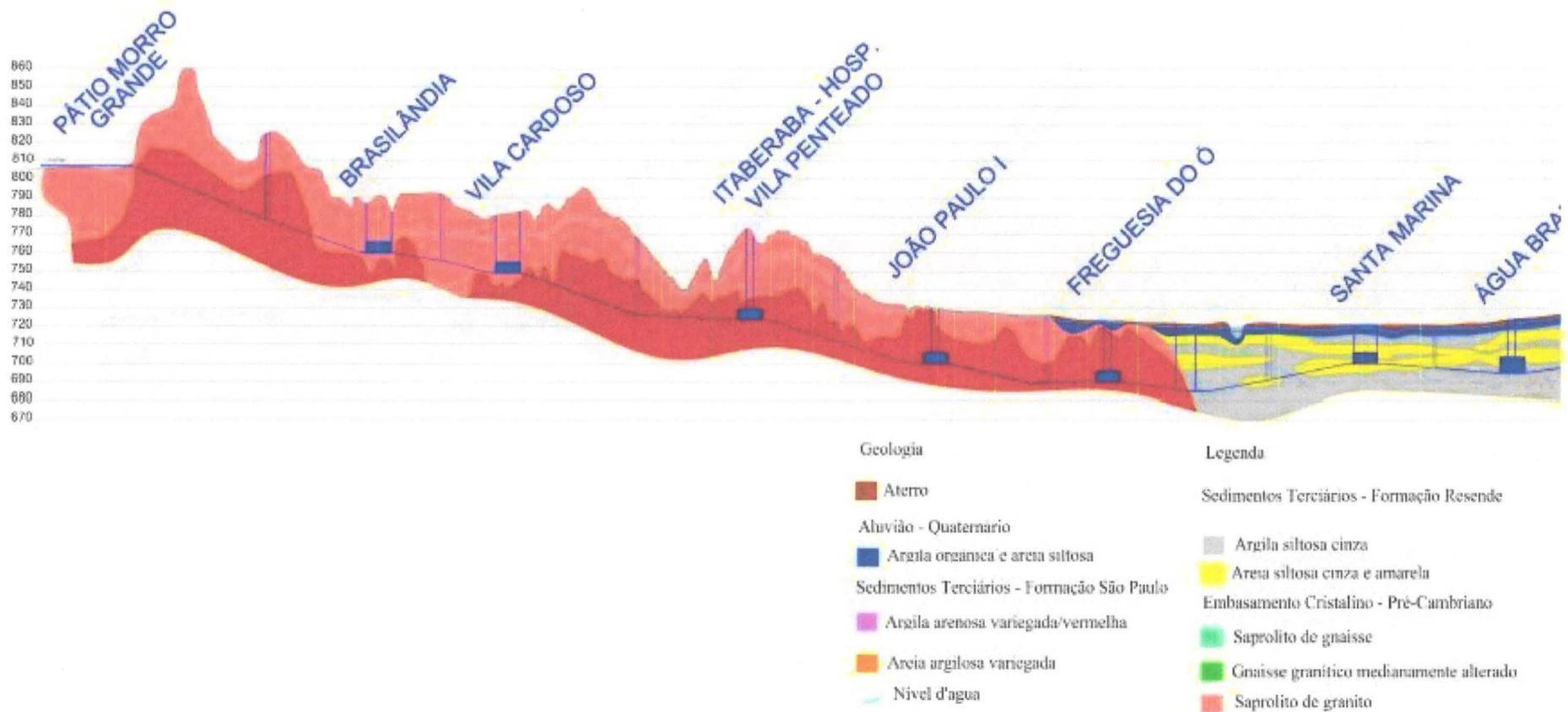


Figura 10 – Trecho mais periférico da Linha 6 - Laranja a ser escavado predominantemente no embasamento cristalino. Fonte: Metrô de São Paulo.

Parte 2 : Água Branca / S. Joaquim

LINHA 6 - LARANJA - BRASILÂNDIA- SÃO JOAQUIM
PERFIL LONGITUDINAL

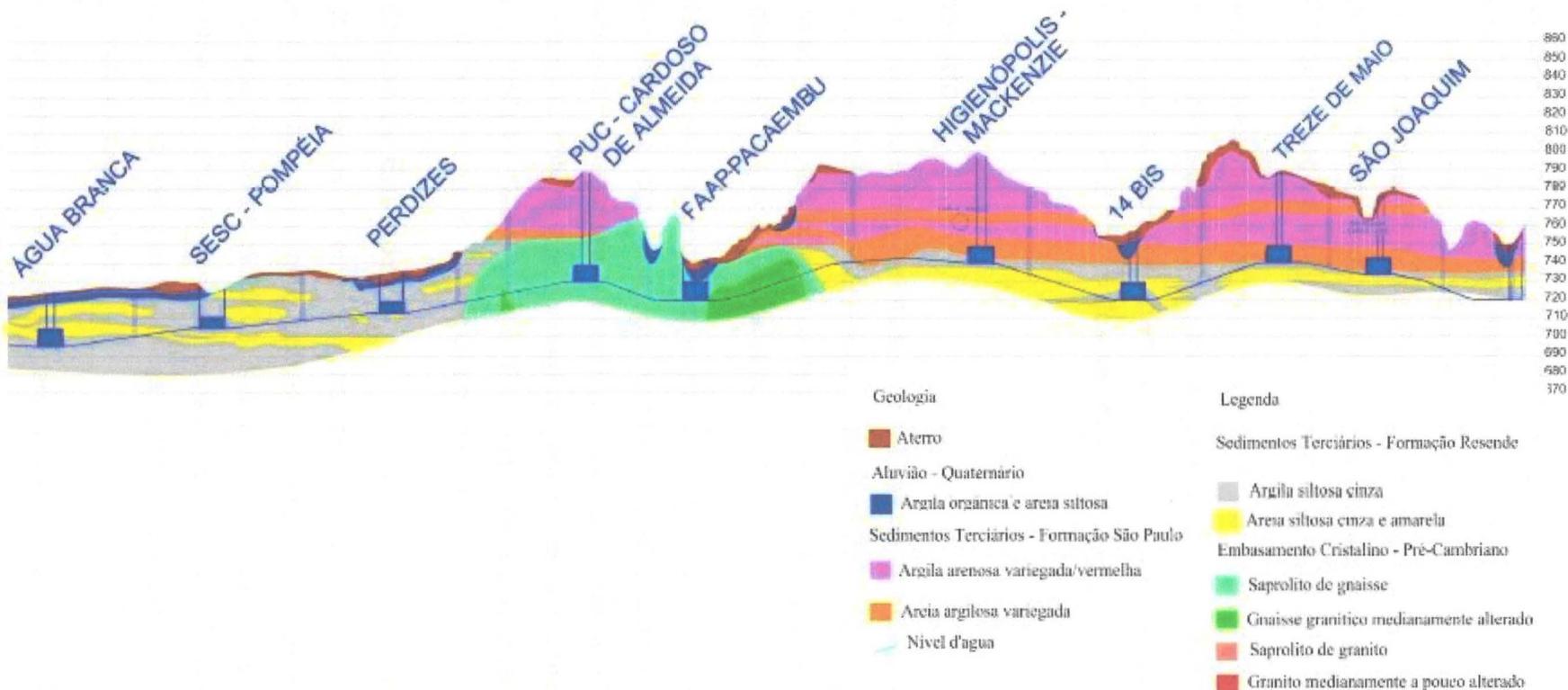


Figura 11 – Trecho mais periférico da Linha 6 - Laranja, a ser escavado predominantemente na bacia sedimentar. Fonte: Metrô de São Paulo.

6.1.2 Obras e métodos construtivos

Está prevista também a construção de 13 poços de ventilação e dez poços de saída de emergência ao longo do traçado. O método previsto para a execução dos túneis (saída de emergência e ventilação), poços e estações será misto. Os túneis serão executados com tuneladoras EPB, no Pacaembu através do NATM (*New Austrian Tunnelling Method*) e algumas estações serão construídas pelo método de Vala a Céu Aberto (VCA) ou em seções múltiplas (tuneladoras + NATM) (METRÔ).

A escolha desse sistema visa obter maior rapidez e menor interferência no meio ambiente, visto que a maior parte da obra será realizada com tuneladoras, o que evita e/ou minimiza recalques na superfície, além de não haver a necessidade de rebaixamento do nível freático e de uso de explosivos, diminuindo com isso o impacto ambiental.

7 Materiais e métodos

Para esse trabalho foram analisados resultados de ensaios de caracterização de rochas e solos obtidos junto ao Metrô de São Paulo. Esse material foi conseguido a partir de sondagens rotativas e percussivas realizadas nas vizinhanças do trajeto programado para a implantação da Linha 6 - Laranja do metrô.

As amostras obtidas por meio de sondagens rotativas são granitos e gnaisses do embasamento cristalino, foram discriminadas por trechos, testadas para o índice CERCHAR, compressão axial, compressão diametral e análise petrográfica – Tabela 01 no anexo I. As amostras obtidas por sondagens percussivas são areias dos sedimentos terciários (Formação São Paulo e Formação Resende) que foram ensaiadas para análise de granulometria - Tabela 02 no anexo I.

7.1 Métodos e técnicas de Ensaios

Existem mais de 200 testes e ensaios para determinação da dureza e abrasividade de solos e rochas, cada qual aplicado a litologias e ferramentas diferentes - fresas ou brocas (Thuro *et al*, 2003). Nesse contexto, foram utilizados, para as amostras da obra da Linha 6, ensaios “consagrados” no meio geológico-geotécnico que fornecem informações geomecânicas fundamentais para identificar, além de outras coisas, a abrasividade da rocha.

Os resultados dos ensaios escolhidos para análise foram CERCHAR, compressão uniaxial, compressão diametral, análise granulométrica e quartzo equivalente. Embora esses ensaios sejam eficientes para os parâmetros investigados,

serão abordados nesse trabalho os testes LCPC e NTCU visando discutir a possibilidade de testar unidades geológicas pouco coesas e de granulometria fina quanto à abrasividade.

7.1.1 CERCHAR

CERCHAR é um teste para determinar a abrasividade de rocha, amplamente utilizado na Europa, desenvolvido pelo Centre d'Etudes et de Recherches de des Charbonnages de France – CERCHAR. É utilizado por empresas de mineração e de geotecnica para gerenciar e prever o desgaste das ferramentas de corte e furo (brocas, fresas, etc) (West 1989; Plinninger et al, 2003). O teste CERCHAR consiste em medir o desgaste em uma ponteira de aço (dureza de 200 kg/mm²), de 90° de ângulo de cone, ao “riscar” uma amostra fixa. A ponteira é aplicada à superfície de uma amostra de rocha com uma força de 70 N.

O índice de abrasividade CERCHAR (CAI) é então calculado a partir do diâmetro, em milímetros, de desgaste da ponteira (exemplo: um desgaste de 0,3 milímetros é igual a 3), medido em microscópio ou lupa binocular, com o valor médio de 2 a 5 testes (recomenda-se que o teste seja repetido cinco vezes em várias direções na superfície da amostra) individuais.

$$CAI = 10 \times \frac{d}{c}$$

Sendo

d Diâmetro do desgaste da ponteira

c Número de repetições

CAI Índice de abrasividade CERCHAR

Na figura 12 estão ilustrados dois modelos de dispositivos de testes CERCHAR em uso na atualidade; os valores do CAI obtidos em ambos são iguais.

A Figura 13 apresenta valores típicos de CAI determinado para certas litologias. Esses valores foram obtidos em testes realizados em rocha da Europa podendo assim ser discrepante aos valores brasileiros.

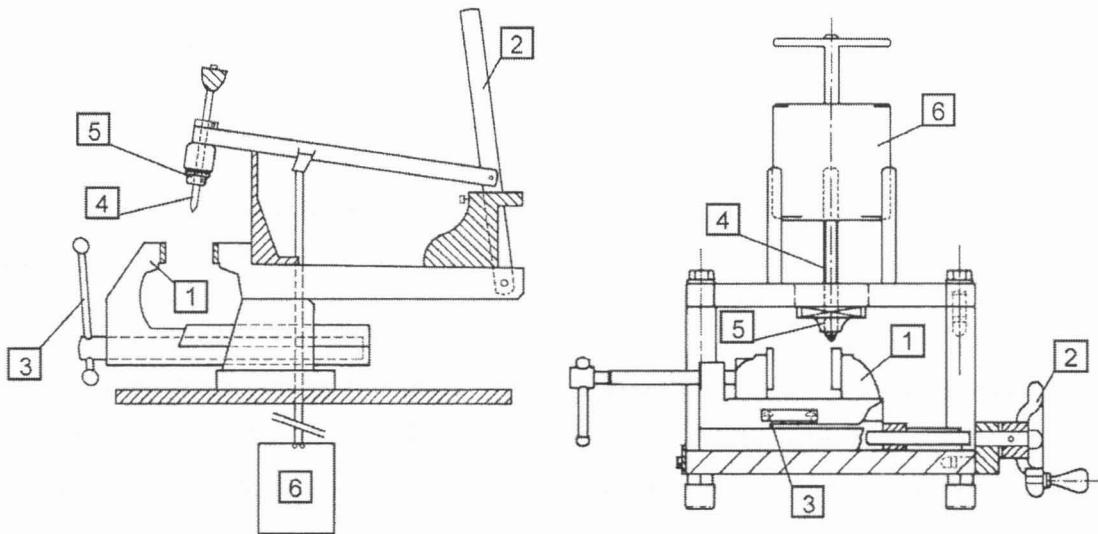


Figura 12 - Dispositivos de teste para determinar o índice de abrasividade CERCHAR. À esquerda, aparelho CERCHAR: 1, 2 e 3 – fixador da amostra, alavanca manual ; 4 - pinos de teste; 5 – fixador do pino; 6 – peso. À direita, aparelho do “oeste”; 1 – fixador de amostra; 2 - manivela; 3 – base para amostra ; 4 - pino guia testes; e 6 - peso. Fonte: Plinning et al, 2003.

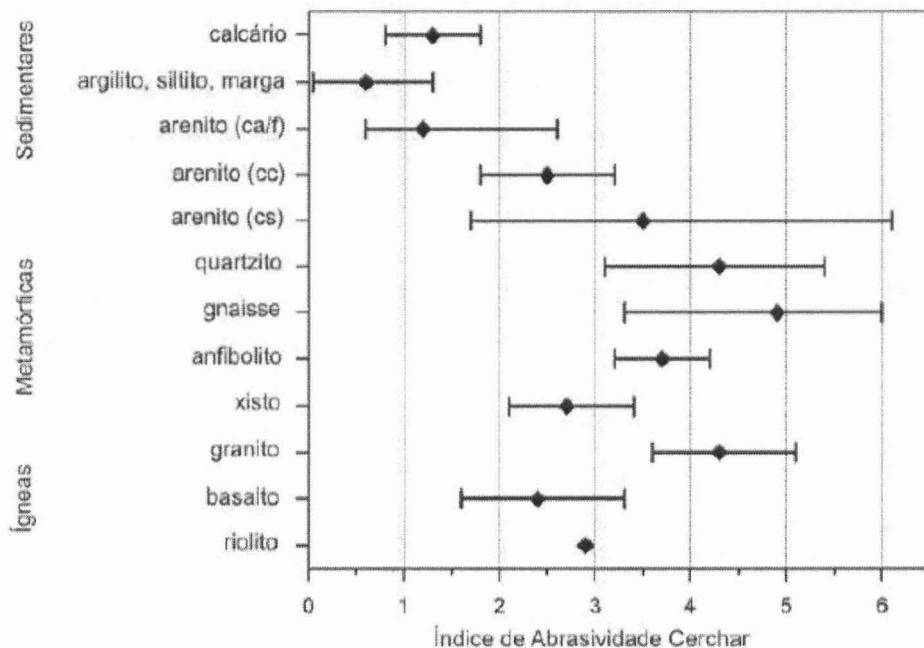


Figura 13 – Valores típicos de CAI para algumas rocha. Ca/f – matriz argilosa; cc – cimento carbonático; cimento silicoso. Fonte: Plinninger et al, 2003.

O teste pode ser realizado em corpos de rocha previamente preparados ou em faces de fraturas e apresenta diferença de 0.5 a mais para amostras com superfície áspera. No caso da realização do teste em amostras preparadas, cortadas e/ou

polidas, há a necessidade de corrigir os resultados; para tanto, usa-se a equação de correção para abrasividade CERCHAR.

$$CAI = 0.99 CAI_S + 0.48$$

Onde CAI, CERCHAR índice de abrasividade (superfícies "ásperas"), CAI_S; abrasividade CERCHAR índice (superfícies lisas "preparadas")

7.1.2 Compressão Uniaxial

Compressão uniaxial é um método utilizado para obtenção da tensão uniaxial das rochas. A tensão uniaxial é um parâmetro que indica a resistência da rocha ao cisalhamento quando submetida a esforços. Para a construção de túneis, o conhecimento da resistência da rocha implica diretamente na escolha e na vida útil das ferramentas de escavação.

A execução do teste de compressão uniaxial em rochas é realizada com corpos de prova cilíndricos (ou retangulares), previamente preparados, aos quais é aplicada uma tensão axial a área da base do corpo de prova. Os valores dos ensaios são obtidos no momento em que o corpo de prova se rompe.

Normas para ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o corpo de prova cilíndrico com as seguintes características (ISRM 2007):

- Comprimento 2,5 x diâmetro
- É desejável que o diâmetro do corpo de prova seja mais de 10 vezes superior ao maior grão mineral da rocha
- As faces do corpo de prova devem ser lisas e regulares, com irregularidades inferiores a 0,5 mm
- Os topos do corpo de prova devem ser perpendiculares ao eixo, com tolerância máxima de 0,25°

7.1.3 Compressão diametral

O método de compressão diametral ou Método Brasileiro é utilizado para a determinação da resistência à tração indireta de um corpo de prova cilíndrico. O método, desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro (Carneiro, 1943), antes utilizado somente para testar corpos de prova de concreto, se popularizou graças à simplicidade e rapidez na execução. O método consiste na aplicação de duas forças

diametralmente opostas numa extensão de corpo cilíndrico de forma que a tensão aplique-se uniformemente por toda a extensão do corpo.

O Método Brasileiro é prescrito pela ABNT NBR 7222:2010. Embora o método tenha sido elaborado para aplicação em corpos de concreto, a generalização para outros materiais, como asfalto e rocha, foi bem sucedida, com resultados bastante satisfatórios. As orientações ao uso do Método Brasileiro para ensaios de corpos de prova rochosos também estão descritas na ISRM 2007. A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela seguinte expressão:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi d L}$$

Sendo:

$f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio (kN);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = altura do corpo de prova (mm).

7.1.4 Equivalente quartzo

O teor equivalente em quartzo (*Equivalent Quartz Content - eQC*) é um índice determinado com base no conteúdo rochoso de minerais com dureza Mohs (Figura 14) maior que 5,5 (dureza Mohs aço). A alta dureza dos minerais constituintes de rocha diminui a vida útil das ferramentas de corte e perfuração, acentuando o desgaste por abrasão.

Figura 14. Tabela de dureza de Mohs

| Dureza | Mineral |
|--------|--|
| 1 | Talco, (pode ser arranhado facilmente com a unha) |
| 2 | Gipsita (ou Gesso), (pode ser arranhado com unha com um pouco mais de dificuldade) |
| 3 | Calcita, (pode ser arranhado com uma moeda de cobre) |
| 4 | Fluorita, (pode ser arranhada com uma faca de cozinha) |
| 5 | Apatita, (pode ser arranhada dificilmente com uma faca de cozinha) |
| 6 | Feldspato / Ortoclásio, (pode ser arranhado com uma liga de aço) |
| 7 | Quartzo, (capaz de arranhar o vidro. Ex.: Ametista) |
| 8 | Topázio, (a Esmeralda também possui esta dureza) |
| 9 | Corindon, (safira e rubi são formas de coridom) |
| 10 | Diamante, (é o mineral natural mais duro) |

O desgaste das ferramentas de perfuração ocorre pelo atrito do aço (dureza na escala de Mohs 5,5), material que constitui a maioria das ferramentas, com minerais com dureza superior a 5,5, especialmente o quartzo (dureza Mohs 7,0). Dessa forma, quanto maior a proporção de minerais com dureza superior e/ou com maior quantidade de quartzo, maior será a abrasividade da rocha e maior o desgaste das ferramentas utilizadas na escavação.

A determinação do índice equivalente em quartzo (eQc) é realizada através da análise modal, em lâmina delgada, dos minerais constituintes da rocha, e o cálculo é baseado no conteúdo mineral e calculado referindo-se à abrasividade ou dureza de quartzo Mohs 7,0 igual a 100%. Com base no exposto, a abrasividade das rochas, pelo conhecimento composicional-mineralógico da rocha, é obtida pela dureza relativa (escala de Mohs – Friedrich Mohs, 1812) e a dureza absoluta (dureza Rosiwall – Karl Rosiwal, 1896-1916) dos minerais (Ribeiro, 2010).

$$eQc = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i$$

Sendo:

eQc – Teor equivalente em quartzo em porcentagem;

R_i – Abrasividade Rosiwall do mineral;

A_i – Porcentagem em volume do mineral.

A abrasividade Rosiwall é calculada a partir da perda de volume gerada pelo atrito com mineral de coríndon:

$$R_i = [1000 \times PV_{corindon}] / [PV_{mineral}]$$

PV – Perda de volume

Na tabela 1 abaixo estão os valores obtidos nos ensaios realizados nas amostras analisadas neste trabalho.

7.1.5 Agregado miúdo – Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste em agrupar os componentes do solo de acordo com a textura (figura 15), composição e o tamanho das partículas. Embora não seja possível, com apenas esse procedimento, fornecer informações sobre o comportamento do maciço diante da intervenção de um projeto de obra subterrânea, esses dados são de extrema importância para as obras geotécnicas, pois a partir deles é possível classificar os grãos quanto a dureza, textura e tamanho, podendo assim estimar a abrasividade e a vida útil das ferramentas e perfuração em obras subterrâneas.

O método se baseia na peneiração e precipitação, sendo o primeiro para areias e cascalhos e o segundo, para siltes, siltes argilosos e argilas. O procedimento para este método está descrito na ABNT pela norma NBR NM 248/. As amostras ensaiadas estão descritas na Tabela 01.

Tabela 01 – Descrição das amostras ensaiadas

| Amostra | Descrição |
|---------|--|
| SP 6232 | Areia de coloração bege escuro |
| SP 6300 | Areia de coloração róseo claro |
| SP 6340 | Areia de coloração róseo claro acinzentado |
| SP 6348 | Areia de coloração bege róseo claro |
| SP 6391 | Areia de coloração bege claro acinzentado |
| SP 6398 | Areia de coloração amarela |
| SP 6233 | Areia de coloração alaranjada |
| SP 6254 | Areia de coloração cinza |
| SP 6274 | Areia de coloração branca acinzentada |
| SP 6356 | Areia de coloração bege clara |
| SP 6388 | Areia de coloração bege alaranjada |

7.1.6 O teste de abrasão LCPC

Existem vários métodos para determinar a abrasividade da rocha, porém, poucos estão estabelecidos no domínio do solo, especialmente areia e cascalho. Isso se deve ao fato de que muitos estudos sobre abrasividade de rochas estão direcionados ao maciço rochoso para o uso de TBMs; no entanto, a abrasividade do solo pode ter um forte impacto tanto no desempenho das ferramentas tuneladoras em grandes obras quanto em perfurações de pequenos diâmetros (Thuro *et al*, 2006).

Assim, o conhecimento preciso do solo tem tanta importância quanto o conhecimento dos maciços rochosos para a elaboração de projetos precisos com cálculo de custo, uso e desgaste de ferramentas, minimizando riscos além da execução de obras mais eficientes (Thuro *et al*, 2006). O método LCPC, introduzido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, é utilizado para testar a abrasividade do solo. O teste de abrasividade LCPC permite o controle de misturas representativas de amostras de solo contendo diferentes tamanhos de grão.

O dispositivo de teste LCPC abrasividade é descrito na norma francesa P18-579. O "abrasinmeter", aparato utilizado no teste, é construído com um motor de 750 W, no qual é preso um placa de metal que é colocado em um aparato contendo a amostra (Figura 15). O impulsor é uma placa de metal retangular com dimensões de 50 mm x 25 mm x 5 mm, feita de aço com uma dureza padrão Rockwell de B 60-75 (Figura 16). A placa de aço tem que ser trocado após cada teste (Thuro *et al*, 2006).



Figura 15. Aparelho de teste – “Abrasimeter”; 1 – Motor; 2 – Placa de metal; 3 – Suporte para amostra; 4 – Funil

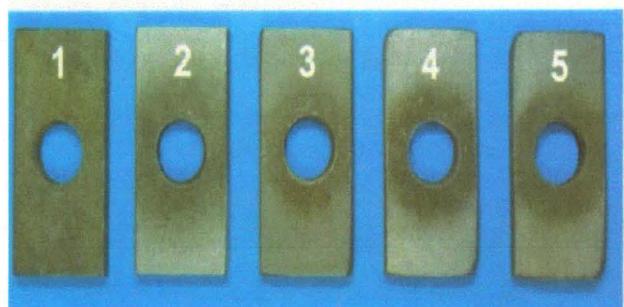


Figura 16. Placas de amostras. Antes (1) e depois do teste

O coeficiente de LCPC abrasividade LAC é calculado como a perda de massa do rotor dividida pela massa da amostra (500 g)

$$LAC = (m_0 - m) / M$$

Sendo:

LAC LCPC - Abrasividade Coeffizient [g /t]

m_0 - Massa do rotor de aço antes do LCPC teste [g]

m - Massa do impulsor em aço após LCPC teste [g]

M - Massa do material da amostra (= 0.0005t)

Na tabela 02 abaixo estão discriminados os valores médios para um grupo abrangente de materiais.

Tabela 02. Valores padrão de CAI, LAC e a Abrasividade. Fonte Thuro (2006)

| LAC[g/t] | CAI [0.1 m] | Abrasividade | Exemplo para rocha ou componentes do solo |
|-----------|-------------|-----------------------|--|
| 0-50 | 0.0 – 0.3 | Não abrasivo | Madeira, turfa, material orgânico |
| 50-100 | 0.3 – 0.5 | Muito pouco abrasivo | Argila siltosa, argilitos |
| 100-250 | 0.5 – 1.0 | Levemente abrasivo | Ardósia, arenito de granulação fina com matriz de argila, calcário, mármore |
| 250-500 | 1.0 – 2.0 | Abrasividade média | Calcário arenoso, mármore quartzoso |
| 500-1250 | 2.0 – 4.0 | Muito abrasivo | Arenito quartzítico, pórfiro, andesito, basalto, quartzo filito, xisto mica, anfibolitos |
| 1250-2000 | 4.0 – 6.0 | Extremamente abrasivo | Quartzo de veios, quartzitos, granitos, dioritos, sienitos, eclogitos, gnaisses, anfibolitos duros |

Thuro *et al* (2006) obteve valores de LCA para massas com proporção de 50% e 70% em grãos com diâmetro médio em relação à massa total utilizando materiais de diferentes composições - assim foram obtidos valores teóricos próximos às composições naturais dos solos. A partir desses valores, o autor plotou gráficos correlacionando tamanho x LAC x CAI x Composição (Figura 17 e 18).

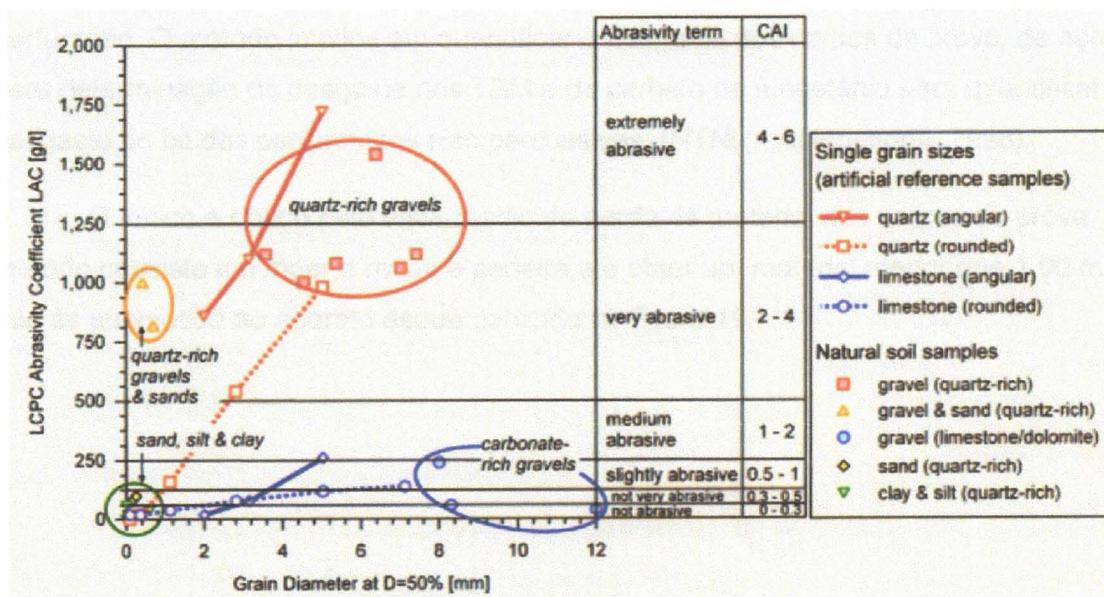


Figura 17 - Coeficiente de abrasividade em função do diâmetro médio de grão na proporção de 50% de grãos no total da massa de solo. Fonte Thuro et al (2006)

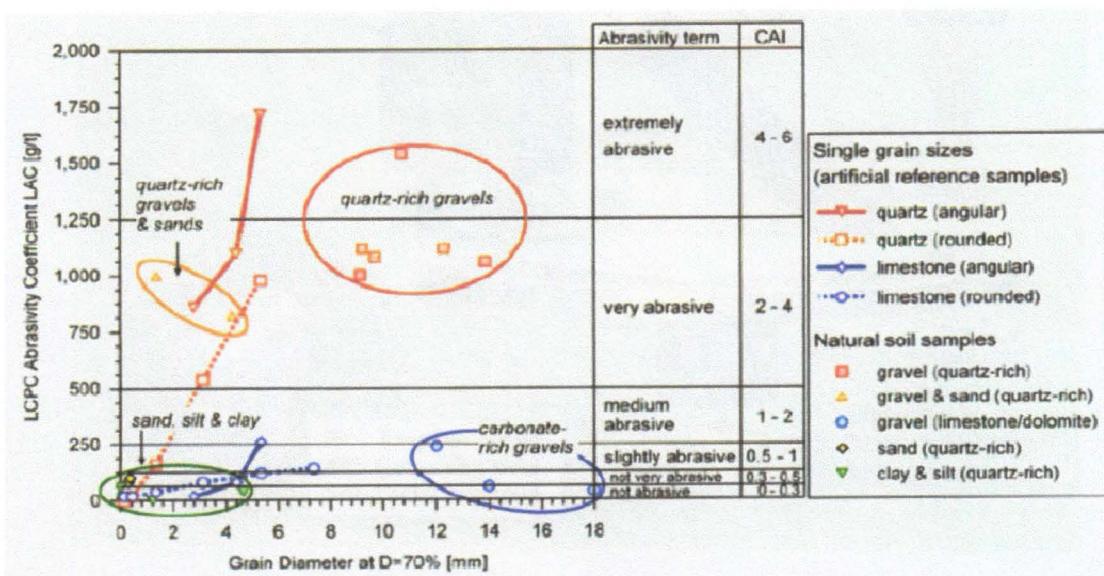


Figura 18 - Coeficiente de abrasividade em função do diâmetro médio de grão na proporção de 70% de grãos no total da massa de solo. Fonte Thuro et al (2006)

7.1.7 O teste de abrasão NTNU

É um método utilizado para determinar a taxa de perfuração da rocha com o uso de rotopercussivas tuneladoras. Desenvolvido no departamento de Geologia de Engenharia do Instituto Norueguês de Tecnologia (NTH - 1960). É um teste de abrasão para partículas menores que 1,00 mm. Desde a década de 1980 o teste vem sendo utilizado para testar a abrasividade de rochas duras e sua implicação na perfuração. O método implica em quantificar o desgaste dos corpos de prova, de aço para determinação do desgaste nos TBM e de carbeto de tungstênio para quantificar o desgaste do bit das perfuratrizes roto percussivas. (NTNU - Anleggsdrift, 1998).

O índice é obtido pelo valor médio de perda de material dos corpos de prova. O método consiste em moer a rocha e peneira até obter um material menor que 1,00 mm que é submetido ao aparato esquematizado na figura 19.

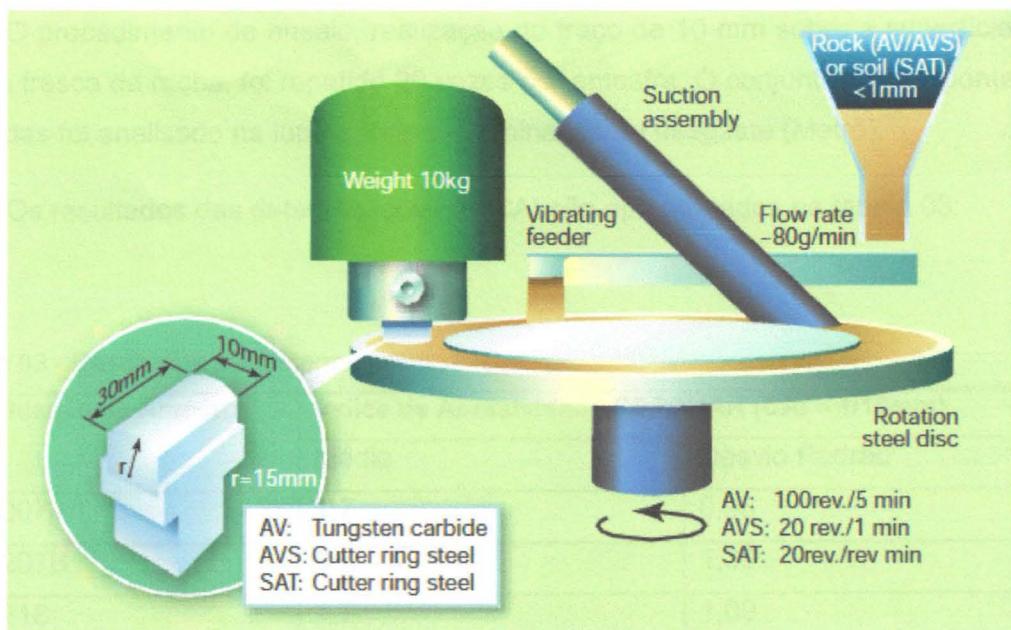


Figura 19 – Modelo esquemático do aparato de teste NTNU. Fonte Nielson et al 2006

Embora o teste NTNU tenha sido elaborado para caracterizar a abrasividade das rochas maciças alguns testes obtiveram resultados promissores quando aplicados na determinação da abrasividade de solos finos (Nilsen et al 2006).

7.2 Ensaios Realizados

Para o projeto básico de investigação da Linha 6 – Laranja foi realizada uma intensa campanha de sondagem na vizinhança do traçado onde serão executadas as obras de construção do metropolitano. O material coletado nessa investigação foi amostrado e testado nos seguintes métodos:

- Ensaio de Abrasividade CERCHAR
- Ensaio de Compressão Simples
- Ensaio de Compressão Diametral
- Ensaio de Análise Petrográfica
- Ensaio de Agregado

7.2.1 Ensaio de Abrasividade CERCHAR

O ensaio foi realizado segundo os procedimentos de ensaio propostos pelo CERCHAR. Foram analisadas 13 amostras constituídas por fragmentos de sondagens, nas quais foi aproveitada diretamente a superfície (fraturas frescas e planas) e somente foi utilizada serra diamantada nas amostras cujas dimensões não estavam adequadas ao aparelho.

O procedimento de ensaio, realização do traço de 10 mm sobre a superfície em fratura fresca da rocha, foi repetido 20 vezes por amostra. O conjunto das 20 ponteiras utilizadas foi analisado na lupa para a determinação do desgaste (Metrô).

Os resultados das determinações do CAI são apresentados na tabela 03:

Tabela 03 - Resultados das determinações do CAI

| Identificação da Amostra | Índice de Abrasividade CERCHAR (CAI – 1/10mm) | |
|--------------------------|---|---------------|
| | Média | Desvio Padrão |
| SM-5207A | 1,7 | 0,98 |
| SM-5207B | 3,7 | 1,36 |
| SM-5218 | 1,7 | 1,09 |
| SM-6115 | 4,3 | 1,14 |
| SM-6116 | 3,3 | 1,16 |
| SM-6141 | 4,7 | 0,73 |
| SM-6173 | 4,6 | 0,73 |
| SM-6175A | 4,9 | 0,65 |
| SM-6189A | 4,2 | 1,37 |
| SM-6189B | 4,3 | 1,19 |
| SM-6284A | 2,9 | 1,12 |
| SM-6284B | 3,0 | 0,66 |
| SM-6284C | 3,4 | 1,24 |

7.2.2 Ensaio de Compressão Simples (Uniaxial)

Os ensaios laboratoriais para determinação da resistência à compressão uniaxial de rochas foram realizados pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) seguindo o documento de referência. Foi submetida a ensaio uma amostra de rocha para cada furo solicitado, totalizando 11 amostras; de cada amostra retirou-se cinco corpos de prova, os resultados estão apresentados na Tabela 03 do anexo I.

7.2.3 Ensaio de Compressão Diametral

Os ensaios laboratoriais para determinação da resistência à tração indireta pelo Método Brasileiro (Compressão diametral) foram realizados pelo IPT (Instituto de

Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), seguindo as orientações do *Suggested Method da ISRM 2007*. Foram ensaiados cinco corpos de prova de cada litologia, totalizando 45 ensaios. Os resultados são apresentados na Tabela 04 do anexo I.

7.2.4 Ensaio de Análise Petrográfica

A análise petrográfica foi realizada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) baseada na norma NBR 15577/08 – Agregado – Reatividade álcali-agregado – Parte 3: *Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto*, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Observou-se na análise a natureza da rocha (metamórfica, ígnea, etc), textura, granularidade, alteração e estado microfissural os resultados estão apresentados com o cálculo de quartzo equivalente na Tabela 05 do anexo I.

7.2.5 Ensaio de Agregado

O ensaio foi executado através da análise granulométrica por peneiramento, de acordo com a norma NBR NM 248/03 – Agregados – *Determinação da composição granulométrica*, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foram submetidas à análise 11 amostras de areia obtidas em sondagens a percussão das Formações São Paulo e Resende.

8 Desenvolvimento do trabalho

| | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1-Revisão bibliográfica | | | | | | | | | | |
| 2-Aquisição de dados/campo | | | | | | | | | | |
| 3-Interpretação e discussão dos dados | | | | | | | | | | |

1 – Revisão bibliográfica: Realizada inicialmente com o intuito da contextualização dos aspectos geológicos e geotécnicos e implicações das obras civis e como esse trabalho de formatura estaria inserido.

2 – Aquisição de dados/campo: A fase de aquisição de dados não foi necessária, visto que o caso de estudo é o projeto base de uma nova linha do metrô que ainda está no projeto base. Nessa fase focou-se no meio para obtenção dos dados.

3 – Interpretação e discussão dos dados; Para essa fase foi necessário uma nova revisão bibliográfica, agora focada no entendimento dos processos de ensaios e o significado dos resultados obtidos,

9 Discussão

Os resultados dos ensaios realizados pelos métodos CERCHAR, equivalente quartzo, compressão axial e compressão diametral apresentaram valores altos de resistência e dureza para os granitóides intrusivos e valores medianos para os gnaisses do Complexo Embu, como mostram os gráficos abaixo (Figura 20 e 21):

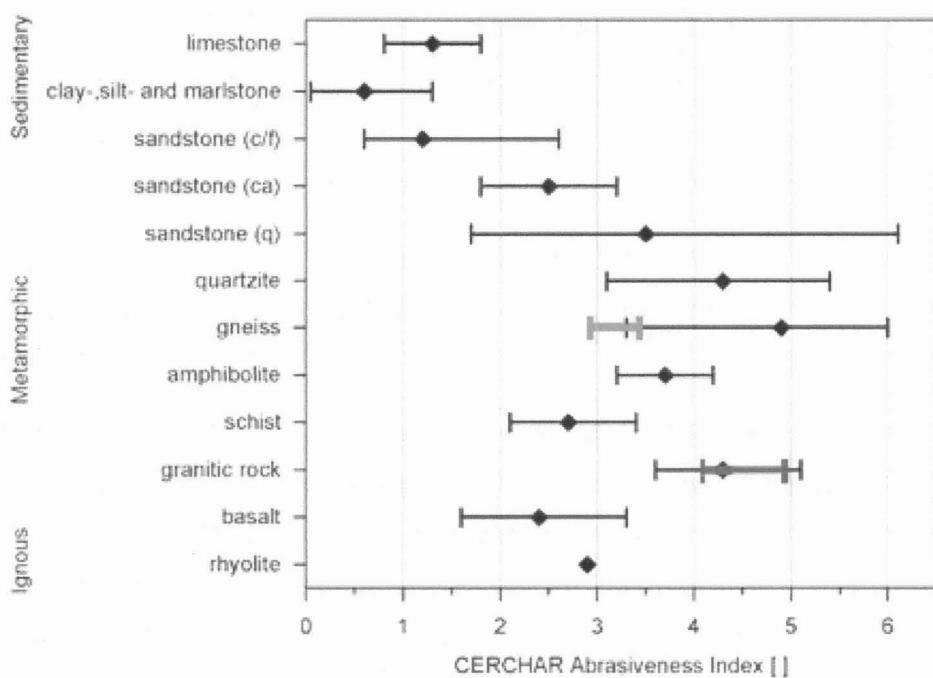


Figura 20. Valores padrão de CAI para diversos litotipos. Modificado de Plinninger *et al.* (2003)

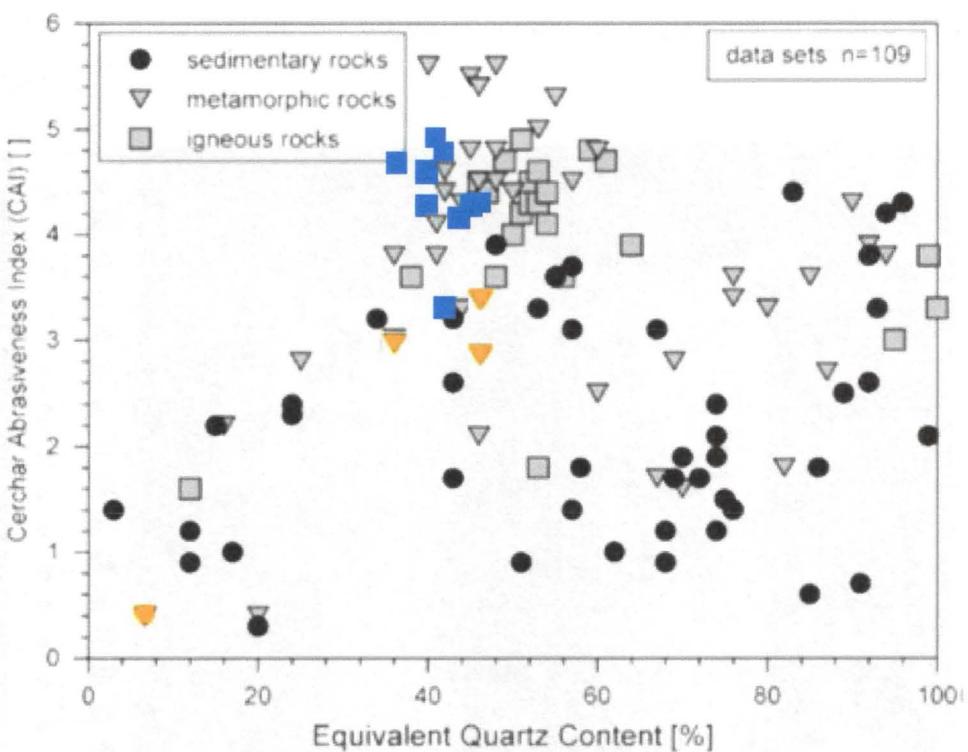


Figura 21. Valores padrão de CAI v eQc para os três tipos rochosos. Modificado de Plinninger *et al.* (2003)

Os resultados para os ensaios em rochas graníticas apresentam valores de CAI e eQc semelhantes aos encontrados por Thuro (2004) para a normalização dessa técnica. Enquanto os valores para as rochas gnáissicas apresentam-se discrepantes em relação aos índices europeus nos valores de CAI, os de eQc se mantêm no padrão do teste. Isso se deve ao alto grau de alteração dessa rocha, o que corrobora os resultados encontrados por Monteiro (2010) e Thuro (2004), no qual se concluiu que o CAI está diretamente relacionado ao eQc.

Para os testes de compressão uniaxial e compressão diametral foram obtidos valores altos para amostras graníticas e valores baixos para amostras gnáissicas (Tabela 00 Anexo I). Isso se deve ao fato de que as rochas graníticas são mais jovens que as gnáissicas e, consequentemente, sofrem as ações intempéricas há menos tempo; além disso, as estruturas das rochas influenciam diretamente na resposta à carga imposta.

Como observado no teste de compressão uniaxial das amostras SM6115 – granítica e SM6284B – gnáissica, houve fraturamento em cunha e sensível cisalhamento para a amostra granítica (Figura 22 e 23) e intenso cisalhamento para a amostra gnáissica (Figuras 24 e 25). Assim, podemos concluir que rochas

anisotrópicas são mais suscetíveis ao cisalhamento que geralmente ocorre balizado pela foliação.

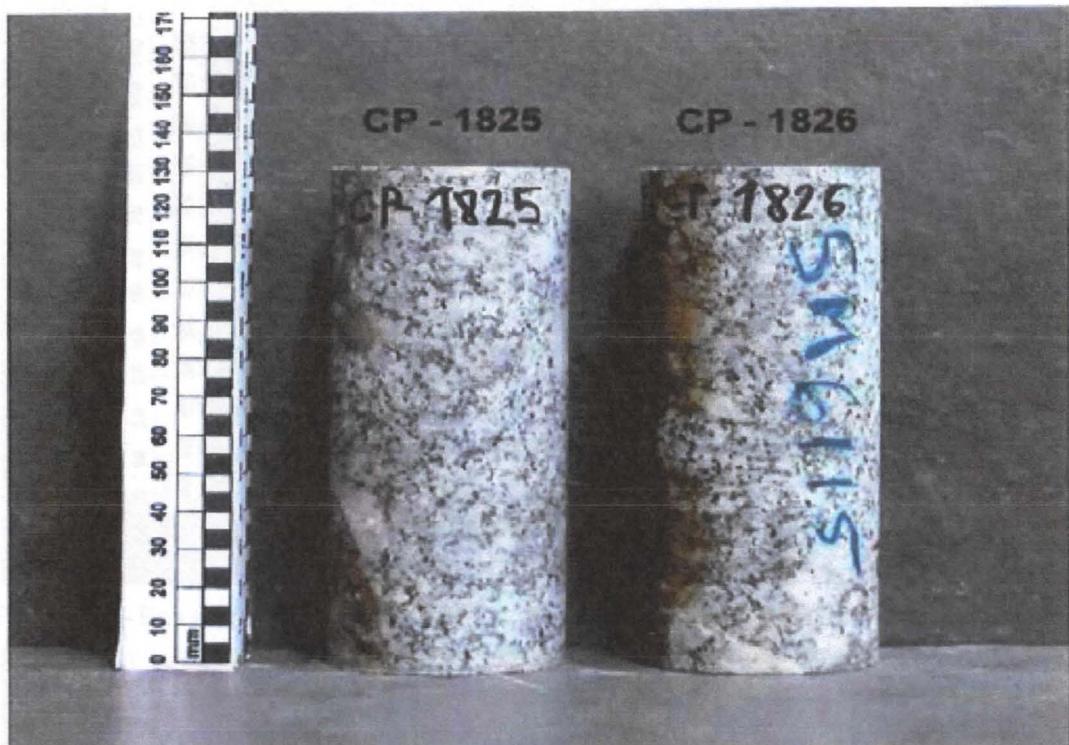


Figura 22 – Ensaio de compressão uniaxial. Amostra granítica SM 6155 antes da ruptura.

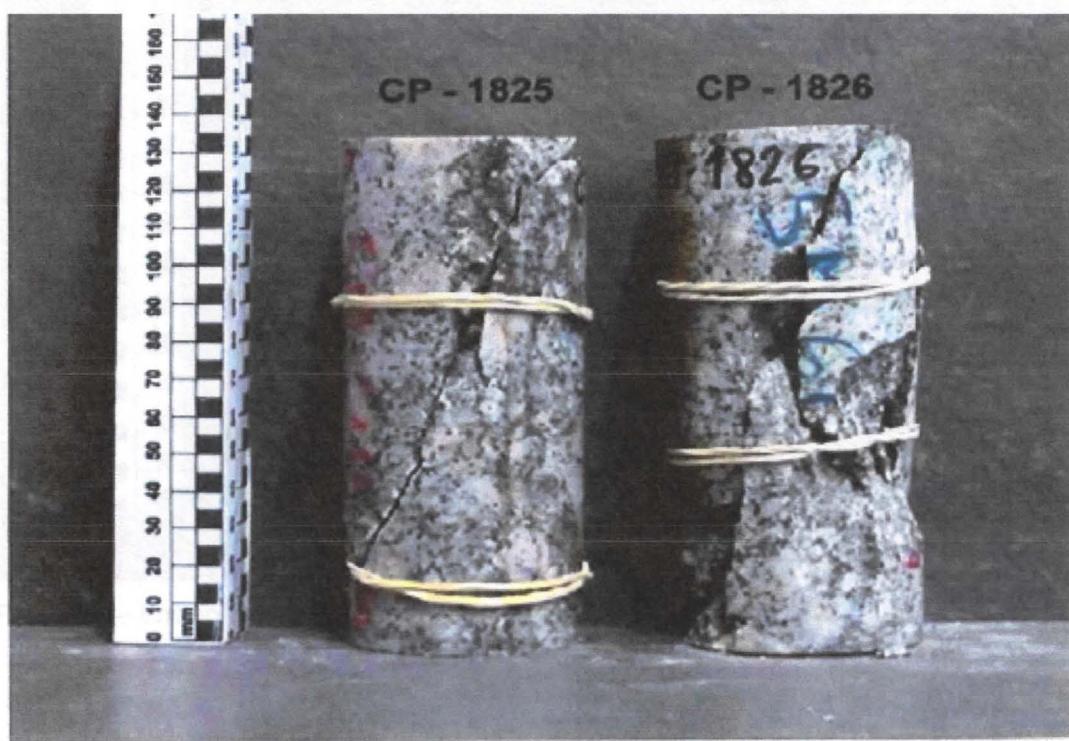


Figura 23 – Ensaio de compressão uniaxial. Amostra granítica SM 6155 após a ruptura.

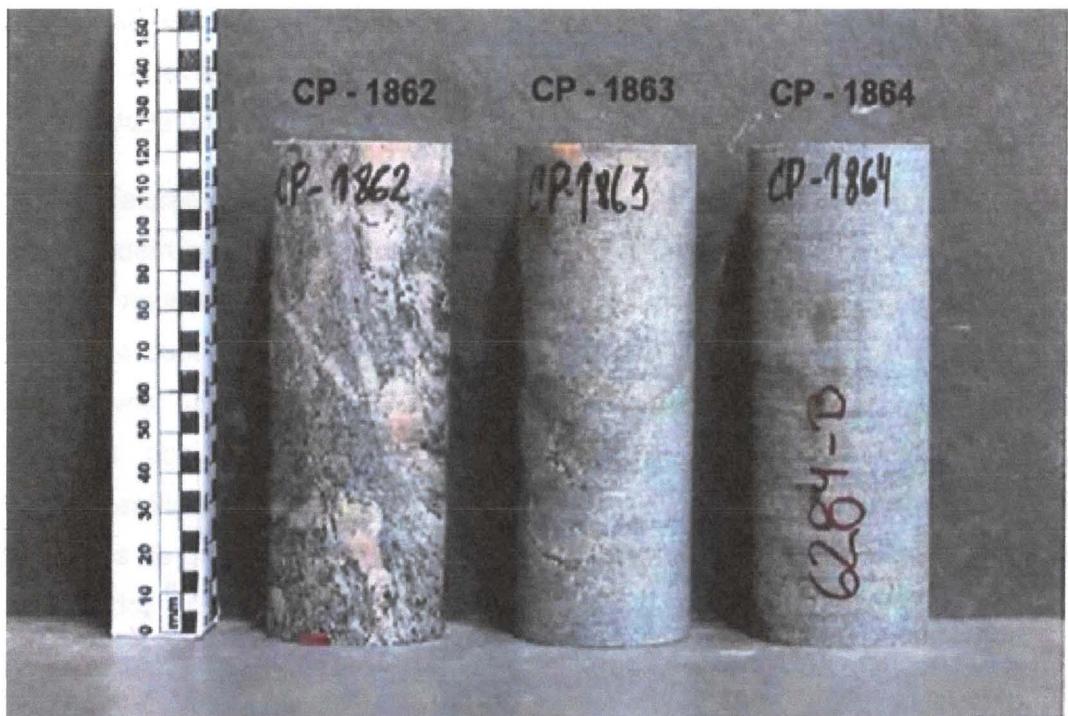


Figura 24 – Ensaio de compressão uniaxial. Amostra gnáissica SM 6284B antes da ruptura.

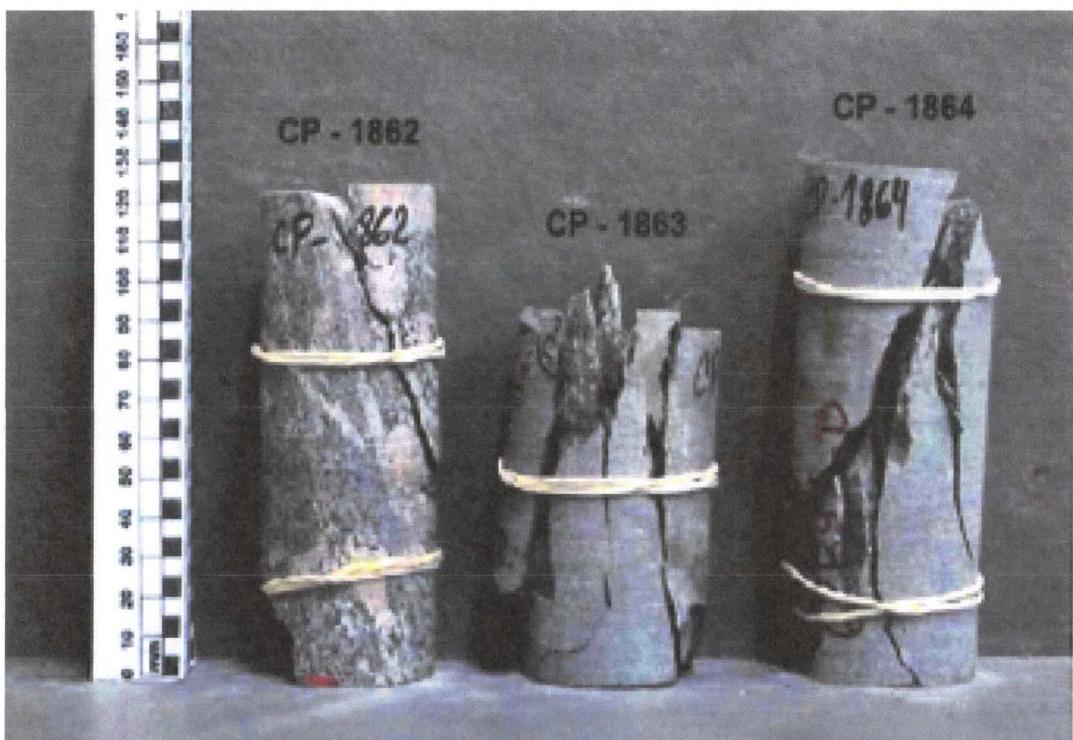


Figura 25 – Ensaio de compressão uniaxial. Amostra gnáissica SM 6284B após a ruptura.

As amostras de areias submetidas à análise granulométrica foram classificadas como fina a muito fina com granulações inferiores a 1,18 mm, ambas com baixa porcentagem de grãos maiores que 4,75. Os grãos se apresentam subangulosos e subarredondados, com composição média quartzosa. Embora apenas esse resultado

não possa estabelecer um valor numérico para o parâmetro de abrasividade, podemos estimar, através da dureza e morfologia dos grãos, que os sedimentos possuem abrasividade moderada.

Valores mais precisos para o parâmetro de abrasividade dos sedimentos da bacia podem ser obtidos pelos testes de abrasividade em solo NTNU e LCPC, sendo o primeiro mais aplicável aos sedimentos da Bacia de São Paulo, visto que o conteúdo da fração superior a 4,0 mm não atinge a porcentagem necessária para resultados conclusivos no método LCPC, com exceção das lentes conglomeráticas onde o tamanho dos grãos atende às especificações do ensaio. Além das lentes conglomeráticas, o LCPC pode ser utilizado também para a caracterização dos saprólitos de gnaisse e granitos, pois, geralmente, apresentam tamanhos compatíveis ao método.

10 Conclusão

O traçado passara por rochas do embasamento cristalino na borda NNE, próximo à região da Serra da Cantareira, e na região do Vale do Pacaembu; entre as duas ocorrências do embasamento e na porção central da bacia há sedimentos terciários da Formação Resende e Formação São Paulo, além de sedimentos do quaternário nos vales e nas planícies de inundação do Rio Tietê.

O arcabouço cristalino do traçado da Linha 6 - Laranja apresenta abrasividade extremamente alta em maciço granítico e seus produtos intempéricos que ocorrem na parte da região da Vila Brasilândia, borda NNE da bacia, próximo à Serra da Cantareira, até as proximidades do Rio Tietê.

Perto do Rio Tietê, o traçado do túnel atravessa terrenos terciários com menor abrasividade, seguindo até o Vale da Avenida Sumaré e o Vale da Avenida Pacaembu.

Já na região do Vale do Pacaembu, o traçado projetado do túnel passa por gnaisses e saprólitos de gnaisses. Esses litotipos têm abrasividade moderada a baixa e os saprólitos apresentam a mesma condição dos sedimentos terciários quanto à determinação da abrasividade.

Até a Estação São Joaquim, no centro da bacia, o túnel atravessa sedimentos do terciário na faixa de transição da Formação Resende à Formação São Paulo.

Os métodos construtivos escolhidos pelo Metrô para os trechos são condizentes quanto ao arcabouço geológico-estrutural; no entanto, o estudo da abrasividade do maciço Terciário e dos pacotes de alteração granítica e gnáissica pode ser examinado com mais acuidade.

11 Referências Bibliográficas

ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos): Túneis - O Metrô e o subsolo de São Paulo. Disponível em: <http://www.abms.com.br> acesso em: 28 de Jul 2011.

ABNT NBR 7222:2010 (Agência Brasileira de Normas Técnicas) *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.*

ABNT NBR NM 248/03 (Associação Brasileira de Normas Técnicas) — *Agregados – Determinação da composição granulométrica.*

Almeida, F.F.M. de 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. São Paulo, Inst. Geogr. Geol., boletim 41, p. 167-263.

Almeida, F.F.M. de, Hasui, Y. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil.* São Paulo, Blücher, 378 p.

Assis, A.A. 1999. Panorama internacional de túneis urbanos. Palestra especial. In: SIMPÓSIO SOBRE TÚNEIS URBANOS, 3., São Paulo, 1999. Anais.... São Paulo, ABGE, CBT, IE. v. 1, p. 163-172.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Solo – Determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 1984 (NBR 7180)

Azevedo, A.A. 2002. *A incorporação de incertezas de natureza geológica no projeto e construção de túneis urbanos. Proposta metodológica baseada na teoria da decisão.* São Paulo. 181 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Carneiro, F. L. (1943). Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos. Comunicação, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Publ. Inst. Nac. Tecnol., Rio De Janeiro.

Carvalho, N. 2006. Túneis Rodoviários. In: Celestino, T.B.; Koshima, A.; Telles, R.C.D.; Assis, A. ed. *Túneis do Brasil*. São Paulo, CBT. P.28-107.

Coimbra, A.M.; Riccomini C.; Melo, M.S. de. 1983. A Formação Itaquaquecetuba: evidência de tectonismo no quaternário paulista In: SBG, Simp. Reg. Geol., 4, São Paulo, 1983, Atas..., São Paulo, p 253-266.

Coimbra, A.M.; Riccomini C.; Melo, M.S. de. 1983. A Formação Itaquaquecetuba: evidência de tectonismo no quaternário paulista *In: SBG, Simp. Reg. Geol.*, 4, São Paulo, 1983, Atas..., São Paulo, p 253-266.

Cozzolino, V. M. N. 1980. Considerações sobre o conceito de camadas sob o ponto de vista geotécnico, na Bacia de São Paulo, Mesa Redonda: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo, v. único, p.47-52.

EFNARC. 2005. Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock. Surrey GU9 7EN, UK

HASUI, Y.; SADOWSKI, G. R. 1976. Evolução Geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 6:182-200

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S.A. - IPT.2010 Relatório Técnico N°1017396-203. IPT. São Paulo. 17p.

ISRM 2007 "The complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006" (Compilation by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. First Edition, 2007) da ISRM (International Society for Rock Mechanics)

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2007). The Complete Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. ISRM Commission on Testing Methods – "Seggsted Method for determining the "the Uniaxial Compressive Strength and Deformability for Rock Materials Part 1, PP. 153-156. International Society for Rock Mehanics (ISRM) Compilation by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. First Edition, 2007"

ISRM. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci* 36(3):279-289, 1999.

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.

FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CIENTEC. 2010. Ensaios em amostras de rocha. Relatório de Ensaio nº 31137/122348. CIENTEC. Porto Alegre. 17p.

Juliani, C. 1992. O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo, v. único, p. 3-20.

Leinz, V. 1980. Histórico Resumido das pesquisas geológicas da Formação São Paulo. Mesa Redonda: Aspectos Geológicos e Geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo, v. único, p.1-4.

Machado Filho L., Ribeiro M.W., Gonzalez S.R., Schenini C.A., Santos Neto A., Palmeira R.G.B., Pires J.L., Teixeira W., Castro H.E.F. de. 1983. In: RADAMBRASIL. Folhas SF-23/24, Rio de Janeiro/Vitória, 1.Geologia. Rio de Janeiro,

MME, 27-304.Melo, M. S.; Caetano, S. L. V.; Coimbra, A. M. 1986. Tectônica e sedimentação na área das Bacias de São Paulo e Taubaté. XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia – GO V. 1 p. 321-336.

METRÔ (Companhia do Metropolitano de São Paulo). 2010 Aspectos fisiográficos, geológicos, traçado e método construtivo. Relatório interno.

METRÔ (Companhia do Metropolitano de São Paulo): Tecnologia - Construção – Subterrânea. Disponível em: www.metro.sp.gov.br acesso em: 17 de mar 2011.

Monteiro, M.D.; Rocha, H.C.; Massoni, F.; Neto, F.R.N. 2011. Considerações sobre a abrasividade das rochas do embasamento nos estudos da Linha 6 do Metrô de São Paulo. 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

Nilsen,B.; Holzhäuser, J.; Raleigh, P. 2006. Abrasivity testing for rock and soils. APRIL Tunnels & Tunnelling International. P. 47-49.

NTNU-Anleggsdrift, 1998. "Hard Rock Tunnel Boring". Norwegian University of Science and Technology, Dept. of Building and Construction Engineering, Report 1B-98, 164p.

Pike, David L. 2005. "The greatest wonder of the world": Brunl's tunnel and the meanings of underground London. Victorian Literature and Culture. Cambridge University Press. 33, 341–367.

Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K. and Spaun, G., 2003. Technical note – Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40(2): 259-263.

Rabcewicz L. 1965. The New Austrian Tunnelling Method, Part one, Part Three, Water Power, January, 19-24.

Ribeiro, Vilmondes. 2010. Abrasividade pendular e a resistência mecânica das rochas. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 60p.

Riccomini, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Riccomini C. & Coimbra A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. In: Ferreira, A.A.; Alonso, U.R.; Luz, P.L ed. Solos da cidade de São Paulo. São Paulo, BMS/ABEF. p.37-94.

Riccomini C.; Coimbra A.M.; Takya, H. 1992. Tectônica e sedimentação na Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo, v. único, p. 21-45.

Riccomini, C.; Sant'anna, L.G.; Ferrari, A.L. 2004. Evolução geológica do Rift continental do Sudeste do Brasil. In: Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo Ed. DECA. Pag. 383-405.

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

Rocha, H. C.; Hori, K. 2006. Túneis Metroferroviários. In: Celestino, T.B.; Koshima, A.; Telles, R.C.D.; Assis, A. ed. *Túneis do Brasil* . São Paulo, CBT. P.28-107

Telles, P.C.S. 2006. Túneis Antigos no Brasil. In: Celestino, T.B.; Koshima, A.; Telles, R.C.D.; Assis, A. ed. *Túneis do Brasil* . São Paulo, CBT. P.21-25.

Thuro, K.; Singer, J.; Käsling, H.; Bauer, M. 2006. Soil abrasivity Assessment Using the LCPC Testing Device. Fesbal 24:P 37-45.

Thuro, K. ; Plinniger, R.J. (2003). Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.

Thuro, K. (1997) Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunneling. Geol Rundsch, 86:426-438

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

West, G., 1989 Technical note - Rock abrasiveness testing for tunneling. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(2): 151-160.

12 Anexos

Tabela – 01. Sondagens discriminadas por trecho, litotipo e ensaios executados. Fonte Metrô



LINHA 6 – LARANJA

AMOSTRAS PARA ENSAIOS EM ROCHA – COMPRESSÃO SIMPLES, COMPRESSÃO DIAMETRAL, ABRASIVIDADE (CERCHAR) E ANÁLISE PETROGRÁFICA

CONSÓRCIO LOTE 2

| Sondagem | Trecho Início (m) | Trecho Final (m) | Litotipo (Nomenclatura Informal) | Trecho | Compressão Simples | Compressão Diametral | Abrasividade CERCHAR | Petrografia |
|-------------|-------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| SM-6035 | 41,10 | 42,00 | Granito Cinza | NATM – Acesso Pátio | X | | | X |
| SM-6064 | 38,00 | 39,42 | Granito Cinza alterado | NATM – Acesso Pátio | X | | | |
| SM-6115 | 44,50 | 46,40 | Granito Cinza | V. Cardoso / Itaberaba | X | X | X | X |
| SM-6116 | 34,50 | 36,60 | Gr. K-felds biotítico | V. Cardoso / Itaberaba | X | X | X | X |
| SM-6141 | 42,00 | 44,00 | Granito K-felds | Itaberaba / JP | X | X | X | X |
| SM-6173 | 31,00 | 34,00 | Granito Cinza | JP / Freguesia | X | X | X | X |
| SM-6175 – A | 33,80 | 35,00 | Quartzito c/ feldspato | JP / Freguesia | X | X | X | X |
| SM-6175 – B | 35,00 | 36,30 | Granito Fino | | | | | X |
| SM-6189 – A | 27,00 | 30,00 | Granito K-felds foliado | Freguesia / Sta Marina | X | X | X | X |
| SM-6189 – B | 38,30 | 38,70 | Granito K-felds maciço | | X | X | X | X |
| SM-6191 | 44,50 | 45,00 | Milonito – Falha | Freguesia / Sta Marina | | | | X |
| SM-6284 – A | 35,70 | 37,00 | Gnaisse porfiróide | Pacaembu | X | X | X | X |
| SM-6284 – B | 37,00 | 39,00 | Gnaisse fino | | X | X | X | X |
| SM-6284 – C | 39,00 | 40,00 | Injeção granítica | | | | X | X |

Tabela 02 – Descrição das amostras ensaiadas

| Amostra | Profundidade | Descrição |
|----------------|---------------------|--|
| SP 6232 | 35-37 m | Areia de coloração bege escuro |
| SP 6300 | 43-45 m | Areia de coloração róseo claro |
| SP 6340 | 38-40 m | Areia de coloração róseo claro acinzentado |
| SP 6348 | 60-62 m | Areia de coloração bege róseo claro |
| SP 6391 | 20-22 m | Areia de coloração bege claro acinzentado |
| SP 6398 | 40-42 m | Areia de coloração amarela |
| SP 6233 | 33,85-38,65 m | Areia de coloração alaranjada |
| SP 6254 | 24,61-38,0 m | Areia de coloração cinza |
| SP 6274 | 18,0-23,0 m | Areia de coloração branca acinzentada |
| SP 6356 | 34,4-36,7 m | Areia de coloração bege clara |
| SP 6388 | 18,4-22,0 m | Areia de coloração bege alaranjada |

Tabela 03 - Resultado dos ensaios de compressão Uniaxial

| Litologia | Amostra | Corpo de prova | |
|------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|
| | | Força de Ruptura (kN) | Tensão de Ruptura (MPa) |
| Granito Cinza | SM-6115 | 338 | 144,36 |
| | | 300 | 128,19 |
| | | 244 | 104,25 |
| | | 333 | 142,22 |
| | | 362 | 154,65 |
| Granito Cinza alterado | SM-6064 | 54 | 23,49 |
| | | 50 | 21,74 |
| | | 82 | 35,78 |
| | | 150 | 65,54 |
| | | 96 | 41,83 |
| Granito Cinza | SM-6035 | 300 | 128,90 |
| | | 320 | 137,61 |
| | | 285 | 122,53 |
| | | 312 | 134,20 |
| | | 336 | 144,52 |
| Gr. K-Felds Biotítico | SM-6116 | 235 | 100,77 |
| | | 226 | 97,02 |
| | | 268 | 114,78 |
| | | 240 | 102,75 |
| | | 220 | 94,19 |
| Gr. K-Felds | SM-6141 | 258 | 109,69 |
| | | 235 | 100,70 |
| | | 261 | 111,83 |
| | | 314 | 134,29 |
| | | 310 | 131,51 |

| Litologia | Amostra | Corpo de prova | |
|--------------------------|----------|-----------------------|-------------------------|
| | | Força de Ruptura (kN) | Tensão de Ruptura (MPa) |
| Granito Cinza | SM-6173 | 335 | 145,02 |
| | | 351 | 151,94 |
| | | 332 | 143,74 |
| | | 330 | 142,89 |
| | | 340 | 147,24 |
| Quartzito c/ Fedspato | SM-6175A | 246 | 105,86 |
| | | 298 | 128,24 |
| | | 313 | 134,71 |
| | | 210 | 90,35 |
| | | 110 | 47,32 |
| Granito K- Felds Foliado | SM-6189A | 400 | 170,96 |
| | | 265 | 113,18 |
| | | 435 | 185,92 |
| | | 300 | 128,96 |
| | | 380 | 162,89 |
| Gnaisse Porfiróide | SM-6284A | 100 | 49,34 |
| | | 82 | 40,55 |
| | | 83 | 41,08 |
| | | 18 | 8,96 |
| | | 70 | 34,65 |
| Gnaisse Fino | SM-6284B | 128 | 63,40 |
| | | 263 | 129,78 |
| | | 200 | 98,65 |
| | | 31 | 15,38 |
| | | 188 | 93,01 |

Tabela 04 - Resultado dos ensaios de compressão diametral

| Litologia | Amostra | Corpo de prova | |
|------------------------|---------|------------------|-------------------------|
| | | Força de Ruptura | Tensão de Ruptura (MPa) |
| Granito Cinza | SM-6115 | 27,7 | 11,94 |
| | | 22,8 | 9,87 |
| | | 27,8 | 11,98 |
| | | 24,9 | 10,79 |
| | | 23,7 | 10,28 |
| GR K-Felds Biotítico | SM-6116 | 18,8 | 8,15 |
| | | 17,7 | 7,65 |
| | | 19,7 | 8,53 |
| | | 19,6 | 8,49 |
| | | 16,3 | 7,05 |
| GR K-Felds | SM-6141 | 22,2 | 9,55 |
| | | 27,1 | 11,67 |
| | | 15,7 | 6,77 |
| | | 18,7 | 8,07 |
| | | 13,5 | 5,83 |
| Granito Cinza | SM-6173 | 24,6 | 10,71 |
| | | 24,7 | 10,83 |
| | | 31,9 | 13,71 |
| | | 31,6 | 13,81 |
| | | 28,5 | 12,41 |
| Quartzito c/ Feldspato | SM6175A | 14,7 | 6,38 |
| | | 16,7 | 7,22 |
| | | 9,7 | 4,21 |
| | | 10,4 | 4,51 |
| | | 11,5 | 4,98 |

| Litologia | Amostra | Corpo de prova | |
|----------------------------|----------|------------------|-------------------------|
| | | Força de Ruptura | Tensão de Ruptura (MPa) |
| Granito K-Felds Foliado | SM-6189A | 30,1 | 13,01 |
| | | 28,7 | 12,45 |
| | | 27,0 | 11,69 |
| | | 27,0 | 11,71 |
| | | 18,5 | 8,07 |
| Granito K-Felds Maciço | SM-6189B | 29,0 | 12,54 |
| | | 29,2 | 12,62 |
| | | 33,0 | 14,27 |
| | | 29,3 | 12,66 |
| | | 32,4 | 13,98 |
| Gnaisse Porfiróide | SM-6284A | 11,8 | ** |
| | | 8,9 | 4,47 |
| | | 8,6 | 4,28 |
| | | 6,9 | 3,44 |
| | | 7,0 | 3,49 |
| Gnaisse Fino | SM-6284B | 17,2 | 8,60 |
| | | 15,1 | 7,57 |
| | | 11,4 | 5,68 |
| | | 20,9 | 10,49 |
| | | 3,5 | ** |

Tabela 05. Resultado da análise granulométrica já calculado o valor de eQc

| METRÔ | | LINHA 6 – LARANJA: DETERMINAÇÃO DE QUARTZO-EQUIVALENTE | | | | | |
|----------|------------------------------|--|---------|-----------|----------------|------------|-------------------------|
| Sondagem | Local | Rocha (nome oficial) | Quartzo | Feldspato | Filossilicatos | Carbonatos | Quartzo-equivalente (%) |
| 6035 | NATM – Acesso o Pátio | Biotita granodiorito | 25 | 60 | 15 | 0 | 45,40 |
| 6115 | Aprox. Petrônio Portela | Biotita-granodiorito gnáissico | 20 | 60 | 20 | 0 | 40,60 |
| 6116 | Aprox. Petrônio Portela | Biotita-granodiorito gnáissico | 20 | 65 | 15 | 0 | 42,05 |
| 6141 | Aprox. Est. João Paulo | Biotita-epídoto gnáisse monzogranítico | 20 | 50 | 10 | 0 | 36,90 |
| 6173 | Trecho entre J. Paulo e Freg | Biotita granodiorito | 20 | 60 | 15 | 0 | 40,40 |
| 6175A | Trecho entre J. Paulo e Freg | Biotita gnáisse blastomilonítico | 18 | 68 | 12 | 0 | 40,92 |
| 6175B | Trecho entre J. Paulo e Freg | Gnáisse blastomilonítico com turmalina | 19 | 71 | 2 | 0 | 42,51 |
| 6189A | Saída Freg do Ó | Biotita gnáisse monzogranítico | 25 | 55 | 15 | 0 | 43,75 |
| 6189B | Saída Freg do Ó | Biotita monzogranito | 25 | 65 | 10 | 0 | 46,85 |
| 6191 | Falha do Rio Tietê | Clorita-tremolita-calcita mármore | 5 | 0 | 15 | 50 | 7,10 |
| 6284A | Pacaembu | Biotita gnáisse milonítico | 26 | 57 | 14 | 0 | 45,37 |
| 6284B | Pacaembu | Hornblenda-biotita gnáisse milonítico | 23 | 44 | 20 | 0 | 38,32 |
| 6284C | Pacaembu | Biotita gnáisse milonítico | 28 | 52 | 15 | 0 | 45,76 |

