

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

AVALIAÇÃO DOS CONDICIONANTES ASSOCIADOS A RISCOS GEOLÓGICOS
EM OBRAS SUBTERRÂNEAS. ESTUDO DE CASO DE UMA OBRA
SUBTERRÂNEA NA CIDADE DE SÃO PAULO

Julio Inhasz Paiva

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato (IGc-USP)
Co-orientador: Geól. Marcelo Denser Monteiro (Metrô-SP)

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013 / 31)

SÃO PAULO
2013

ÍNDICE

1. IDENTIFICAÇÃO	5
2. RESUMO	5
3. ABSTRACT	5
4. INTRODUÇÃO	6
5. METAS E OBJETIVOS	6
6. TRABALHOS PRÉVIOS	7
6.1. Contexto tectônico regional	7
6.2. Geologia regional	8
6.2.1. <i>Embasamento</i>	8
6.2.2. <i>Bacia sedimentar de São Paulo</i>	10
6.3. Risco geológico associado a obras subterrâneas	12
6.4. Método de perfuração	16
6.5. Ensaio laboratoriais	19
6.5.1. <i>Ensaio de compressão axial</i>	19
6.5.2. <i>Resistência à compressão por compressão diametral</i>	20
6.5.3. <i>Índice de abrasividade CERCHAR</i>	20
6.5.4. <i>Ensaio para cálculo do índice de plasticidade</i>	21
6.6. Sondagens	22
6.6.1. Sondagem percussiva	22
6.6.2. Sondagem rotativa	24
7. MATERIAIS E MÉTODOS	25
7.1. Cronograma	25
7.2. Matriz de risco	25
7.2.1. <i>Feições/Condicionantes geológicos</i>	26
7.3. Parâmetros analisados	29
7.3.1. <i>Redutor em função do tipo de obra</i>	29
7.3.2. <i>Complexidade geológica</i>	29
7.3.3. <i>Classificação do programa de investigação</i>	30
8. RESULTADOS OBTIDOS	33
8.1. Classificação do programa de investigação	33
8.1.1. <i>Item 1 - Pesquisa bibliográfica</i>	33
8.1.2. <i>Item 2 - Interpretação de fotografias aéreas e análise de imagens de radar e satélite</i>	33
8.1.3. <i>Item 3 - Caminhamento elétrico</i>	33
8.1.4. <i>Item 4 - Sísmica de refração</i>	33

8.1.5. <i>Item 5 - Sondagens rotativas nas estruturas</i>	33
8.1.6. <i>Item 6 - Qualidade da descrição dos testemunhos</i>	33
8.1.7. <i>Item 6 - Qualidade da descrição dos testemunhos</i>	34
8.1.8. <i>Item 7 - Ensaios de infiltração e perda d'água</i>	35
8.1.9. <i>Item 8 - Ensaios em amostra de rocha</i>	38
8.1.10. <i>Item 9 - Ensaios em amostra de solo</i>	44
8.1.11. <i>Item 10 - Modelo geológico</i>	47
8.1.12. <i>Item 11 - Modelo geomecânico</i>	47
8.1.13. <i>Item 13 - Interatividade entre informações geológicas e projeto</i>	48
8.1.14. <i>Item 14 - Análise de risco geológicos esperados</i>	48
9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	49
9.1. Condicionantes geológicos	49
9.2. Matriz de risco	50
9.2.1. <i>Redutor em função do tipo de obra</i>	50
9.2.2. <i>Classificação da complexidade geológica</i>	50
9.2.3. <i>Classificação da complexidade geológica</i>	52
9.2.4. <i>Classificação do risco geológico</i>	55
10. CONCLUSÕES	56
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

AGRADECIMENTOS

Não seria possível iniciar os meus agradecimentos sem falar dos meus pais, Marcio e Angela. Foi a partir do esforço e dedicação deles que cheguei até aqui e pretendo ir ainda mais longe. Além deles, há também o meu irmão, Renato, que sempre me apoiou e me ensinou muitas coisas. Se não fossem essas três pessoas eu não seria quem sou hoje.

Agradeço muito a minha namorada Rebecca, que é muito especial pra mim e sempre me aguentou nos momentos mais estressantes da universidade, sempre insistindo para que eu estudasse e me esforçasse mais e mais.

Agradeço a todos os meus colegas da geologia, que passaram diversos dias comigo nas aulas e nos campos. Todos esses 5 anos foram muito bons e, principalmente, muito engraçados. Sempre lembrarei todas as experiências passadas junto com eles.

Sou muito grato ao meu orientador Edilson Pissato e ao meu co-orientador Marcelo Denser. O Edilson se propôs em aceitar inúmeros orientados de TF e eu fui um dos sortudos. Meu co-orientador, que merece o título de orientador, fez inúmeros esforços para me ajudar durante o seu tempo no trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, por terem me dado as melhores condições de estudo e infraestrutura.

1. IDENTIFICAÇÃO: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, TF-13/31 / Avaliação dos condicionantes associados a riscos geológicos em obras subterrâneas. Estudo de caso de uma obra subterrânea na cidade de São Paulo, Julio Inhasz Paiva, Prof. Dr. Edilson Pissato, Marcelo Denser Monteiro.

2. RESUMO

A Região Metropolitana de São Paulo tem recebido diversos investimentos para melhorias do transporte público. Em virtude disso, há diversos projetos para construção de novos meios de transporte, melhorias e prolongamento dos mesmos. Este trabalho apresenta uma análise de risco feita em um trecho de uma obra metro ferroviária, feita através da análise de diversos parâmetros: tipo de obra a ser realizada, complexidade geológica e análise da qualidade do programa de investigação. A obra estudada é subterrânea e foram feitos diversos ensaios para caracterização de parâmetros como: composição do material, tipos de solos e rocha, ensaios granulométricos em solos, sondagens rotativas e percussivas, ensaios de compressão em rocha, etc. A partir da análise crítica de todos os dados, foi possível identificar diversas feições/condicionantes geológicos que podem interferir no processo de construção e, conseqüentemente, aumento dos custos e atraso na entrega da obra. A aplicação da metodologia mostrou que a obra em questão foi muito bem estudada, no entanto faltou a apresentação de modelos hidrogeológicos e mecânicos, atribuindo a esta construção risco "Médio".

3. ABSTRACT

The Metropolitan Region of São Paulo has received several investments to improve public transport. As a result, there are many projects for construction of new means of transport, improvements and extension of themselves. This paper presents a risk analysis made in an stretch of a underground railway, by analysis of several parameters: type of construction, geological complexity and quality analysis of the research program. This construction is underground and several tests were performed to characterize such parameters as: material composition, types of soil and rock, granulometric tests on soils, rotary and percussive probing, compression tests on rock, etc. A critical analysis of all the data, it was possible to identify several geological features/conditions that may interfere on the construction process and, consequently, increased costs and delay in delivery of the work. The application of the methodology showed that the work in question has been well studied, however missed the presentation of hydrogeological and mechanical models, attributing this construction risk "Medium"

4. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é caracterizada pelo crescimento populacional acelerado e em curto tempo. Em conjunto a isso, a região carece de infraestrutura e planejamento na área de transporte público. Os órgãos públicos têm investido em meios de transporte mais rápidos, capazes de transportar um maior número de pessoas das zonas periféricas da RMSP para as zonas comerciais, que estão centralizadas nas regiões centro e sul da cidade de São Paulo.

Neste contexto é que se destaca a construção de transportes subterrâneos. Este tipo de obra é caracterizada por ser de alto risco e de extrema dificuldade, uma vez que a abertura de túneis sob a zona urbana representa, não somente um risco para a população que habita as proximidades da obra como também para os trabalhadores da construção. Em razão de tal risco é que existe a necessidade da elaboração de uma avaliação de risco geológico. A estimativa deste risco pode ser elaborada através do método sugerido por **Pastore (2009)**, que leva em consideração o tipo de obra, a complexidade geológica e a qualidade do programa de investigação. Neste trabalho, será realizada uma análise de risco geológico em uma obra subterrânea na cidade de São Paulo – SP.

A geologia da RMSP pode ser um agravante para a escavação de túneis, já que a região abrange desde rochas pré-cambrianas da Província Mantiqueira, e seus produtos de alterações, até sedimentos paleógenos, neógenos e quaternários pertencentes à Bacia Sedimentar de São Paulo. Por esta razão é que uma campanha de investigação de ótima qualidade diminui de forma expressiva o risco geológico e também a custos adicionais. Campanhas de pesquisa bastante detalhadas podem prever heterogeneidades no meio, evitando a necessidade de remediações de urgência que acarretam em custos adicionais, atrasos de entrega da obra e consequentemente multas.

5. METAS E OBJETIVOS

Assim como na mineração, obras de engenharia dependem de investimentos em pesquisa detalhada e de alta qualidade. No entanto, o foco da geotecnia é diferente daquela aplicada na área de mineração. A geotecnia busca entender as características estruturais, composicionais, hidrogeológicas e mecânicas da geologia em subsuperfície. Esse entendimento é de extrema importância para que, obras em geral, não sofra atraso, aumento de custos, coloque em risco a vida de usuários, funcionários e operários da obra.

O objetivo deste trabalho é aplicar a metodologia de avaliação de risco geológico proposto por **Pastore (2009)**, com base na análise de feições e condicionantes geológicos inferidos através da pesquisa geotécnica realizada para uma obra subterrânea da cidade de

São Paulo. A classificação de Pastore (2009) é feita em função do tipo de obra, da complexidade geológica e do programa de investigação que foi realizado. O produto final da análise destas variáveis será de avaliar um determinado trecho da obra em questão em três níveis, quanto ao risco geológico: baixo, médio e alto.

6. TRABALHOS PRÉVIOS

6.1. Contexto tectônico regional

O substrato rochoso da RMSP pode ser incluído como pertencente à Província Mantiqueira. Esta delinea uma faixa de direção NE-SW paralela à atual costa atlântica do sudeste do Brasil (Figura 1). Ela se estende por mais de 3.000 km, fazendo limite com as províncias Tocantins, São Francisco e Paraná. Ainda, a porção leste desta província, faz limite com a margem continental e pelas bacias costeiras do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas (Heilbron *et al.*, 2004).

A Província Mantiqueira foi formada durante a orogenia Neoproterozóica Brasileiro-Pan Africana, que resultou na geração do paleocontinente Gondwana Ocidental. Esta província consiste em um sistema orogênico composto pelos orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel (Heilbron *et al.*, 2004).

Será dado enfoque somente na porção central da Província Mantiqueira, uma vez que a cidade de São Paulo está situada nesta parte da província, sobre os terrenos Apiaí-Guaxupé e Embú (Monteiro *et al.*, 2012).

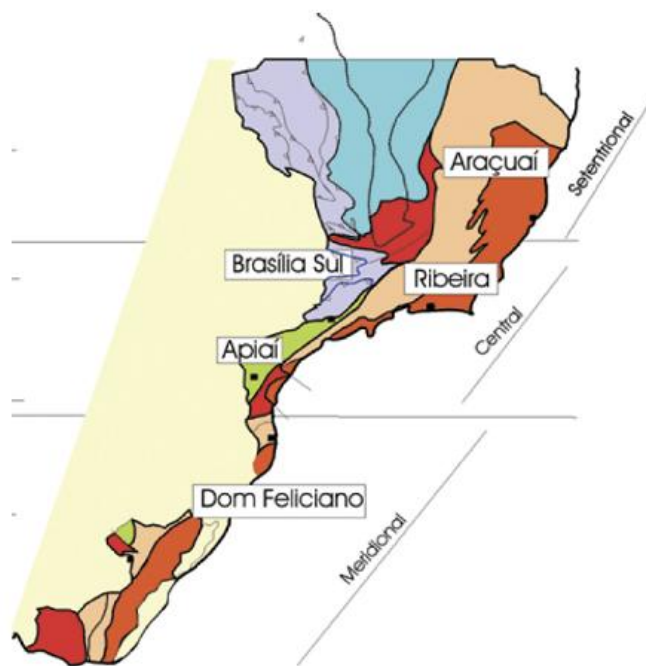


Figura 1 - Subdivisão da província Mantiqueira segundo Heilbron *et al.*, (2004); segmento central: Orógeno Araçuaí; segmento central: porção sul do Orógeno Brasília e Orógenos Ribeira e Apiaí; segmento meridional: Orógenos Dom Feliciano e São Gabriel; cores roxo e laranja: terrenos que alojam arcos magmáticos neoproterozóicos. (extraído de Heilbron *et al.*, (2004)).

6.2. Geologia regional

A geologia da RMSP pode ser dividida em três unidades litoestratigráficas. Da base para o topo temos o embasamento que é compreendido por rochas metamórficas e pré-cambrianas composta por terrenos policíclicos do Cinturão de Dobramentos Ribeira, sedimentos paleógenos e neógenos da Bacia de São Paulo e por último os sedimentos quaternários, aluviões e coluviões (Figura 2) (Rodriguez, 1988).

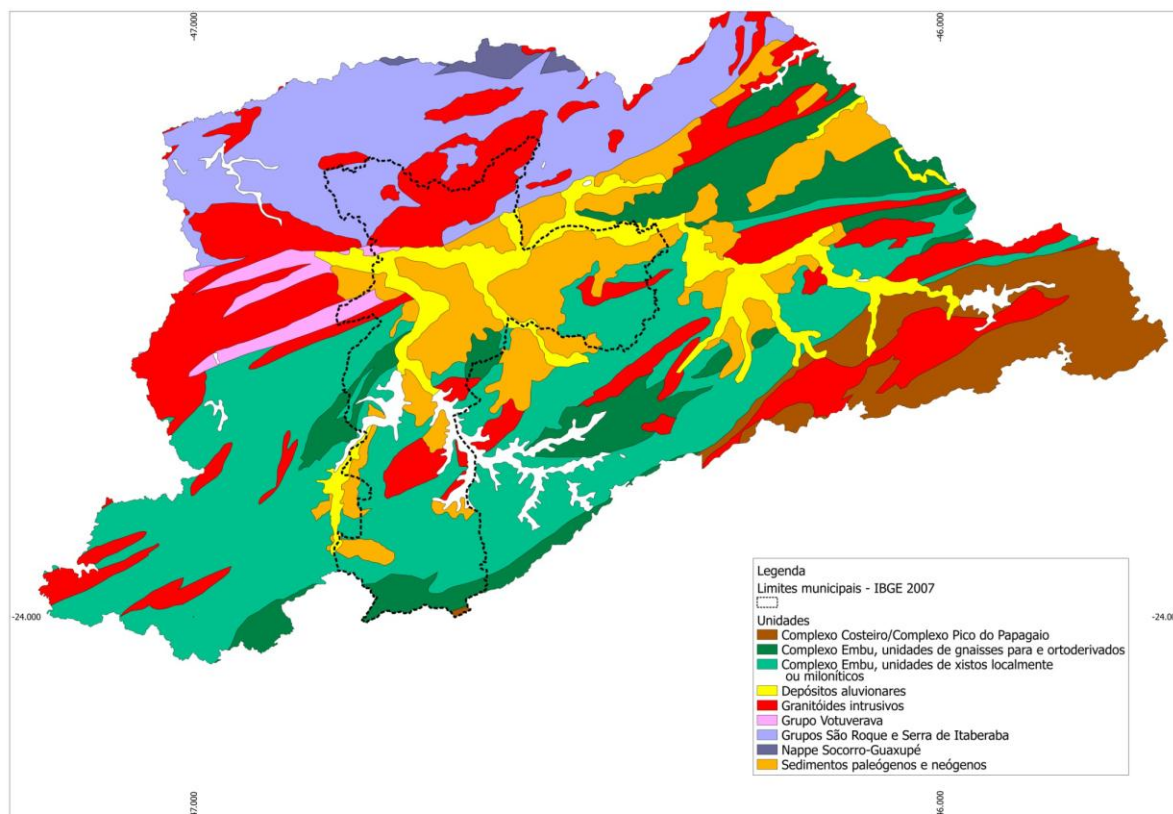


Figura 2 – Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo. Compilação e tratamento dos dados realizados por Francisco Carlos Pelegate Dias e Marcelo Denser Monteiro a partir da base SIG de CPRM (2006) (extraído de Monteiro *et al.*, 2012)

6.2.1. Embasamento

O limite norte entre os terrenos Apiaí – São Roque e a Nappe Socorro – Guaxupé ocorre a zona de cisalhamento destal Jundiuvira, marcado por uma grande mudança do grau de metamorfismo. Já na porção sudeste destes terrenos, os contatos são caracterizados por zonas de cisalhamento destrais; a separação com o terreno Curitiba é assinalado pela zona de cisalhamento de Lancinha, enquanto que o terreno Embu, é separado pela zona de Cisalhamento Caucaia-Rio Jaguari (Heilbron *et al.*, 2004).

Complexo Costeiro

O Complexo Costeiro é formado por rochas migmatíticas policíclicas de paleossoma gnáissico e gnaisses graníticos porfiroblásticos comumente milonitizados, biotita gnaisses e gnaisses peraluminosos. Na porção norte, o Complexo Costeiro faz contato com o Complexo Embu, marcado pela Falha de Cubatão, enquanto que a leste, as rochas deste complexo limitam-se com um corpo granítico (Rodriguez, 1988).

Segundo Tassinari (1988), as rochas do Complexo Costeiro tem idade de formação entre 650 e 600 M.a. com isócrona Rb-Sr.

Complexo Embu

O Complexo Embu representa a unidade de maior expressão do embasamento das bacias de São Paulo e Taubaté (Rodriguez, 1988). Este é subdividido em três unidades litoestratigráficas: rochas ortognáissicas polimigmatizadas e polideformadas, rochas metassedimentares de grau metamórfico alto e, por fim, sericita xistos e filitos de baixo grau metamórfico (Juliani, 1992). O metamorfismo das rochas do Complexo Embu são de fácies anfibolito, com idade de 790 M.a. (Vlach, 2001). A porção norte do Complexo Embu faz limite com os grupos São Roque e Serra do Itaberaba, separados pelo sistema de falhas de Taxaquara e Jaguari. Já a porção sul do mesmo, tem contato com o Complexo Costeiro, limitados pela falha de Cubatão (Rodriguez, 1988).

Além das rochas citadas acima, o Complexo Embu é cortado por diversos corpos graníticos que correspondem a, principalmente, biotita granitos porfiríticos, biotita-muscovita leucogranitos e turmalina-granada granitos. Estes granitos foram gerados em diferentes eventos magmáticos, que duraram cerca de 200 M.a. (~780 – 580 M.a.) (Janasi *et. al.*, 2003).

Grupos São Roque e Serra do Itaberaba

Os grupos São Roque e Serra do Itaberaba são compreendidos por rochas metassedimentares e metavulcânicas, representadas por filitos, metarenitos, quartzitos, anfibolitos, metacálcários, dolomitos, xistos porfiroblásticos e rochas de composição calciossilicáticas (Rodriguez, 1988). Segundo Juliani (1993) estes dois grupos são separados pelo sistema de falhas Mandaqui. A porção norte destes grupos faz limite com a *Nappe* Socorro – Guaxupé através da falha de Jundiuvira, enquanto que a parte norte entra em contato com o Complexo Embu, através do sistema de falhas Taxaquara e Jaguari (Rodriguez, 1988).

As rochas dos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, geradas entre o Neoproterozóico e o Mesoproterozóico, apresentam metamorfismo de fácies xisto verde superior a anfibolito superior (Juliani, 1993).

Granitóides intrusivos

A RMSP apresenta grande quantidade de corpos granitoides que variam desde batólitos até pequenos stocks (Rodríguez, 1988). Estas rochas são classificadas como de origens sintectônicas e pós-tectônicas (Hassui *et. al.*, 1978 *apud* Rodríguez, 1988).

6.2.2. Bacia sedimentar de São Paulo

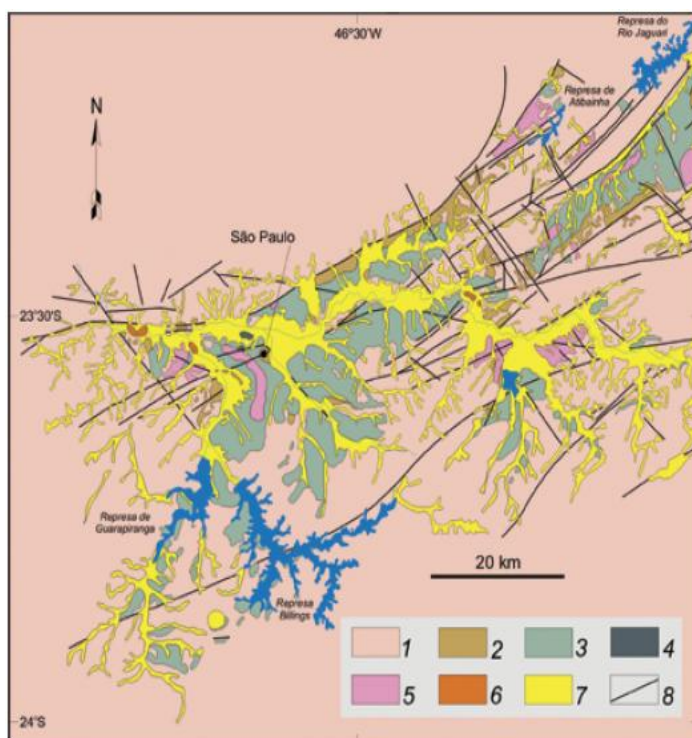


Figura 3 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté - 1) embasamento pré-cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais); 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquecetuba; 7) sedimentos quaternários; 8) falhas cenozóicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: modificado de Riccomini & Coimbra (1992) (extraído de Riccomini *et. al.*, 2004).

A Bacia Sedimentar de São Paulo está incluída no *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (Figura 3). Este *rift* é de idade paleógena, apresenta feição alongada e deprimida na direção NE-SW e tem aproximadamente 900 km de extensão (Riccomini, 1989). A deposição dos sedimentos sobre as rochas da Província Mantiqueira só foi possível em

virtude da reativação de zonas de cisalhamento neoproterozóicas de direção NE e E-W como falhas normais e transcorrentes. A tectônica ativa durante o Neógeno foi responsável pela formação de altos estruturais no segmento central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, separando as bacias de São Paulo e Taubaté. Sobre os altos estruturais que as espaçam, há bacias do tipo *pull-apart* geradas pela distensão NW-SE e compressão NE-SW (Riccomini & Coimbra, 1992).

Formação Resende

Os sedimentos que compreendem a Formação Resende representam mais de 80% daqueles que fazem parte da Bacia de São Paulo. Esta formação é característica por apresentar depósitos de leques aluviais e planície aluvial de rios entrelaçados. A formação em questão é compreendida por diamictitos e conglomerados com seixos de diversos tamanhos, envoltos por uma matriz lamítica a arenosa de coloração esverdeada nas porções mais proximais da bacia. Já rumo as porções interiores, ocorrem lamitos e arenitos.

Formação Tremembé

A formação Tremembé é composta por camadas decimétricas de argilas verdes maciças, intercalada com argilas que variam de cinza escura a preta. O ambiente deposicional deste material é característico de ambientes lacustres.

Formação São Paulo

Os sedimentos da Formação São Paulo são representados por duas litofácies correspondentes a depósitos de sistema fluvial meandrante. A primeira litofácies é composta por arenitos grossos a conglomeráticos com pacotes métricos de pelitos, sobre os arenitos, na forma de lentes; já a segunda fácies encerra arenitos de granulação média a grossa, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos.

Formação Itaquaquecetuba

A formação Itaquaquecetuba encerra arenitos característicos por apresentarem estratificações cruzadas acanaladas e tabulares de grande porte. Estes sedimentos são mal selecionados, arcoseanos e com níveis basais de conglomerados. O sistema deposicional desta formação é predominantemente fluvial entrelaçado.

Sedimentos quaternários

A associação mais recente da bacia de São Paulo são os colúvios e aluviões quaternários. Os colúvios correspondem a sedimentos argilo arenosos. Já os aluviões são caracterizados por apresentarem conglomerados, areias grossas a conglomeráticas e argilas orgânicas plástica de coloração preta.

6.3. Risco geológico associado a obras subterrâneas

As crescentes quantidades de obras subterrâneas realizadas em diversas localidades do mundo mostraram que uma campanha de investigação geotécnica de ótima qualidade pode evitar problemas futuros ou, principalmente, durante o período de construção que podem acarretar em adicionais financeiros. Em virtude disso, é recomendado que sejam adicionados aos documentos de contrato da obra um Relatório de Base Geotécnica, também conhecido como GBR (*Geotechnical Baseline Reports*), proposto no trabalho de Randal (2007).

A principal finalidade do GBR é de estabelecer uma declaração no contrato de execução de uma obra entre a empresa contratante e a contratada informando as condições geológico/geotécnicas que ocorrem no traçado, ou nas proximidades, de uma determinada obra subterrânea. A outra finalidade do GBR é apresentar as considerações geotécnicas e o método construtivo através da análise dos dados obtidos durante o processo de investigação; enfatizar ao contratante sobre as heterogeneidades de subsuperfície; auxiliar o contratante na escolha do método de escavação e contenção de paredes; e ser usado como base para que o gerente de obra possa administrar o desempenho do processo construtivo. Anexo ao GBR deve constar o Relatório de Dados Geotécnicos, também conhecido como GDR (*Geotechnical Data Reports*). Este documento tem a função de apresentar todos os dados obtidos durante o processo de investigação geotécnica do local como perfis de sondagens, descrições de campo, resultados de análises de laboratório (análise granulométrica, triaxial, compressão uniaxial, entre outros) e como estas foram realizadas. Com isso, o GBR só pode ser finalizado após a interpretação das informações presentes no GDR.

Somente a apresentação do GDR em um contrato de licitação não é o suficiente para o entendimento da geologia local, já que o GBR apresenta a função de trazer o entendimento da geologia local através de análises crítica e interpretações. Assim, o GBR pode auxiliar a identificar condições de subsuperfície que necessitem de maior atenção para não interferir na evolução da construção, prever medidas de remediação mais adequadas para determinados trechos da escavação e evitar custos adicionais desnecessários.

O GBR é principalmente usado por projetistas. Estes usam o documento como base para a criação do plano de construção e estimativa prévia dos custos, já levando em consideração as adversidades do meio; por empresas construtoras interessadas no projeto; para o conhecimento dos riscos geotécnicos e condições de subsuperfície; e por fim para a determinação dos equipamentos e métodos que serão utilizadas para a escavação com maior rendimento e segurança.

O produto final do GBR é trazer a interpretação que um grupo de especialistas concluíram com base na interpretação de todos os dados de pesquisa apresentados no RGD. Com isso, é possível estimar a composição e quantidade de material que será removido ao longo do eixo do túnel; caracterizar o material em subsuperfície quanto ao tipo de solo, variedade de rochas, tamanho de grãos, permeabilidade e mineralogia; entender hidrogeológico local; o impacto que a obra pode causar nas áreas próximas no momento da escavação; identificação de estruturas (dobras, falhas, foliações, juntas e bandamentos); e identificar heterogeneidades do meio que possam aumentar o risco como: matacões, interferências antrópicas (dutoras, cabos de alta tensão, cabos de fibra óptica, tubulações de gás, etc.), indicação da posição do maciço rochoso, presença de gás e contaminações de solos e água subterrânea.

A finalidade do modelo proposto por Pastore (2009) é a de qualificar os riscos geológicos em três níveis: alto, médio e baixo. Esta classificação é feita através da análise crítica de algumas variáveis muito importantes, como a complexidade geológica, a qualidade da campanha de investigação geotécnica e o tipo de obra a ser realizada. A classificação é feita com o auxílio de três tabelas (Figuras 4, 5 e 6). Cada variável analisada está correlacionada a um valor. A Figura 4 é nomeada como redutor em função do tipo de obra. Esta apresenta um valor que está associado ao tipo de obra que será realizada. As Figuras 5 e 6 tratam sobre a classificação da complexidade geológica e da classificação do programa de investigação respectivamente. Nestas duas tabelas também são atribuídos valores de acordo com o julgamento da geologia e da qualidade da investigação geotécnica. Cada um destes é multiplicado pelo redutor obtido na Figura 4 e então os dois resultados são inseridos na Figura 7 que corresponde à classificação do risco geológico. Esta última tabela irá fornecer o risco geológico correspondente a uma determinada obra ou até área, sendo este um dos resultados importantes para ser adicionado ao contrato de licitação de construção.

ITEM	TIPO DE OBRA	REDUTOR
1	Túneis de adução, túneis longos com alta cobertura, taludes de casa de força > 30 metros de altura, casa de força subterrânea e minas subterrâneas	0,70
2	Túneis de desvio de rodoferroviárias, taludes industriais e estruturas de concreto	0,85
3	Taludes < 30 metros de altura, taludes provisórios, fundações de barragens de terra e enrocamento, subestação	1,00

Figura 4 - Tabela com redutores em função da obra (extraído e modificado de Pastore 2009)

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS		COMPLEXIDADE GEOLÓGICA		
ITEM	PARÂMETRO	FAIXA DE VALORES		
1	Quantidade de estudos na região da implantação da obra	muitos 20	alguns 10	nenhum 2
2	Obras similares construídas no mesmo domínio geológico	muitas 20	algumas 15	nenhuma 2
3	Tipo de rocha predominante no sítio da obra	A 15	B 5	C 0
4	Atividade tectônica regional	A 25	B 10	C 1
<u>Somatória valores x redutor tipo de obra = Peso</u>				
Peso		50 - 75	25 - 50	0 - 25
Classe		BAIXA	MÉDIA	ALTA

TIPO DE ROCHA	
A	Granitos, basaltos
B	Xistos, gnaisses
C	Arenitos, folhelhos

TECTÔNICA	
A	Baixa
B	Média
C	Alta

Figura 5 - Classificação da complexidade geológica (extraído e modificado de Pastore 2009).

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS	QUALIDADE DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO		
	FAIXA DE VALORES		
1 – Pesquisa bibliográfica	Boa 4	Média 2	Insuficiente 1
2- Interpretação de fotografias aéreas e análise de imagens de radar e satélite	Adequada 8	Razoável 4	Insuficiente 0
3 – Caminhamento elétrico	Existente 8	Parcial 4	Não realizado 0
4 – Sísmica de refração	Existente 6	Parcial 4	Não realizado 0
5 – Sondagens rotativas nas estruturas	Em todas 8	Algumas 7	Insuficiente 2
6 – Qualidade da descrição do testemunho	Boa 8	Razoável 4	Não satisfatória 1
7 – Ensaios de infiltração e perda d'água	Suficientes 6	Parciais 2	Não realizados 0
8 – Ensaios em amostra de rocha	Especiais 8	Usuais 4	Inexistentes 0
9 – Ensaios em amostra de solo	Especiais 8	Usuais 4	Insuficientes 1
10 – Modelo geológico	Detalhado 8	Simplificado 3	Muito simplificado 1
11 – Modelo geomecânico	Consistente 8	Simples 4	Inexistente 0
12 – Modelo hidrogeológico	Consistente 8	Simples 4	Inexistente 0
13 – Interatividade entre informações geológicas e projeto	Intensa 8	Média 4	Não realizada 0
14 – Análise de risco geológicos esperados	Creriosa 4	Superficial 2	Inexistente 0
<u>Somatória valores x redutor tipo de obra = Peso</u>			
Peso		100 - 70	70 - 30
Classe		BOA	MÉDIA
			RUIM

Figura 6 - Classificação do programa de investigação (extraído e modificado de Pastore 2009).

COMPLEXIDADE GEOLÓGICA ↑	ALTA	A	A	M
	MÉDIA	A	M	B
	BAIXA	M	B	B
		RUIM	MÉDIA	BOA
		QUALIDADE DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO →		

Legenda:

A:	ALTO
M:	MÉDIO
B:	BAIXO

Figura 7 - Classificação do risco geológico (extraído e modificado de Pastore 2009).

Para que o risco seja baixo, a Associação Americana de Engenheiros Civis (Randal 2007) sugere a metodologia de gestão de risco, que compreende em: revisar os dados geotécnicos, indicando a validade ou não do material disponível; avaliar o risco para que seja possível estabelecer um rascunho do projeto inicial, já tendo em mente qual tipo de problema pode ser encontrado, intensificar a investigação nas regiões mais problemáticas; e ter conhecimento dos tratamentos que serão necessários para remedia-los e, conseqüentemente, disponibilizar estes problemas no contrato de obra para que o contratado tenha conhecimento das adversidades que podem ser encontradas durante a etapa de construção. Randal (2007) ainda cita que para a redução de risco é necessário dispor de um orçamento adequado para a investigação geotécnica, que os dados obtidos na campanha investigatória sejam analisados por profissionais experientes no assunto e que sejam capazes para elaborar um relatório de qualidade quanto aos riscos existentes e, por último, dispor de recursos e tempo suficiente para elaborar um relatório geotécnico, como um RGB, claro e com conteúdo suficiente para elaboração do traçado da obra, quais métodos construtivos serão adotados, os custos previstos já levando em consideração as adversidades do meio e ter consciência dos riscos existentes.

Através da investigação geológica, sondagens percussivas e rotativas, ensaios geotécnicos, geofísica e mapeamento geológico, é possível identificar quais os tipo de condicionantes geológicos presentes no trecho a ser escavado. A identificação de estruturas como dobras, falhas, zonas de cisalhamento, planos de acamamento, foliação e sistemas de juntas podem auxiliar no entendimento da disposição das rochas em subsuperfície. Além disso, caracterizar porções do maciço rochoso que apresentem zonas de fraqueza é de extrema importância, pois estas zonas são responsáveis pelo aumento do risco de desmoronamento durante o processo construtivo. A estimativa de custos adicionais que

serão necessários para a remediação desta área problemática será prevista após a análise dos dados da investigação, já prevendo as construtoras dos riscos existentes.

O trabalho de Hoek & Palmeiri (1998) mostra claramente a necessidade de uma intensa campanha de sondagens antes da construção de túneis. Este trabalho traz um diagrama que mostra o aumento dos custos contratuais em relação à metragem de sondagens realizadas com o comprimento total do túnel que será escavado (Figura 8).

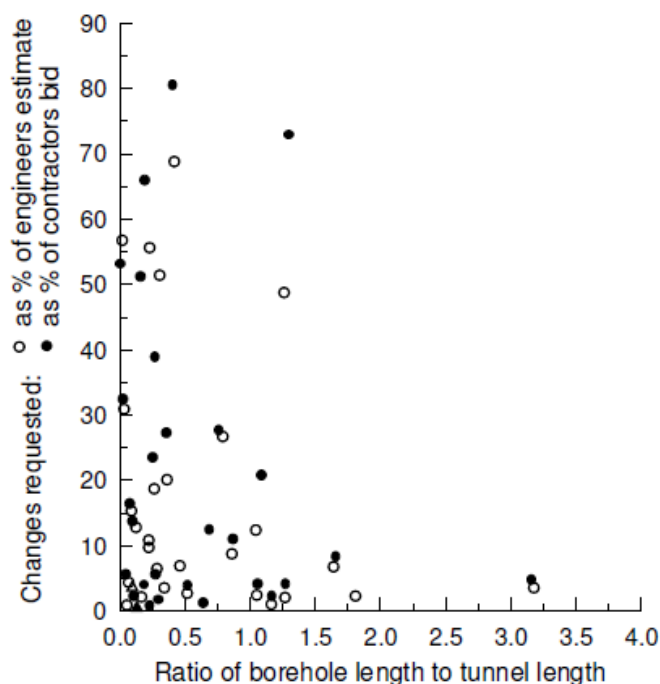


Figura 8 – Variação dos custos em função do comprimento de sondagens realizadas para construção de túneis. (extraído de Hoek & Palmieri (1998)).

O diagrama demonstra que quanto menor a razão comprimento de sondagens exploratórias/comprimento do túnel, maior será a necessidade de mudanças no projeto inicial, e consequentemente aumento nos custos.

6.4. Método de perfuração

Grande parte das escavações a serem realizadas na construção abordada neste relatório serão através do método *Tunnel Boring Machines* (TBM), que é realizada através do avanço de uma couraça (*shield*) metálica (Figura 9). Este método apresenta diversos tipos de máquinas, uma vez que o meio perfurado pode ser bastante heterogêneo devido a variações das rochas e solo. Vale ressaltar que não existe uma máquina que possa executar perfuração com alto rendimento em diferentes ambientes, por isso é que existe uma larga

variedade de maquinários (Barla et. al., 2008). Ao longo de todo o trecho do túnel é utilizada a mesma máquina, apenas mudando as ferramentas de corte e os fluidos lubrificantes. Em alguns casos, o túnel é escavado com duas tuneladoras em direções de avanço contrária, para acelerar o processo de perfuração.

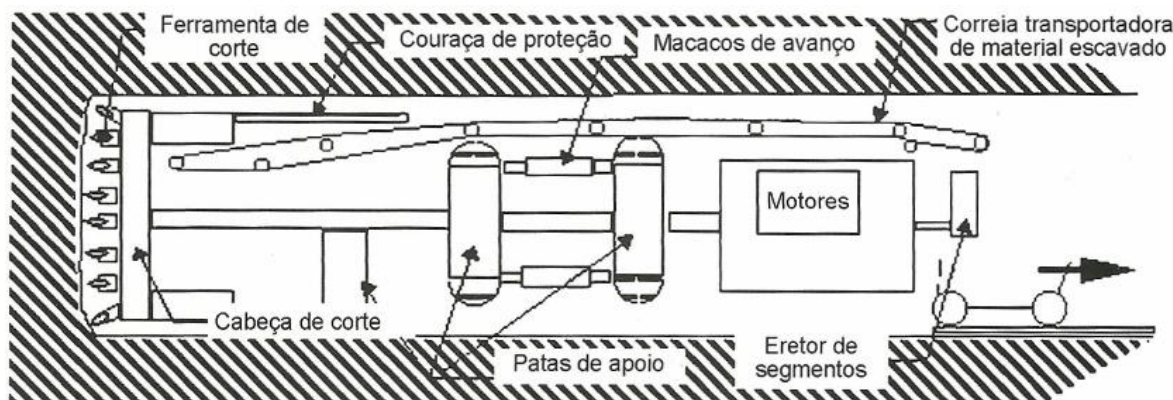


Figura 9 - Esquema de uma autoperfuratriz denominada de TBM (extraído de Santos et. al., 1998).

O trabalho de Barla et. al., (2008) também faz alguns comentários sobre as limitações geológicas quando é executada a perfuração utilizando o método TBM. Ele enfatiza que sem uma investigação geotécnica detalhada não é possível prever qual o tipo de maquinário será necessário para a abertura do furo. Neste artigo, é usado como exemplo o caso de um túnel escavado na Espanha. Foram realizados 6000 metros de sondagens para um túnel de aproximadamente 12 quilômetros de extensão, ou seja, existem 0,5 metros de sondagem para cada metro de túnel perfurado. Com essa campanha de investigação tão detalhada, foi possível relatar a existência de rochas com durezas diferentes e com qual frequência, aproximada, essas diferentes rochas seriam encontradas no trecho do eixo do túnel. Através destas informações, foi possível encomendar uma máquina que satisfizesse os diferentes ambientes, procurando sempre manter um ritmo de perfuração que não trouxesse problemas de estabilidade das paredes e impedimento de avanço da máquina. A instabilidade das paredes logo atrás da face cortante é um problema muito comum quando usado o TBM. Em alguns modelos de máquina se torna muito difícil a instalação de suportes que diminuam a chances de haver algum colapso sobre máquina. Caso haja algum tipo de desmoronamento é provável que ocorra atrasos no progresso da obra. A instabilidade das paredes perfuradas dependem do tipo de estruturas presentes nas rochas (juntas, falhas e etc), tipo de TBM utilizado, o *design* e as características do equipamento, o diâmetro do furo e do sistema de suporte para conter as paredes do túnel.

Assim como Barla et. al., (2008) cita sobre os fatores geológicos que podem interferir no processo de perfuração como também aumentar os custos, o trabalho de Kanji et. al., (2012) também enfatiza a influência de alguns fatores no avanço de tuneladoras. Kanji et. al., (2012) cita a necessidade de ensaios de abrasividade para o conhecimento da dureza

da rocha, determinação do espaçamento entre as fraturas que auxiliam na fragmentação do material e, por fim, a importância da classificação geomecânica do maciço que inclui todos os fatores citados.

Outro fator relevante para o bom andamento da perfuração em locais com solo é o conhecimento do material que o compõe. Solos muito argilosos podem causar o entupimento (*clogging*) de ferramentas de corte e do sistema de sucção do material cortado. O potencial de entupimento destes mecanismos é dado em função do potencial de adesão da argila do solo com os componentes que a mesma entrará em contato, do comportamento da argila ao ser transportada, da coesão do material e da tendência destes se dissolverem na água (Thewes & Burger, 2004).

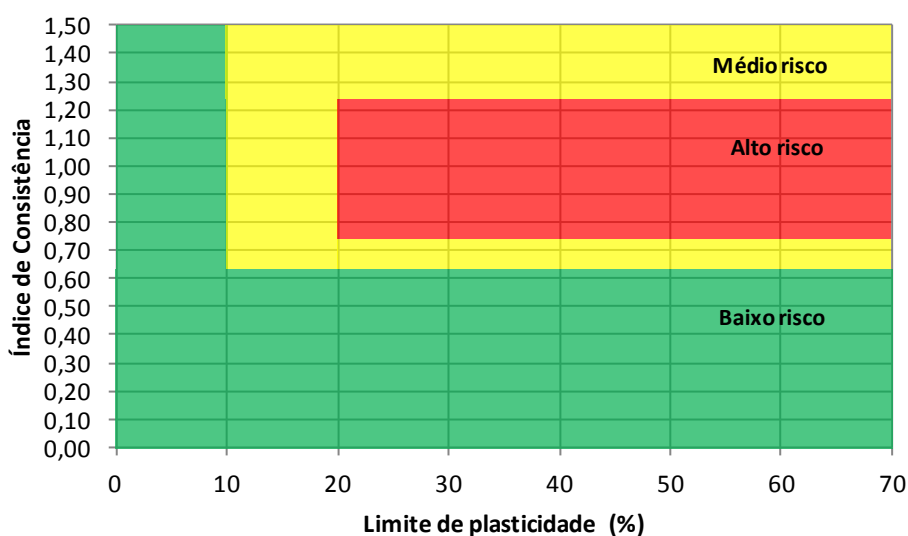


Figura 10 - Risco potencial de entupimento (*clogging*) em função do índice de plasticidade e do índice de consistência dos solos argilosos, a partir de Thewes e Burger (2004)

Através de ensaios granulométricos e de plasticidade de solos, é possível prever o risco associado ao entupimento de ferramentas e sistema de sucção da tuneladora. Este modelo de risco é proposto por Thewes & Burger (2004) e assume duas variáveis para a sua estimativa: o índice de consistência e o limite de plasticidade (FIGURA 10).

Se caso for necessária à escolha de uma tuneladora de frente aberta, como a *shield* EPB (*Earth Pressure Balanced*), é necessário o conhecimento da permeabilidade do solo e das pressões hidrostáticas atuantes, uma vez que o princípio desta tuneladora baseia-se no idêntico de que o material escavado pode ser usado para suportar a frente de escavação.

Conforme sugerido por Maidl *et. al.*, (1996) *apud* Metrô (2013), as curvas granulométricas abaixo (Figura 11) podem auxiliar na determinação da aplicabilidade do *Shield* EPB.

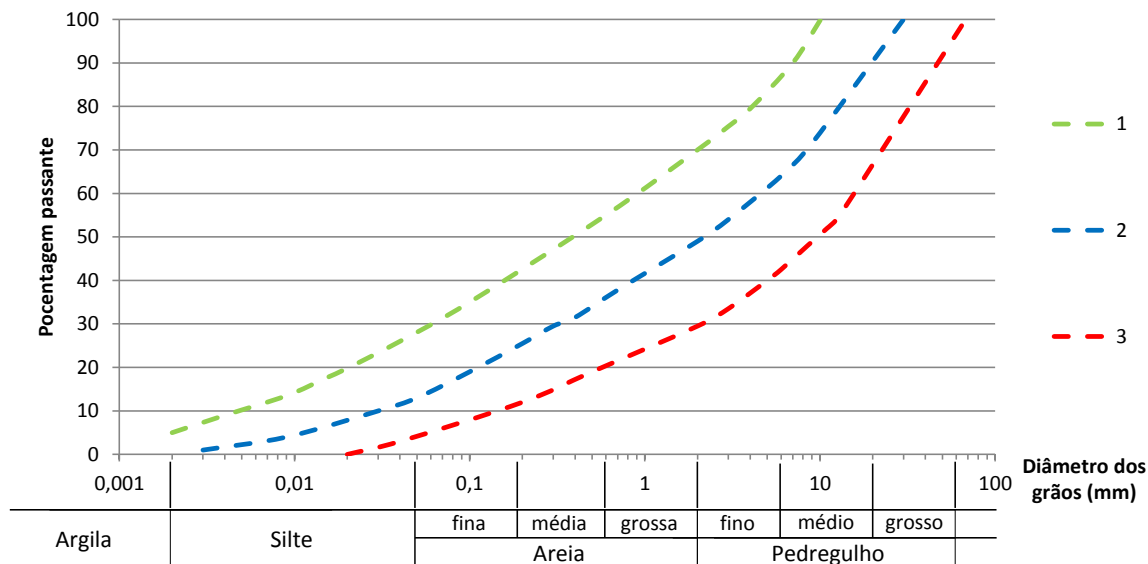


Figura 11 – Curvas granulométricas limites para aplicação do *Shield* EPB, de acordo com Maidl *et. al.*, (1996) *apud* Metrô (2013).

Para solos com granulometria mais fina do que a curva 1 (porcentagem de finos > 30%), o *Shield* EPB é aplicável em quaisquer condições de permeabilidade e pressão hidrostática. Já para solos com granulometria entre as curvas 1 e 2, esta tuneladora é aplicável em casos que a pressão hidrostática seja de 2 atm e a permeabilidade inferior a 10^{-3} cm/s. Se as curvas granulométricas estiverem entre 2 e 3, o EPB é aplicável somente para locais com pressão hidrostática. O *shield* EPB não é aplicável para solos com granulometria abaixo da curva 3, em virtude da alta permeabilidade do solo.

Para um melhor rendimento do processo de perfuração é necessário que haja uma intensa investigação geotécnica na área de interesse seguida por diversos ensaios em amostras de sondagens realizadas. A geofísica pode auxiliar no mapeamento do topo rochoso na procura de falhas com ocorrência percolação de água. Além disso, as sondagens auxiliam neste mapeamento e também fornece amostras para realizar ensaios granulométricos, uniaxiais e triaxiais além de ensaios de abrasividade. Com estes estudos é possível definir o tipo de equipamento que será utilizado na execução do túnel, favorecendo o alto rendimento de perfuração e evitando problemas de desmoronamento.

6.5. Ensaios laboratoriais

6.5.1. Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão uniaxial consiste na aplicação de uma força unidirecional em um testemunho de rocha. Este esforço é aplicado na direção do seu comprimento maior até causar o rompimento da amostra. Segundo a designação D 7012 – 10 (ASTM, 2010), a carga é aplicada sobre o corpo de prova de forma constante, entre 0,5 e 1,0 MPa/s.

Os resultados obtidos são usados, por engenheiros, para determinar parâmetros de estabilidade, como também para selecionar a técnica mais apropriada de escavação. A D 7012-10 (ASTM, 2010) enfatiza que os resultados obtidos em laboratório não representam as características reais das áreas próximas, uma vez que aquela amostra estava sujeita a diversos esforços e podem haver juntas, falhas, heterogeneidades mineralógicas e planos de fraqueza nas proximidades do testemunho ensaiado.

A designação D7012 – 10 (ASTM, 2010) foi criada para substituir a antiga D2938 – 95 (ASTM, 1995), que também abrangia sobre este ensaio. A única adaptação feita em relação a este ensaio foi sobre a determinação das dimensões do corpo a ser ensaiado. De acordo com a D2938 – 95 (ASTM, 1995), a escolha do testemunho a ser submetido ao ensaio não levava em consideração o diâmetro e o comprimento da amostra. Já segundo a designação D7012 – 10 (ASTM, 2010), a escolha do testemunho a ser amostrado é feita através de uma análise visual da rocha, levando em consideração os minerais constituintes, o tamanho dos grãos e a presença de poros e fissuras. O diâmetro do testemunho é escolhido em relação ao tamanho do maior grão presente na rocha. Em geral o diâmetro deve ser de aproximadamente dez vezes o tamanho do maior grão. Já para rochas mais frágeis o diâmetro deve ser de seis vezes o tamanho do maior grão. No entanto, o diâmetro mínimo aceito é de 47 mm. Após a escolha do diâmetro, é necessário determinar o comprimento da amostra que deve estar entre o intervalo de 2,0 : 1 e 2,5 : 1 (comprimento : diâmetro).

6.5.2. *Resistência à compressão por compressão diametral*

O ensaio de compressão diametral é regido pela norma D3967 (ASTM, 2008) e ele consiste na aplicação de cargas constantes na direção do plano diametral do corpo de prova. A finalidade deste ensaio é obter uma medida indireta de resistência à tração.

De acordo com esta designação, o corpo de prova deve ser cilíndrico, com razão espessura/diâmetro entre 0,20 e 0,75 e o diâmetro do mesmo deve ser pelo menos dez vezes maior do que o maior grão de qualquer mineral da amostra.

6.5.3. *Índice de abrasividade CERCHAR*

O ensaio CERCHAR é realizado em amostras de rocha e tem como função avaliar os parâmetros relacionados à abrasividade. O ensaio consiste em atritar uma ponteira de material com dureza conhecido sobre uma superfície de amostra de rocha devidamente fixada. Acima desta ponteira há um peso de 7kg com função de exercer uma força conhecida sobre o corpo. A ponteira metálica é atritada sobre a rocha ao longo de um

trecho de 10 mm. Após isto, a ponteira é retirada e seu desgaste é analisado para então poder determinar o índice de abrasividade. A dureza da rocha está, principalmente, relacionada a sua composição mineralógica, textura, estruturação e grau de alteração (Monteiro *et. al.*, 2012).

Este ensaio tem como principal utilidade determinar a dureza de rochas para que seja possível escolher ferramentas adequadas que não se desgastem facilmente e que mantenham o ritmo adequado e esperado de perfuração. A escolha ou uso de ferramentas inadequadas podem atrasar o processo de escavação da obra, como também aumentar os custos em virtude da utilização de materiais de corte em excesso para avanços curtos de perfuração.

6.5.4. Ensaio para cálculo do índice de plasticidade

Os argilominerais se comportam de diversas maneiras quando entram em contato com a água, isso devido as suas variadas estruturas mineralógica. Solos com teores significantes de argilominerais podem trazer problemas de engenharia para obras futuras ou já existentes. Quando o teor de umidade das argilas é muito elevado, estas tendem a se comportar de forma plástica; já quando o teor de umidade é muito baixo, estas tendem a ser quebradiças. Em virtude deste comportamento diferenciado das argilas e dos diversos tipos existentes de argilominerais foram criados pelo engenheiro químico Attenberg os ensaios de limite de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) e futuramente adaptados e padronizados pelo professor de mecânica dos solos Arthur Casagrande. Através destes dois ensaios é possível estabelecer o índice de plasticidade (IP). O índice de plasticidade é calculado através diferença do limite de liquidez pelo limite de plasticidade ($IP = LL - LP$) (Figura 12). A ideia de obter o índice de plasticidade é a de indicar a faixa de umidade que um determinado solo se apresenta plástico (Pinto, 2006).

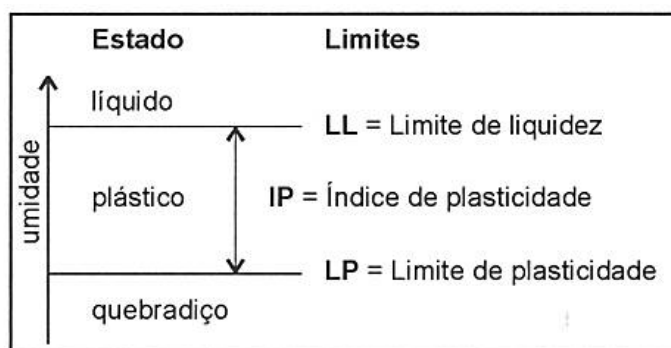


Figura 12 - Limites de Attenberg (extraído de Pinto *et. al.*, 2006).

O ensaio do limite de liquidez é realizado com o aparelho de Casagrande. Este é caracterizado por colocar uma porção de solo com uma determinada umidade em um recipiente. É feita uma ranhura nesta amostra dividindo a amostra em duas partes. O recipiente é colocado no aparelho de Casagrande (Figura 13) que irá determinar a quantidade de golpes que será necessário para que essa ranhura seja fechada. Segundo a norma NBR 6459 (ABNT, 1984a), é necessário atingir uma umidade que necessite de 25 golpes para fechar esta ranhura. Por este motivo é que são realizados vários ensaios com o mesmo solo em diferentes umidades. Caso não encontre a umidade desejada para fechar a ranhura nos 25 golpes, todos os dados obtidos são interpolados a fim de estimar a umidade necessária para fechar a ranhura na quantidade de golpes estipulada pela norma.

O ensaio do limite de plasticidade é realizado somente quando é solicitado o valor do índice de plasticidade dos solos. Este ensaio é padronizado pela norma NBR 7180 (ABNT 1984b). Este ensaio é caracterizado por indicar o menor teor de umidade necessário para se moldar um cilindro de solo com 3 milímetros de diâmetro com a palma da mão. Este ensaio, assim como o de limite de liquidez, é feito com diversos teores de umidade.

Os resultados dos teores de umidade dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade devem ser expressos em porcentagem.

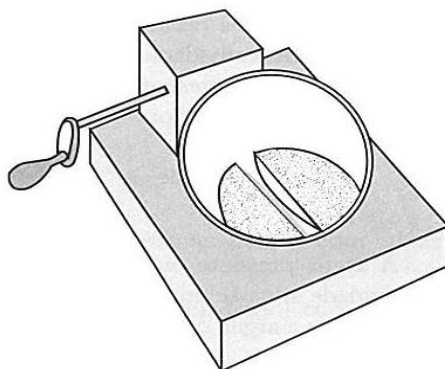


Figura 13 - Figura esquemática do aparelho de Casagrande para a determinação do LL (extraído de Pinto *et. al.*, 2006).

6.6. Sondagens

6.6.1. Sondagem percussiva

A sondagem do tipo SPT (*Standard Penetration Test*), também conhecida como sondagem de simples reconhecimento tem como finalidade a determinação dos tipos de solos e as suas respectivas profundidades, a posição do nível d'água e o índice de resistência à penetração de cada metro sondado. Este tipo de sondagem tem como princípio a cravação de um amostrador através da queda livre de um peso de 65kg de massa a uma altura de 75 cm sobre uma sequência de hastes metálicas a cada metro, com a finalidade de determinar as três variáveis citadas acima (Figura 14).

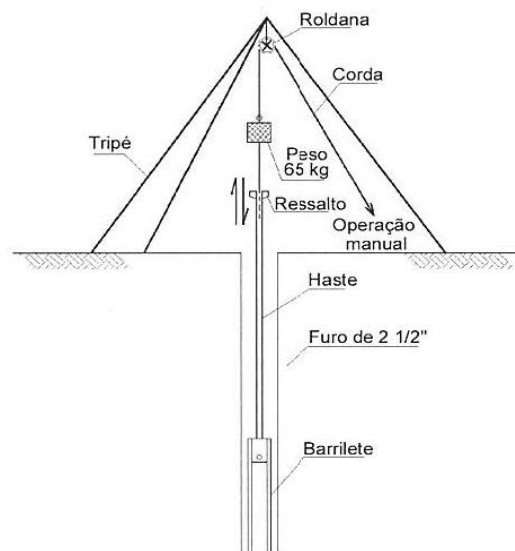


Figura 14 - Esquema de perfuração por percussão
(extraído de Pinto *et. al.*, 2006)

Segundo a norma NBR 6484 (ABNT, 2001), a sondagem deve ser iniciada com a utilização do trado-concha ou cavadeira manual até o primeiro metro de profundidade, seguido pela instalação do tubo de revestimento para evitar colapso do furo. Após este procedimento, intercala-se o processo de amostragem e de tradagem com o trado helicoidal até atingir o nível d'água. Ao encontrar o nível do lençol freático, a operação que utiliza o trado deve ser trocada pela perfuração através da circulação d'água com trépano de lavagem. O revestimento deve ser cravado até a cota necessária e este deve ficar ao mínimo a 50 centímetros do trecho a ser ensaiado. O processo de amostragem é realizado a partir de profundidades redondas (ex. 0, 1, 2, 3... metros), tendo como ponto zero a cota da boca do furo. O sondador deve anotar quantas batidas são necessárias para penetrar toda a composição em três intervalos de 15 centímetros, totalizando 45 centímetros. Com isso a sondagem teria 5,45 metros de profundidades. Após este passo, o sondador deve subir todo o conjunto de hastes, retirar a amostra do bico do amostrador e seguir com o processo de lavagem por circulação d'água ou tradagem, dependendo da posição do lençol freático, até atingir a profundidade de 6 metros. Após isso todo o processo se repete até que a sondagem atinja o critério de paralisação apresentado nesta mesma norma ou o critério previamente definido pelo cliente.

O processo de amostragem deve ser interrompido e seguido pela perfuração por circulação d'água se caso em qualquer dos três segmentos de 15 centímetros o número de golpes ultrapassarem 30 batidas; se ao longo dos 45 centímetros forem ultrapassados 50 golpes; ou se o amostrador não sofrer avanço após 5 golpes sucessivos do peso. A sondagem deve ser paralisaada se uma das seguintes condições forem obdecidas: quando

obtiver 30 golpes para penetrar os 15 centímetros iniciais do amostrador em 3 metros de sondagem sucessivos; quando obtiver 50 golpes para penetrar 30 centímetros do amostrador em 4 metros de sondagem sucessivos; quando obtiver 50 golpes para penetrar 45 centímetros do amostrador em 5 metros sucessivos de sondagem.

A equipe de geotécnicos da projetista é a responsável por determinar a profundidade que a sondagem deve ser atingida levando em consideração o projeto inicial da obra. No entanto, se caso um dos três critérios de paralisação estipulados na NBR 6484 (**ABNT, 2001**) for obedecida, a sondagem deve ser paralisada.

6.6.2. *Sondagem rotativa*

A sondagem rotativa é outro método de investigação geológica que consiste na recuperação de amostras, também conhecido como testemunhos, através do uso de um conjunto motomecanizado em trechos com rocha dura que não é possível realizar a percussão. A perfuração é feita por um tubo, denominado de barrilete, que apresenta uma peça cortante em sua extremidade. Esta peça é conhecida como coroa e pode ser composta por pastilhas de vídia ou por diamantes sintéticos incrustados em uma liga metálica de alta dureza. Ao rotacionar a coroa sobre a rocha, é possível que esta corte o material e permita o alojamento da rocha no interior do barrilete. Quando toda a manobra for executada, todas as tubulações são erguidas até a superfície e então a amostra de rocha é retirada (Santos et. al., 1998).

Em virtude da geologia local e do tipo de obra a ser realizada na região a ser investigada, é muito comum a execução de sondagens mistas, que agrupa sondagem do tipo SPT e a rotativa para um mesmo furo.

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1. Cronograma

O cronograma do respectivo trabalho de formatura segue abaixo (Figura 15):

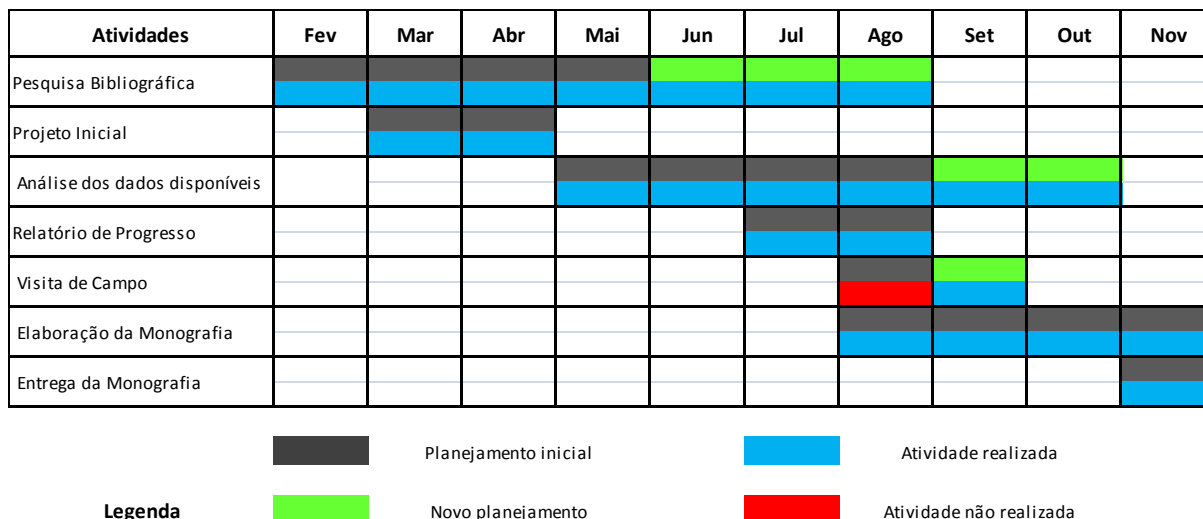


Figura 15 - Cronograma das atividades propostas.

7.2. Matriz de risco

A classificação do risco geológico para a obra em questão será feito com base no modelo proposto por Pastore (2009). Seu método considera diversas variáveis, como o tipo de obra que será realizada, a complexidade geológica e a qualidade do programa de investigação, conforme já foi abordado no tópico de revisão bibliográfica. O resultado final da interpretação será a classificação em três níveis: alto (A), médio (M) e baixo (B). Este método pode ser aplicado tanto no projeto básico, quanto na fase de construção.

As figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam a sistemática de classificação do risco geológico, que deve ser feita classificando a complexidade geológica e o programa de investigação, para então aplicar o redutor do tipo de obra e, por fim, classificar o risco geológico em três níveis.

A figura 4 aborda sobre o tipo de obra que será realizada, dando a cada opção um redutor que será aplicado na classificação da complexidade geológica e do programa de investigação.

A figura 5 classifica a complexidade geológica, levando em consideração qual a intensidade de estudos que foram realizados na região da obra, o conhecimento da empresa construtora sobre o tipo de construção que será realizado, o tipo de rocha e a tectônica local.

A figura 6 classifica o programa de investigação, abordando de diversos assuntos, como pesquisa bibliográfica, realização de ensaios (geotécnicos, geofísicos, etc), modelos geológicos, etc.

Após as classificações feitas utilizando as tabelas acima, teremos dois valores que serão aplicados na figura 7, podendo então, classificar o risco geológico.

Em razão da inexistência de ensaios geofísicos (caminhamento elétrico e sísmica de refração) a tabela de classificação do programa de investigação necessitou ser adaptada para que o resultado final não fosse alterado (Figura 16). A execução destes métodos geofísicos não seria necessária, uma vez que no local há muitos ruídos e a campanha de sondagens define com bastante detalhamento o topo do maciço rochoso.

Assim como os métodos geofísicos, a interpretação de fotografias e imagens de radar e satélite não se aplica para este estudo, uma vez que a região é bastante localizada e intensamente urbanizada, portanto, o resultado não seria significativo. Com isso, este item também será excluído da matriz de Pastore (2009).

A alteração foi feita levando em consideração o peso que o caminhamento elétrico e a sísmica de refração representam no valor total obtido na classificação do programa de investigação. As alterações foram feitas tentando manter a proporcionalidade dos valores atuais com os anteriores assim como mostrado na tabela abaixo.

Somatória valores x redutor tipo de obra = Peso				
Peso		100 - 70	70 - 30	30 - 0
Classe		BOA	MÉDIA	RUIM
	Diferença	30	40	30
	Razão (diferença/total)	0,3000	0,4000	0,3000

Somatória valores x redutor tipo de obra = Peso				
Peso		78 - 54	54 - 23	23 - 0
Classe		BOA	MÉDIA	RUIM
	Diferença	24	31	23
	Razão (diferença/total)	0,3076	0,3974	0,2948

Figura 16 – Adaptação feita em função da inexistência de caminhamento elétrico e sísmica de refração. Imagem superior: tabela original de Pastore (2009); imagem inferior: tabela de Pastore (2009) adaptada mantendo a razão entre os pesos da tabela original com a adaptada.

7.2.1. Feições/Condicionantes geológicas

Condicionante geológico está diretamente ligado às feições geológicas. Estas feições são relacionadas a qualquer elemento de origem geológica que são relacionadas a variações do relevo como também a estruturas tectônicas de diversas escalas (**Pastore, 2009**).

Condicionantes geológicos são todas as feições geológicas que podem ou não interferir na estabilidade, estanqueidade, durabilidade e geometria de escavações subterrâneas. Dentre as feições/condicionantes geológicos abordados por **Pastore (2009)** que podem aumentar o nível de risco de obras, temos:

Falhas ou zonas de cisalhamento rúptil

Estes tipos de estrutura apresentam caráter rúptil e podem apresentar-se em diversas escalas. A identificação das mesmas através de testemunhos de sondagem é muito difícil, já que quando preenchidas, o material acaba sendo lavado pela água da sondagem. A visualização destas estruturas é facilitada em grandes afloramentos naturais ou escavações.

A identificação de falhas ou zonas de cisalhamentos é muito importante, já que os seus planos representam zonas de fraquezas e apresentam problemas de ruptura e infiltração de água.

Dobras

Assim como as falhas, as dobras são difíceis de serem identificadas em furos de sondagem. Elas podem ocorrer em escala macroscópica como também microscópica. Em geral, a sua identificação é feita através de grandes afloramentos ou pelo mapeamento detalhado.

Planos de acamamento e de foliação

Os planos de acamamento e de foliação são gerados durante a formação de rochas sedimentares, metamórficas e, eventualmente, de rochas ígneas. São facilmente identificáveis em afloramentos como também em testemunhos de sondagem.

Este tipo de estrutura pode ser um agravante, pois representam planos de fraqueza que podem romper mais facilmente, por isso que a identificação de suas atitudes é essencial.

Sistema de juntas e fraturas

As juntas e as fraturas são formadas por feições planares lisas ou onduladas, podendo assumir diversas posições no espaço. A determinação destas podem ser feitas através da análise de sondagens.

A identificação das mesmas é essencial para o planejamento das estruturas de suporte e de fundações que serão utilizadas, uma vez que necessitarão de remediações, e portanto custos adicionais.

Cavernas, cavidades e dolinas

Estes tipos de feições são comuns onde há ocorrência de rochas carbonáticas. As suas identificações podem ser feitas através de furos de sondagem e representam sérios problemas para obras de engenharia, pois podem sofrer colapso e representam zonas de fuga d'água.

Solos moles e compressíveis

Regiões com solos moles e compressíveis são depósitos geológicos comuns encontrados em zonas de mangues, e em planícies aluvionares. A determinação destes tipos de solo é muito importante, e geralmente é feita através de sondagens percussivas. Estes solos exigem tratamentos especializados de fundação.

Rochas desagregáveis e friáveis

Estes tipos de rochas são caracterizadas por serem facilmente erodidas, portanto são mais frágeis e suportam menos esforço sobre elas. Como exemplo, temos arenitos que não contém cimentação, e com isso, a percolação de água no meio destes podem acelerar o processo erosivo, enfraquecendo a rocha.

Rochas de resistência extremamente elevada

Rochas com alta resistência, geralmente, são muito ricas em quartzo. Estas rochas são caracterizadas por consumir quantidades maiores de ferramentas de corte ou por necessitarem de mais explosivos para realizar os desmontes. Em virtude disso, a determinação destes tipos de rochas é importante para que as construtoras saibam das dificuldades que serão encontradas no processo de perfuração.

Topo rochoso muito irregular

Este tipo de feição é muito comum, e pode acarretar em problemas nas escavações e em fundações. O contato solo/rocha pode ser muito irregular e pode conter zonas mais

suscetíveis a percolação de água, portanto podem conter zonas mais ou menos alteradas e com resistências diferentes.

Tensões virgens elevadas

Tensões virgens elevadas são fenômenos naturais que ocorrem no maciço em determinadas regiões. Isso pode acarretar instabilidade quando escavado, podendo ocorrer *rock bursting* e com isso colapso de porções do túnel.

Pressões e vazões elevadas de água subterrânea

Ambientes com estas características são comuns por necessitarem de planos de bombeamento especiais, para que haja o rebaixamento do nível d'água e não comprometa a estabilização de regiões escavadas.

Águas ácidas

Rochas com grande quantidade de sulfetos, quando percoladas com água, podem acarretar no abaixamento do pH das mesmas em virtude da formação de ácido sulfúrico. A reação deste fluido ácido com estruturas de contenção de túneis (aços, ferros e concretos) aceleram o processo de degradação dos mesmos, fazendo com que haja redução de suas resistências.

7.3. Parâmetros analisados

A matriz de risco proposta por **Pastore (2009)** leva em consideração o tipo de obra, a complexidade geológica e a classificação do programa de investigação. Inserido em cada item destes, há diversas variáveis que estão listadas abaixo:

7.3.1. Redutor em função do tipo de obra

A determinação do tipo de obra influencia de forma representativa no grau de risco. Obras subterrâneas, extensas e muito profundas representam mais risco quando comparadas àquelas a céu aberto ou de tratamentos de solo ou maciço rochoso.

7.3.2. Complexidade geológica

A complexidade geológica abrange sobre as características regionais do sítio da obra e dos conhecimentos prévios adquiridos em obras semelhantes. Este parâmetro caracteriza:

Item 1 - Quantidade de estudos na região de implantação da obra: este item leva em consideração o conjunto todo do programa de investigação (ensaios, sondagens, geofísica)

Item 2 - Obras similares construídas no mesmo domínio geológico: conforme cada ambiente geológico apresenta características próprias, ter uma bagagem de conhecimento sobre situações adversas que podem acontecer, comportamento das rochas/solos do local é importante para a segurança de todos e evita problemas não esperados. Como exemplo temos a linha 4 do Metrô, que também foi executada em rochas do Complexo Embú.

Item 3 - Tipo de rocha predominante no sítio da obra: O conhecimento dos litotipos presentes no local da obra é de extrema importância, pois cada rocha apresenta suas características como estrutura, composição mineral, tamanho dos grãos, origem, entre outros, portanto, cada litotipo se comportará de modo diferente a outro.

Item 4 - Atividade tectônica na região: O estudo do histórico de atividades tectônicas regionais influencia de forma bastante representativa no risco geológico, pois qualquer atividade deste tipo durante ou após a obra pode colocar em risco a estrutura da construção.

7.3.3. Classificação do programa de investigação

O programa de investigação constitui em:

Item 1 - Pesquisa bibliográfica: O primeiro passo de qualquer investigação é iniciar com a pesquisa bibliográfica. É com ela que será possível ter o primeiro contato com o que se espera encontrar nas proximidades do sítio da obra, assim, pode-se estimar quais tipos de investigações deveram ser empregadas para maior detalhamento do material subsuperfície.

Item 2 - Interpretação de fotografias aéreas e análise de imagens de radar e satélite: Imagens aéreas, de radar e satélite são, assim como a pesquisa bibliográfica, uma das primeiras etapas de investigação. É a partir da análise destas que haverá um entendimento da geomorfologia local, reconhecimento de drenagens e possível reconhecimento de estruturas (dobras, falhas, etc).

Item 3 - Caminhamento elétrico: Através deste método geofísico é possível gerar perfis 2D e 3D estimando a espessura de solo, presença de matacões, posição do nível d'água, identificação de fraturas e mapeamento do topo do maciço rochoso. Este método se diferencia da sondagem por apresentar perfis mais detalhadas, já que a sondagem

apresenta um dado pontual. No entanto, o caminhamento elétrico não pode ser feito em locais com muitas interferências como fiações, dutos, etc.

Item 4 - Sísmica de refração: Este método geofísico é bastante empregado para definir diferenças de alteração de materiais, indicando porções mais alteradas, menos resistentes, estimativa do tipo de material, etc. No entanto, este método não foi realizado para esta obra, já que há pouca incidência de material rochoso e houve um controle intensificado de sondagens.

Item 5 - Sondagens rotativas nas estruturas: Ao se identificar/estimar a localização de estruturas, é de extrema importância que sondagens sejam feitas nestas zonas, pois estes locais são mais suscetíveis a problemas de estabilidade e necessitam ser mapeados com maior intensidade para que seja possível estudar possíveis métodos de remediação.

Item 6 - Qualidade da descrição de testemunhos: Descrições pouco detalhadas ou até mesmo incorretas de testemunhos de sondagem podem interferir no processo de confecção da seção geológica, levando a interpretações equivocadas do material em subsuperfície.

A empresa forneceu 27 perfis individuais de sondagem, porém somente 11 deles foram analisados. Destes 11, 9 são de sondagem mista e 2 de percussiva. As profundidades das sondagens foram estabelecidas de acordo com o projeto básico da obra.

Ao longo deste trabalho de formatura foram analisados três furos de sondagem para poder qualificar a qualidade de descrição dos mesmos. Os furos analisados foram: SM-5667, SM-5671 e SM-5672. Estas sondagens foram escolhidas para serem reanalisadas em virtude de apresentarem grandes espessuras de rocha, diferentes tipos de solo, e nomenclatura de rocha diferente para furos próximos.

Item 7 - Ensaio de perda d'água e infiltração: Estes ensaios permitem entender melhor as propriedades hidráulicas (permeabilidade, condutibilidade, etc) do solo (infiltração) ou da rocha (perda d'água).

Nestes 27 furos realizados, somente 12 encontraram rocha e em nenhum deles foi realizado ensaio de perda d'água. Este ensaio é de extrema necessidade para estimar a permeabilidade da rocha frente à injeção de água em diversas pressões.

Quanto aos ensaios de infiltração, foram executados em quatro furos em camadas de solo específicas. Estes ensaios foram realizados através da construção de piezômetros, que tem como função monitorar a posição do nível d'água de um determinado trecho de horizonte de solo.

Item 8 - Ensaio em amostra de rocha: Os ensaios em rocha são essenciais para a determinação das condições do maciço rochoso quanto a qualidade da rocha, composição mineralógica, geomecânica e abrasividade. Além de determinar as qualidades do maciço, estes resultados são importantes para a escolha do método correto de escavação e das ferramentas que serão utilizadas.

Para a construção deste túnel foram realizados diversos ensaio em amostras de rocha obtidas através de sondagens. Os ensaios realizados foram: CERCHAR, compressão diametral, compressão axial, determinação de parâmetros físicos e petrografia.

Item 9 - Ensaios em amostras de solos: Foram coletadas amostras de solo para ensaios de caracterização como granulometria e limites de consistência (LL e LP). Estes ensaios tem a função de determinar características hidráulicas da porção de solo, como também parâmetros de deformabilidade, uma vez que o LL está diretamente relacionado compressibilidade de materiais, estes associados a ocorrência de recalques e convergência de escavações.

Item 10 - Modelo geológico: A junção das informações de investigação (perfis de sondagem, seção geológica, pesquisa bibliográfica, geofísica, etc) permitem a elaboração deste documento, que é responsável por caracterizar e interpretar (identificação de falhas, fraturas, estruturas, contatos, etc) todo o material geológico presente no local da obra, através da elaboração de perfis geológicos.

Item 11 - Modelo geomecânico: O modelo geomecânico apresenta as informações obtidas em ensaios laboratoriais ou de campo em um documento. Este modelo deve conter tanto dados geomecânicos de solos como de rochas.

Item 12 - Modelo hidrogeológico: O modelo hidrogeológico deve apresentar todos os dados relacionados ao posicionamento do nível d'água das proximidades, ensaio de perda d'água sob pressão e dados de piezômetros com a interpretação de todo o conjunto.

Item 13 - Interatividade entre informações geológicas e projeto: A identificação de feições geológicas (falhas, dobras, solos moles, etc) são de extrema importância para a confecção do projeto, pois a presença destas heterogeneidades pode ser responsável por alterar o método de escavação, o eixo do túnel e a necessidade de estudar novos métodos de retenção das paredes da área perfurada.

Item 14 - Análise de riscos geológicos esperados: este tipo de análise é feita em função da identificação preliminar das feições/condicionantes geológicos citados anteriormente

através de afloramentos e testemunhos de sondagens. Após a identificação, é possível estimar os potenciais riscos, como formação de cunhas por fraturas, rochas desagregáveis, solos moles, etc.

8. RESULTADOS OBTIDOS

8.1. Classificação do programa de investigação

8.1.1. Item 1 - Pesquisa bibliográfica

Conforme a pesquisa bibliográfica constitui uma das primeiras etapas do processo investigativo, este trabalho não teve contato com esta etapa, uma vez que o projeto de pesquisa já havia sido iniciado há mais de um ano. De acordo com os geólogos responsáveis pela campanha de investigação, foram consultados mapas geológicos, revistas científicas, livros de base, etc.

8.1.2. Item 2 - Interpretação de fotografias aéreas e análise de imagens de radar e satélite

Nesta obra em questão não foram obtidas fotografias aéreas e imagens de radar e satélite. Conforme a área é bastante localizada e intensamente urbanizada, não haveria necessidade de tal estudo, uma vez que os resultados não seriam relevantes.

8.1.3. Item 3 - Caminhamento elétrico

O local de estudo não permite a utilização do método geofísico de caminhamento elétrico, uma vez que a região apresenta grande quantidade de interferências (cabamentos, dutos, etc), portanto haverá muitos ruídos que podem interferir no resultado final.

8.1.4. Item 4 - Sísmica de refração

Este tipo de investigação não foi realizada. A principal função deste método é determinar o topo do maciço rochoso, no entanto, a região possui alta densidade de sondagens, e com isso foi possível mapear o topo do maciço com bastante precisão

8.1.5. Item 5 - Sondagens rotativas nas estruturas

A área de estudo apresenta aproximadamente 27.500 m² e foram realizados 27 sondagens, tanto percussivas como rotativas. A densidade média é de uma sondagem para

cada 1000 m². Esse valor é relativamente elevado, indicando que a pesquisa foi bastante intensa.

8.1.6. Item 6 - Qualidade da descrição dos testemunhos

Entre os 11 perfis escolhidos, três deles foram analisados com a finalidade de checar a qualidade da descrição, analisando parâmetros como: cálculo de RQD e recuperação, classificação geológica e classificação dos graus de alteração, coerência e descrição de fraturas.

Todos os perfis de sondagem apresentam cálculo de recuperação e RQD (*Rock Quality Designation*) corretos, no entanto, nenhum deles possui classificação da superfície das fraturas, preenchimento das mesmas e inclinação. Este dado é de extrema importância para conhecer as condições do maciço rochoso. A qualificação das discontinuidades coloca em alerta os projetistas para a necessidade de remediação, pois estas discontinuidades podem se cruzar formando cunhas e apresentar preenchimento argiloso bastante espesso que comprometeriam a estrutura da obra, com isso, já seria previsto um aumento de custos.

O furo SM-5667 apresenta uma boa descrição para os trechos de solo e rocha. O geólogo responsável pela análise das amostras foi bastante detalhista, indicando a presença de pequenos trechos com matéria orgânica ou até mesmo níveis mais oxidados e friáveis nas camadas de solo. Na porção de rocha, a análise apresentou informações essenciais para a geotecnia como presença de níveis micáceos, especificação de trechos mais alterados, descrição de juntas e sobre o nível de fraturamento. Faltou somente citar o ângulo de inclinação do bandamento da rocha, mesmo que não seja possível obter a sua direção.

A sondagem SM-5672 descreve os trechos de solo e rocha de modo muito parecido ao apresentado no furo SM-5667. Contudo, foram observados algumas inconsistências quanto a classificação de uma camada de solo, ao grau de recuperação, alteração e coerência e ausência de informações essenciais para a descrição de um trecho de rocha. A camada de 10,48 a 14,45 metros estava descrita como “Areia pouco siltosa (areia fina)...” no entanto, a fração silte predomina sobre a areia, portanto esta camada poderia ser classificada como: Silte arenoso (areia fina a média). A camada seguinte a esta (14,45 a 17,46 metros) apresenta um erro pouco importante, que seria de classificar a cor do solo como “rosado”. Este tipo de classificação não é permitida pela NBR-6484, as únicas cores que podem ser admitidas são: preto, verde, cinza, marrom, amarelo, roxo e branco. Já no trecho com rocha, a manobra de 32,76 a 34,36 metros apresenta superestimação da porcentagem de recuperação. Neste caso o material estava muito fraturado, todo disperso pela caixa e com recuperação de aproximadamente 80%, no entanto a recuperação deve ser menor, pois a rocha está muito alterada, pouco coerente e grande parte de seu material deve ter sido perdido na água da sondagem.

A outra inconsistência do furo SM-5672 foi em relação à classificação de alteração e coerência do trecho de 34,36 a 34,96 metros. Este trecho foi rotulado como muito a extremamente alterado e pouco coerente, no entanto o testemunho estava com muito material particulado em seu entorno, dando a ele aspecto de saprólito. Ao lavar uma parte deste testemunho ficou evidente que haviam minerais bastante conservados e era possível identificar a estrutura da rocha. Portanto, este trecho poderia ser classificado como pouco a moderadamente alterado e medianamente coerente a coerente.

Outro fator a destacar referente a sondagem SM-5672 foi a simplificação da descrição da rocha do trecho de 32,35 a 40 metros. Faltou incluir que o bandamento da rocha varia de inclinado a subhorizontal com fraturas rugosas a friáveis.

A sondagem SM-5671 é classificada com alto detalhamento, explicitando trechos mais ou menos friáveis, inclinação de juntas e fraturas, grau de alteração e a presença ou não de níveis micáceos. Além disso, os cálculos de grau de fraturamento e RQD estão condizentes. Contudo, a rocha foi nomeada como granito e a mesma apresenta diversos trechos com bandamento proeminente e este furo está localizado a aproximadamente 13 metros do SM-5672 e por volta de 60 metros do furo SM-5667. A nomenclatura desta rocha está equivocada, já que o material é muito parecido com os furos anteriores, estão bastante próximos e apresenta bandamento evidente. Portanto esta rocha deveria ser chamada de gnaiss, assim como as demais. Este tipo de informação é necessária para a geotecnia, uma vez que o bandamento de rochas pode causar problemas de estabilização da estruturas de túneis, pois os planos de bandamento são mais suscetíveis a rompimento, ainda mais com estes níveis ricos em mica.

8.1.7. Item 7 - Ensaios de infiltração e perda d'água

As medidas do nível d'água dos 4 piezômetros foram feitas até a estabilização do mesmo. Inicialmente foi adicionada água no furo até o seu topo, e então foram feitas medidas da posição do nível d'água em diferentes intervalos de tempo até que o mesmo fosse estabilizado.

Os dados obtidos através da instalação de piezômetros estão representados nas figuras 17, 18, 19 e 20.

SM-5663					
Hora	Data	Prof. NA (m)	Varição NA (m)	Volume (L)	Vazão (L/s)
06:45	16/10/2012	0,00	0,00	-	-
06:48	16/10/2012	0,39	0,39	4,45E-04	2,47E-06
06:49	16/10/2012	0,58	0,19	2,17E-04	3,61E-06
06:50	16/10/2012	0,78	0,20	2,28E-04	3,80E-06
06:53	16/10/2012	1,04	0,26	2,96E-04	1,65E-06
06:56	16/10/2012	1,38	0,34	3,88E-04	2,15E-06
06:59	16/10/2012	1,67	0,29	3,31E-04	1,84E-06
07:02	16/10/2012	1,89	0,22	2,51E-04	1,39E-06
07:07	16/10/2012	2,44	0,55	6,27E-04	2,09E-06
07:37	16/10/2012	2,48	0,04	4,56E-05	2,53E-08
07:47	16/10/2012	2,51	0,03	3,42E-05	5,70E-08
08:02	16/10/2012	2,53	0,02	2,28E-05	2,53E-08
08:17	16/10/2012	2,53	0,00	0,00E+00	0,00E+00
08:32	16/10/2012	2,53	0,00	0,00E+00	0,00E+00
09:02	16/10/2012	2,54	0,01	1,14E-05	6,33E-09
09:32	16/10/2012	2,54	0,00	0,00E+00	0,00E+00
10:02	16/10/2012	2,54	0,00	0,00E+00	0,00E+00
07:10	17/10/20132	2,53	-0,01	-1,14E-05	-1,50E-10
07:16	18/10/2012	2,54	0,01	1,14E-05	1,31E-10

Figura 17: Resultados obtidos no piezômetro instalado no furo SM-5663.

SM-5671					
Hora	Data	Prof. NA (m)	Varição NA (m)	Volume (L)	Vazão (L/s)
08:25	10/09/2012	0,00	0,00	-	-
08:26	10/09/2012	1,45	1,45	1,65E-03	2,76E-05
08:27	10/09/2012	2,17	0,72	8,21E-04	1,37E-05
08:28	10/09/2012	2,63	0,46	5,24E-04	8,74E-06
08:31	10/09/2012	3,19	0,56	6,38E-04	3,55E-06
08:34	10/09/2012	3,36	0,17	1,94E-04	1,08E-06
08:37	10/09/2012	3,44	0,08	9,12E-05	5,07E-07
08:42	10/09/2012	3,47	0,03	3,42E-05	1,14E-07
08:47	10/09/2012	3,49	0,02	2,28E-05	7,60E-08
08:52	10/09/2012	3,51	0,02	2,28E-05	7,60E-08
09:02	10/09/2012	3,52	0,01	1,14E-05	1,90E-08
09:12	10/09/2012	3,52	0,00	0,00E+00	0,00E+00
09:22	10/09/2012	3,52	0,00	0,00E+00	0,00E+00
09:37	10/09/2012	3,52	0,00	0,00E+00	0,00E+00
09:52	10/09/2012	3,52	0,00	0,00E+00	0,00E+00
10:17	10/09/2012	3,52	0,00	0,00E+00	0,00E+00
07:15	11/09/2012	3,53	0,01	1,14E-05	1,51E-10
07:16	12/09/2012	3,53	0,00	0,00E+00	0,00E+00
07:21	13/09/2012	3,59	0,06	6,84E-05	7,89E-10

Figura 18: Resultados obtidos no piezômetro instalado no furo SM-5671.

SM-5673					
Hora	Data	Prof. NA (m)	Variação NA (m)	Volume (L)	Vazão (L/s)
13:19	11/09/2012	0,00	0,00	-	-
13:31	11/09/2012	1,53	1,53	1,74E-03	2,42E-06
13:32	11/09/2012	2,37	0,84	9,58E-04	1,60E-05
13:33	11/09/2012	2,78	0,41	4,67E-04	7,79E-06
13:36	11/09/2012	3,08	0,30	3,42E-04	1,90E-06
13:39	11/09/2012	3,27	0,19	2,17E-04	1,20E-06
13:42	11/09/2012	3,31	0,04	4,56E-05	2,53E-07
13:47	11/09/2012	3,34	0,03	3,42E-05	1,14E-07
13:52	11/09/2012	3,35	0,01	1,14E-05	3,80E-08
13:57	11/09/2012	3,36	0,01	1,14E-05	3,80E-08
14:07	11/09/2012	3,37	0,01	1,14E-05	1,90E-08
14:17	11/09/2012	3,37	0,00	0,00E+00	0,00E+00
14:27	11/09/2012	3,37	0,00	0,00E+00	0,00E+00
14:42	11/09/2012	3,37	0,00	0,00E+00	0,00E+00
14:57	11/09/2012	3,37	0,00	0,00E+00	0,00E+00
15:12	11/09/2012	3,37	0,00	0,00E+00	0,00E+00
07:13	12/09/2012	3,37	0,00	0,00E+00	0,00E+00
07:18	13/09/2012	3,40	0,03	3,42E-05	3,94E-10

Figura 19: Resultados obtidos no piezômetro instalado no furo SM-5673.

SM-5676					
Hora	Data	Prof. NA (m)	Variação NA (m)	Volume (L)	Vazão (L/s)
07:47	20/09/2012	0,00	0,00	-	-
07:50	20/09/2012	2,17	2,17	2,47E-03	3,44E-06
07:51	20/09/2012	3,38	1,21	1,38E-03	2,30E-05
07:52	20/09/2012	3,78	0,40	4,56E-04	7,60E-06
07:55	20/09/2012	4,42	0,64	7,30E-04	4,05E-06
07:58	20/09/2012	4,60	0,18	2,05E-04	1,14E-06
08:01	20/09/2012	4,64	0,04	4,56E-05	2,53E-07
08:06	20/09/2012	4,68	0,04	4,56E-05	1,52E-07
08:11	20/09/2012	4,70	0,02	2,28E-05	7,60E-08
08:16	20/09/2012	4,71	0,01	1,14E-05	3,80E-08
08:26	20/09/2012	4,71	0,00	0,00E+00	0,00E+00
08:36	20/09/2012	4,71	0,00	0,00E+00	0,00E+00
08:46	20/09/2012	4,71	0,00	0,00E+00	0,00E+00
09:01	20/09/2012	4,72	0,01	1,14E-05	1,27E-08
09:16	20/09/2012	4,72	0,00	0,00E+00	0,00E+00
09:31	20/09/2012	4,72	0,00	0,00E+00	0,00E+00
10:01	20/09/2012	4,72	0,00	0,00E+00	0,00E+00
10:31	20/09/2012	4,72	0,00	0,00E+00	0,00E+00
11:01	20/09/2012	4,72	0,00	0,00E+00	0,00E+00
07:08	21/09/2012	4,73	0,01	1,14E-05	1,57E-10
07:10	22/09/2012	4,75	0,02	2,28E-05	2,64E-10

Figura 20: Resultados obtidos no piezômetro instalado no furo SM-5676.

Em todos os casos, observa-se a estabilização do nível d'água em intervalos próximos a uma hora. Além disso, a vazão calculada é semelhante nos quatro casos apresentados acima. Estes valores são muito baixos, indicando que os solos da região são pouco permeáveis.

8.1.8. Item 8 - Ensaios em amostra de rocha

Os ensaios em amostra de rocha executados para a área de estudo são:

Ensaio de compressão axial

Foram realizados quatro ensaios de compressão axial em testemunhos de rocha dos furos SM-5671 e SM-5673. A rocha ensaiada foi classificada, pela empresa que executou o ensaio, como um granito cinza esbranquiçado, medianamente alterado, com trechos friáveis, extremamente ou ocasionalmente fraturada, com juntas oxidadas e alteradas preferencialmente inclinadas. Os corpos de prova correspondem a amostras com profundidade entre 23,00 e 26,00 metros, no entanto a profundidade exata de cada amostra não é indicada. Este ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes da ASTM, D 2938 - 95. No entanto, há uma nova diretriz divulgada no ano de 2010, a D 7012 – 10, que entrou em vigor para substituir à antiga. O ensaio de compressão axial foi executado em outubro de 2011, portanto a diretriz utilizada não é a mais recente. Assim como já foi citado anteriormente, a única diferença entre essas duas normas é que a mais recente especifica com maior detalhe quais devem ser as dimensões do corpo de prova. De acordo com a diretriz, a amostra deve ter no mínimo 47 mm de diâmetro e a razão altura/diâmetro deve estar entre o intervalo de 2,0 : 1,0 e 2,5 : 1,0. Sete das oito amostras estão com uma pequena inconformidade quanto a razão previamente discutida, os valores de diâmetro, altura e razão estão divulgados na Figura 21.

Furo	Amostra	Carga (N)	Resistência (MPa)	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Razão (Altura/Diâmetro)
SM-5671	1	115600	52,0	137,5	53,2	2,58
SM-5671	2	94200	42,4	138,1	53,2	2,60
SM-5671	3	235200	104,3	139,3	53,6	2,60
SM-5671	4	58400	25,8	130,5	53,6	2,43
SM-5673	1	66600	29,0	138,8	54,1	2,57
SM-5673	2	71800	31,5	138,5	52,7	2,63
SM-5673	3	38800	16,8	138,4	54,2	2,55
SM-5673	4	70400	31,0	136,4	53,8	2,54

Figura 21 – Tabela com os resultados dos ensaios de compressão uniaxial.

As amostras que estão com a célula em vermelho são aquelas que, de acordo com a diretriz D 7012 – 10, não apresentam dimensões adequadas para realização do ensaio, pois a razão (Altura/Diâmetro) são acima de 2,50.

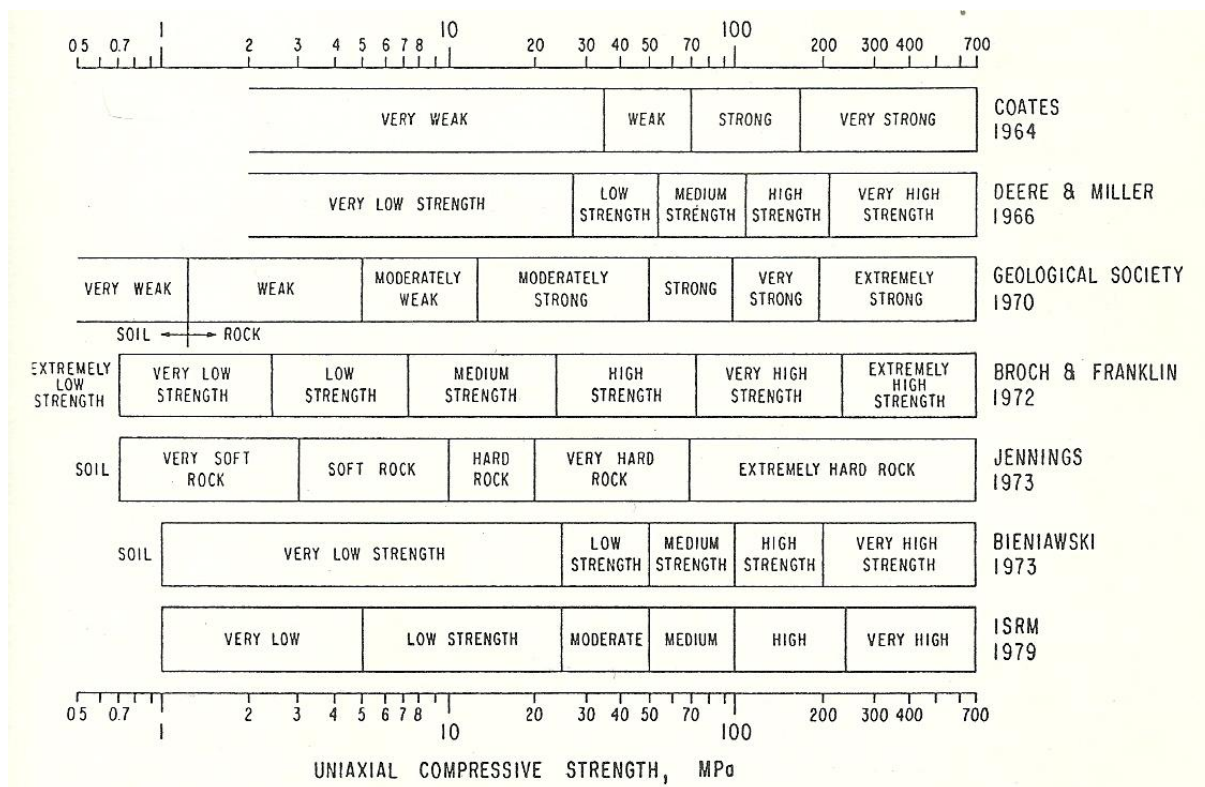


Figura 22 – Compilação com diversas classificações de tensões para ensaio uniaxial (extraído de Bieniawski 1989).

Bieniawski (1989) fez uma compilação com várias classificações de tensões para rompimento de rochas através do ensaio de compressão uniaxial (Figura 22). Cada autor classifica a resistência à compressão da rocha de diversas maneiras, portanto não existe uma classificação padronizada, uma vez que os resultados variam de acordo com a profundidade que a amostra ensaiada, a composição mineralógica, tamanho de grãos e dimensões do corpo de prova. Os resultados de resistência da sondagem SM-5671 variam de 25,80 MPa a 104,30 MPa indicando a existência de níveis menos e mais resistentes podendo ser devido diferentes graus de alteração ou a presença de pequenos planos de fraquezas no interior da amostra que facilitassem o seu rompimento em baixos valores de compressão.

Já os valores de resistência a compressão uniaxial do furo SM-5673 variam entre 16,80 e 31,50, evidenciando que as rochas deste furo são menos resistentes a compressão do que àquelas do furo SM-5671.

Índice de abrasividade CERCHAR

Nesta área de estudo, duas amostras de dois furos distintos foram selecionadas para realização do ensaio CERCHAR. Os resultados divulgados foram (Figura 23):

Furo	Média	Desvio Padrão
SM-5671	3,6	1,3
SM-5673	5,1	1,1

Figura 23 – Tabela com os resultados do ensaio de CERCHAR.

A amostra proveniente do furo SM-5671 não apresenta valor muito elevado de média de abrasividade, enquanto que a amostra da sondagem SM-5673 já exibe valor mais elevado de abrasividade. Os valores de desvio padrão mostrados são baixos, portanto não houve resultados muito discrepantes.

Índice CERCHAR	Classificação
> 4,00	Extremamente abrasiva
2,00 – 4,00	Muito abrasiva
1,00 – 2,00	Abrasividade média
< 1,00	Pouco abrasiva

Figura 24 – Classificação da abrasividade em função do índice CARCHAR. (extraído de Bieniawski *et. al.*, 2009 *apud* Monteiro *et. al.*, 2012).

De acordo com a classificação de Bieniawski *et. al.*, (2009) *apud* Monteiro *et. al.*, (2012), a amostra de rocha do furo SM-5671 pode ser classificada como muito abrasiva, enquanto que a amostra da sondagem SM-5673 é classificada como extremamente abrasiva (Figura 24).

Compressão diametral

O ensaio de compressão diametral foi feito com amostras provenientes dos furos SM-5671 e SM-5672. De cada furo, foram realizados dez ensaios apresentando os valores de carga aplicada, dimensões dos corpos de prova e valores de resistência indireta a tração (σ). Segue abaixo os resultados (Figuras 25 e 26):

SM-5671					
Amostra	Carga (N)	σ (MPa)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Razão (Espessura/Diâmetro)
1	15088	5,9	30,3	54,1	0,56
2	11125	4,3	30,3	54,1	0,56
3	10781	4,1	30,7	54,1	0,57
4	11301	4,4	30,2	54,1	0,56
5	9869	3,9	30,1	54,1	0,56
6	7868	3,1	30,1	54,1	0,56
7	11497	4,6	29,5	54,2	0,54
8	10919	4,3	30,2	54,0	0,56
9	12625	4,9	30,4	54,3	0,56
10	11537	4,4	30,6	54,0	0,57

Figura 25 – Resultados dos ensaios de compressão diametral para amostras da sondagem SM-5671.

SM-5673					
Amostra	Carga (N)	σ (MPa)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Razão (Espessura/Diâmetro)
1	20925	8,2	29,9	54,5	0,55
2	20572	8,1	29,8	54,1	0,55
3	24093	9,3	30,3	54,4	0,56
4	23887	9,3	30,1	54,2	0,56
5	22808	9,0	29,5	54,5	0,54
6	11703	4,6	29,9	54,2	0,55
7	17236	6,6	30,3	54,5	0,56
8	20689	8,1	30,2	54,1	0,56
9	13302	5,1	30,4	54,2	0,56
10	13047	5,1	29,8	54,2	0,55

Figura 26 – Resultados dos ensaios de compressão diametral para amostras da sondagem SM-5673.

Todas as amostras possuem razão (espessura/diâmetro) do corpo de prova dentro dos padrões estabelecidos pela designação D3967 da ASTM (2008).

Os valores exibidos da análise de amostras de ambos os furos, mostram que as rochas do furo SM-5673 são mais resistentes para os parâmetros de compressão axial e diametral, mostrando que as rochas deste local são mais adequadas para suporte de fundações como também mais difíceis de serem retiradas do maciço. Já as rochas da sondagem SM-5671 demonstram que são mais competentes para o apoio de fundação e necessitam de menos resistência, quando comparadas com as rochas do outro furo, para serem retiradas do maciço rochoso.

Parâmetros físicos

Amostras dos furos SM-5671 e SM-5673 foram submetidos a análises para determinação de parâmetros físicos, conforme ilustrado nas tabelas das figuras 27 e 28.

Os dados apresentados demonstram a heterogeneidade dos corpos de prova provenientes das sondagens. Estas disparidades são evidenciadas, principalmente pelos valores elevados de volume de poros, porosidade e umidade natural da rocha, conforme marcado em vermelho nas figuras 27 e 28. Os valores elevados dos parâmetros citados acima mostram que algumas porções da rocha estão mais alterados, fato comum em rochas gnáissicas. As amostras do furo SM-5671 estão mais alteradas do que as do furo SM-5673, fato marcado pela maior quantidade de valores mais altos dos parâmetros.

Ainda, o desvio padrão da sondagem SM-5673 é mais acentuado do que do outro furo, comprovando que as rochas do primeiro furo contém níveis mais alterados do que outros.

Furo	Nº da Capsula	Temperatira da água (°C)	Massa específica da água (g/cm³)	Peso ao ar (g)	Peso imerso em água (g)	Massa saturada superfície seca + água (g)	Peso da cápsula (g)	Massa seca em estufa + capsula (g)	Volume da amostra (cm³)	Volume dos poros (cm³)	Massa específica aparente	Porosidade (%)	Massa específica aparente seca da rocha (kg/m³)	Umidade natural (%)	
SM-5671	1	24,2	0,9973	109,66	52,43	109,73	22,28	107,85	35,11	1,65	2,50	4,69	2,44	2,12	
SM-5671	2	24,2	0,9973	111,63	56,03	111,85	22,13	111,26	33,78	0,35	2,66	1,03	2,64	0,42	
SM-5671	3	21,0	0,9984	110,04	56,63	111,14	22,99	109,76	31,57	1,24	2,80	3,92	2,75	0,32	
SM-5671	4	21,0	0,9984	121,83	60,85	122,98	28,26	121,23	33,93	1,60	2,80	4,71	2,74	0,65	
SM-5671	5	21,4	0,9983	109,84	53,45	110,76	27,40	109,53	29,96	1,09	2,79	3,65	2,74	0,38	
SM-5671	6	21,0	0,9984	110,09	60,33	110,97	22,34	107,82	28,35	3,01	3,13	10,62	3,02	2,66	
SM-5671	7	19,7	0,9984	111,94	57,41	112,96	29,81	111,65	25,78	1,18	3,23	4,57	3,17	0,35	
SM-5671	8	22,3	0,9978	121,34	61,65	122,11	22,13	119,32	38,41	2,58	2,61	6,71	2,53	2,08	
SM-5671	9	17,9	0,9988	111,49	48,70	113,06	28,61	110,99	35,79	1,97	2,36	5,51	2,30	0,61	
SM-5671	10	21,5	0,9983	112,86	55,25	113,81	23,05	111,80	35,57	1,86	2,56	5,23	2,50	1,19	
											Média	2,74	5,06	2,68	1,08
											Desv. Padrão	0,26	2,32	0,25	0,84

Figura 27: Parâmetros físicos de amostras de rocha do furo SM-5671.

Furo	Nº da Capsula	Temperatira da água (°C)	Massa específica da água (g/cm³)	Peso ao ar (g)	Peso imerso em água (g)	Massa saturada superfície seca + água (g)	Peso da cápsula (g)	Massa seca em estufa + capsula (g)	Volume da amostra (cm³)	Volume dos poros (cm³)	Massa específica aparente	Porosidade (%)	Massa específica aparente seca da rocha (kg/m³)	Umidade natural (%)
SM-5673	1	21,5	0,9983	116,08	50,70	116,97	28,36	115,30	37,97	1,52	2,34	4,01	2,29	0,90
SM-5673	2	21,8	0,9983	126,19	62,30	126,27	23,45	119,83	40,59	6,27	2,54	15,46	2,37	6,60
SM-5673	3	19,8	0,9984	126,65	61,48	127,14	30,97	126,36	34,75	0,63	2,77	1,80	2,75	0,30
SM-5673	4	20,6	0,9982	126,71	63,66	127,15	30,01	126,58	33,54	0,40	2,90	1,18	2,88	0,13
SM-5673	5	20,9	0,9982	124,90	64,95	125,12	30,01	122,73	30,21	2,22	3,15	7,36	3,07	2,34
SM-5673	6	21,8	0,9983	129,00	43,20	129,24	30,77	128,72	55,37	0,35	1,78	0,63	1,77	0,29
SM-5673	7	22,9	0,9978	125,82	50,73	126,31	30,09	125,70	45,59	0,40	2,12	0,88	2,10	0,13
SM-5673	8	22,0	0,9978	121,96	41,00	122,61	28,98	121,89	52,75	0,52	1,78	0,98	1,76	0,08
SM-5673	9	20,2	0,9982	126,22	55,70	127,47	28,02	126,05	43,83	1,24	2,27	2,84	2,24	0,17
SM-5673	10	20,9	0,9982	121,20	57,96	122,62	21,75	120,02	42,99	2,42	2,35	5,64	2,29	1,20
										Média	2,40	4,08	2,35	1,21
										Desv. Padrão	0,43	4,35	0,42	1,92

Figura 28: Parâmetros físicos de amostras de rocha do furo SM-5673.

Petrografia

Foram realizadas análises petrográficas em duas amostras de dois furos distintos da área de estudo. Estas análises foram apresentadas em um relatório que visa avaliar a qualidade da rocha como agregado para concreto do ponto de vista mineralógico, quanto a sua potencialidade a reação álcali-agregado. Este documento apresenta descrições muito detalhadas tanto na parte mineralógica como na estrutural e textural da rocha. Além disso, exibe imagens apontando os minerais presentes e estruturas predominantes.

As amostras analisadas são dos furos SM-5671 e SM-5673.

De acordo com o relatório, a amostra da sondagem SM-5671, classificada como Gnaiss Cataclástico é composta principalmente por quartzo, feldspato (plagioclásio e microclínio) e biotita. Subordinadamente a estes ocorrem sericita muscovita e minerais opacos. Esta rocha é foliada com feições cataclásticas evidenciadas por massas de minerais triturados, há também evidências de recristalização (minerais estirados segundo a foliação), quartzo deformado e pontos com quartzo tendendo a poligonização. Esta rocha foi considerada com potencialmente inócua a reação álcali agregado.

A sondagem SM-5673, nomeada de Biotita Gnaiss, apresenta características mineralógicas e texturais semelhantes à amostra anterior. No entanto, a feição cataclástica é menos evidente e os feldspatos alteram para sericita-muscovita e a biotita para clorita. Esta amostra também foi classificada como potencialmente inócua a reação álcali-agregado.

A figura 29 ilustra a porcentagem volumétrica dos minerais observados nas amostras das sondagens SM-5671 e SM-5673.

Furo	Quartzo (%)	Feldspatos (%)	Biotita (%)	Sericita-muscovita (%)	Epídoto (%)	Clorita (%)	Opacos (%)
SM-5671	40	45	10	3	-	-	2
SM-5673	40	45	10	3	<1	1	1

Figura 29: Porcentagem volumétrica dos minerais observados em análise petrográfica

Mesmo as amostras sendo consideradas como potencialmente inócuas, devem ser feitos ensaios adicionais, uma vez que a petrografia é um estudo pontual e pode não representar o todo.

8.1.9. Item 9 - Ensaios em amostra de solo

Foram realizados ensaios de granulometria e para determinação do índice de plasticidade.

Índice de Plasticidade

Na região em questão foram feitos dois ensaios para determinação dos parâmetros que determinam o índice de plasticidade. No entanto, só foi possível realizar o ensaio em uma amostra, já que a outra é muito rica em silte e areia, inviabilizando a execução do método.

A partir dos valores de LL e IP foi possível obter o índice de consistência (IC) que é calculado da seguinte forma, onde w é o valor de umidade natural.

$$IC = (LL - w) / IP$$

Conforme não foram obtidos os valores de umidade natural, foram simulados cinco ambientes, cada um com valor de umidade diferente assim como mostrado na figura 30.

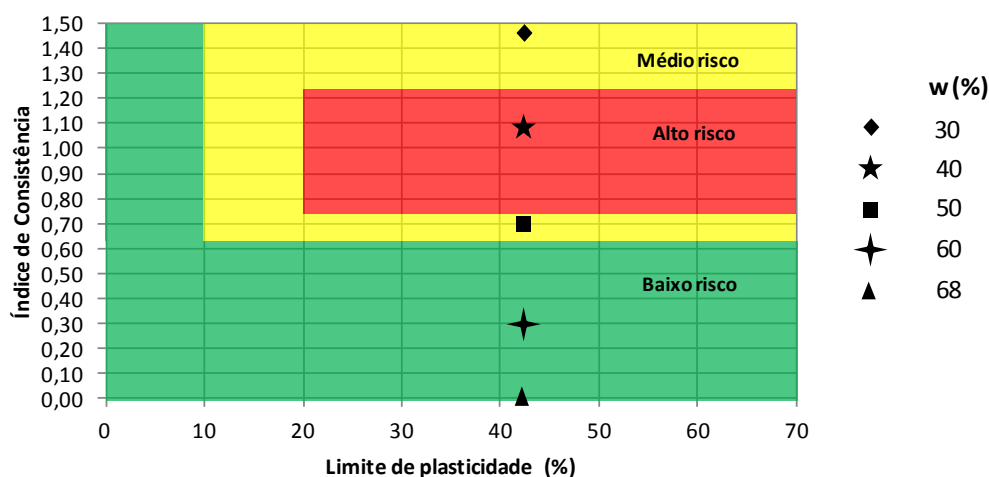


Figura 30: Risco de entupimento (*clogging*) da tuneladora para diferentes situações de umidade natural para o solo.

O risco de entupimento do TBM é elevado quando a umidade atinge valor de 40%. Já para valores de 30% e 50% o risco é médio. Enquanto que para umidades de 60 % e 68 %, o risco de entupimento é baixo.

Granulometria

Foram realizados ensaios granulométricos nas sondagens SP-5189, SP-5191 e SP-5200 em diferentes profundidades. As curvas granulométricas obtidas estão ilustradas na Figura 31.

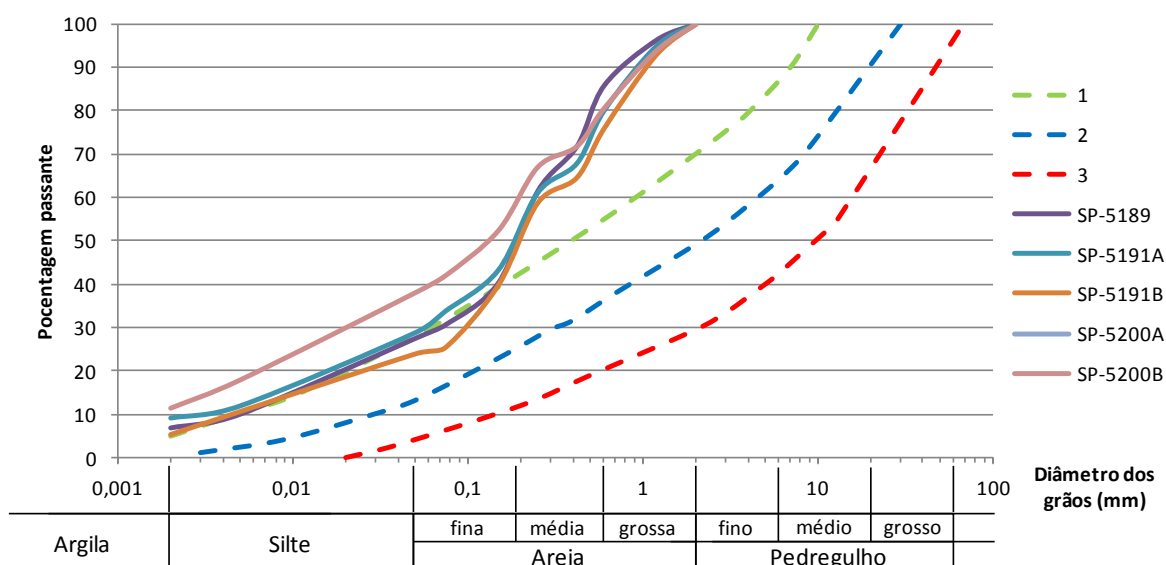


Figura 31 – Curvas granulométricas limites para aplicação do *Shield* EPB, de acordo com Maidl *et. al.*, (1996) *apud* Metrô (2013).

De acordo com Maidl *et. al.*, (1996) *apud* Metrô (2013), o *shield* EPB é aplicável nos solos da área de estudo, pois grande parte das curvas granulométricas estão dispostas acima da curva 1, ou seja, apresenta maior concentração de materiais finos. Algumas das curvas entram no campo delimitado entre as curvas 1 e 2, indicando que esta tuneladora só é aplicável em casos que a permeabilidade não exceda 10^{-3} cm/s em pressões de 2 atm.

8.1.10. Item 10 - Modelo geológico

A região estudada apresenta um relatório com o modelo geológico da área. Este relatório descreve de forma sucinta a geologia da RMSP através de pesquisas bibliográficas e em seguida correlacionando as amostras provenientes de sondagens com as unidades geológicas previamente pesquisadas. Além disso, são apresentados possíveis problemas relacionados à geologia (argilas caulínicas, fraturas, lineações, matações, etc) que podem representar certo risco no momento de escavação. Este documento também aborda sobre como as sondagens do tipo SPT foram descritas e apresenta resultados de ensaios de peneiramento, sedimentação, gráficos de SPT com correlacionamento com suas respectivas unidades geológicas e um diagrama com o índice de plasticidade X teor de umidade.

Este relatório apresenta uma grande quantidade de erros de português e, além disso, toda a parte bibliográfica foi escrita sem citar a fonte de onde foram retiradas tais informações. Grande parte das imagens, principalmente aquelas relacionadas à geologia estão com baixa resolução, portanto, praticamente ilegíveis. O diagrama que apresenta o índice de plasticidade em função da umidade está caracterizado por ter porções ilegíveis, incluindo a legenda do mesmo. Este mesmo diagrama que caracteriza o índice de

plasticidade das argilas da formação de São Paulo foi retirado de algum trabalho estatístico prévio a este, no entanto não existe nenhuma indicação sobre a fonte do mesmo.

8.1.11. Item 11 - Modelo geomecânico

Na porção de solo, os ensaios realizados podem ser de compactação, índice de plasticidade, peneiramento, ensaio triaxial, torque e SPT que é feito na sondagem a percussão. Já nas rochas, é esperado que houvesse ensaios de abrasividade, compressão axial, compressão triaxial, determinação de parâmetros físicos e petrografia.

O projeto em questão não possui um modelo geomecânico específico. Alguns dos dados (ensaio de peneiramento, ensaio de SPT e índice de plasticidade) foram apresentados em conjunto com o modelo geológico, mas não foi apresentado nenhum tipo de interpretação em relação a eles.

Os ensaios de SPT foram compilados em diagramas e separados de acordo com a unidade atingida (depósitos aluvionares, sedimentos terciários e solo de alteração de rocha) e a variação do material (fácies argilosa, fácies arenosa e fácies siltosa) dentro da mesma.

Os depósitos aluvionares apresentam valores entre 1 e 10 de NSPT e não ultrapassam os 10 m de profundidade. As camadas pertencentes a Formação São Paulo são um pouco mais resistentes do que os depósitos aluvionares, com concentração de valores de NSPT maiores do que 1 e menores do que 20, uma vez que estes solos são mais antigos e estão mais profundos. Os diagramas apontam que a Formação São Paulo pode ser encontrada até a profundidade de 40 m, no entanto em nenhuma sondagem foi encontrado solos pertencentes a formação São Paulo com espessuras superiores a 3 m e profundidades maiores do que 4 m.

Já nos solos de alteração do embasamento cristalino, os NSPT mostrados exibem três padrões: o primeiro evidencia que o solo de composição silto argiloso é menos resistente do que o silto arenoso; o segundo padrão é que o solo silto argiloso ocorre nas profundidades mais rasas, entre 2 e 25m, gradando para o solo silto arenoso; já o terceiro é representado pelo solo “Silte argiloso, pouco arenoso...”, que ocorre em profundidades maiores do que 25m e apresentam resistência mais elevada. Além destes três padrões, todos os tipos de solo citados também ocorrem com NSPT maiores ou iguais a 60 em profundidades que variam de 15 a 45m.

8.1.12. Item 12 - Modelo hidrogeológico

No caso desta obra, não foi elaborado nenhum modelo hidrogeológico, no entanto houve um intenso monitoramento no nível d'água durante a execução das sondagens e também há alguns ensaios de infiltração realizados em piezômetros.

8.1.13. Item 13 - Interatividade entre informações geológicas e projeto

Embora não foi possível ter acesso a esta interatividade, os geólogos responsáveis pela obra informaram que houve intenso contato com as projetistas. Este tipo de interação é comprovada pelos avanços de revisões dos documentos apresentados.

8.1.14. Item 14 - Análise de risco geológicos esperados

Esta análise é feita em função da identificação preliminar das Feições/Condicionantes geológicas. Segue abaixo uma tabela (Figura 32) com a listagem dos condicionantes citados por Pastore (2009).

FEIÇÃO/CONDICIONANTE GEOLÓGICO	OCORRÊNCIA	OBSERVAÇÕES
Falhas ou zonas de cisalhamento rúptil	X	observação de níveis cataclásticos em análise petrográfica
Dobras		não identificadas (ausência de afloramentos)
Planos de acamamento e de foliação	X	evidenciado em testemunhos de sondagens rotativas
Sistemas de juntas e fraturas	X	evidenciado em testemunhos de sondagens rotativas
Cavernas, cavidades e dolinas		ambiente geológico não é favorável para existência destas feições
Solos moles e compressíveis	X	comum nos solos aluvionares
Rochas desagregáveis e friáveis	X	comum na interface solo/rocha
Rochas de resistência extremamente elevada	X	ensaios de abrasividade comprovam tal característica
Topo rochoso muito irregular	X	topo rochoso mapeado por sondagens rotativas
Tensões virgens elevadas		não evidenciado
Pressões e vazões elevadas de água subterrânea		não evidenciado
Águas ácidas		ausência de sulfetos na rocha

Figura 32 – Tabela com as feições/condicionantes geológicos interpretados para a área estudada.

9. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

9.1. Condicionantes geológicos

Entre os condicionantes citados no tópico de materiais e métodos, somente alguns deles podem ser inferidos na região estudada.

A análise petrográfica feita para diagnosticar a viabilidade de uso da rocha como agregado para o concreto mostrou que existem pequenas porções da rocha com feições cataclásticas, portanto, a área pode estar próxima de alguma estrutura como falha ou zona de cisalhamento. Esta interpretação pode ser equivocada, uma vez que tal feição vista em lâmina delgada não necessariamente representa que existem tais estruturas. O correto é adicionar esta informação do GBR informando sobre a remota possibilidade da existência de falhas ou zona de cisalhamento nos arredores.

A rocha local predominante é gnáissica, portanto seu bandamento é bastante evidente e há casos que ocorrem bandas centimétricas de biotita orientada segundo o mesmo. Este tipo de estrutura é enquadrado na feição de planos de acamamento e de foliação. A estrutura gnáissica e os níveis mais biotíticos podem representar zonas de fraquezas, portanto, necessitam de atenção maior quanto a estabilidade das paredes do túnel.

Em grande parte dos testemunhos, é comum que haja fraturamento na mesma orientação do bandamento, pois estes são mais suscetíveis a ruptura. No entanto há também algumas fraturas com orientações diferentes da do bandamento. A definição de sistemas de juntas e fraturas não é possível identificar através de furos de sondagens, já que estes não são orientados. Isto pode ser feito somente em casos que há afloramentos de rocha.

Neste local não há evidências de rochas carbonáticas, portanto, não existe a possibilidade de formação de cavernas, cavidades ou dolinas.

Dentre estes condicionantes temos os solos moles e compressíveis, que correspondem as porções com depósitos aluvionares. Estes depósitos são característicos por apresentarem argilas orgânicas quaternárias, ou areias bem selecionadas. Na região estudada, os solos moles ocorrem próximos a um rio, com espessuras variáveis chegando a até 12 metros de profundidade e com NSPT de até 1/96. Se caso algum tipo de estruturas de reforço for apoiada neste local, é recomendado que todo este solo de baixa resistência seja removido, ou então tratado para que seu resistência seja elevada.

Conforme apresentado no projeto, aproximadamente 150 m de escavação será feito na zona de contato entre a rocha do complexo Embu e dos solos terciários da Bacia de São Paulo. Nestes locais a rocha apresenta-se bastante alterada, pouco coerente e com valores de fraturamento relativamente elevado. Esta zona apresenta a feição de rochas

desagregáveis e friáveis e, portanto são menos resistentes necessitando de métodos de remediação e suportes diferenciados.

Os ensaios de CERCHAR mostraram que a abrasividade da rocha foi classificada como muito abrasiva a extremamente abrasiva, portanto exigiram maior quantidade de ferramentas de corte e poderá ter redução na velocidade de avanço, logo aumento dos custos e atraso da obra.

Conforme apresentado no perfil geológico feito através das sondagens, o topo do maciço rochoso é muito irregular. Este tipo de feição pode dificultar o processo de perfuração, já que haverá trechos muito resistentes de rocha e solos mais desagregáveis.

O local não apresenta tensões virgens elevadas, uma vez que a perfuração atingirá somente o topo do maciço rochoso.

Assim como foi mostrado anteriormente, os solos estudados são muito pouco permeáveis e nas sondagens não foi evidenciada nenhuma variação drástica do nível d'água. Quanto a rocha, seria interessante a obtenção de dados de ensaios de perda d'água, pois assim poderia ser estimado de forma mais detalhada as pressões e vazões de água subterrânea do local.

Nas sondagens não foi evidenciado a presença de sulfetos ou outros minerais que possam alterar o pH da água que percola o rocha, portanto não existe risco de reação de água ácida com as estruturas de reforço do túnel. No entanto, é aconselhável o estudo mais detalhado destes fatores, já que não sabemos as características físico-químicas da água subterrânea da região.

9.2. Matriz de risco

9.2.1. Redutor em função do tipo de obra

A obra que está sendo abordada neste trabalho se trata da abertura de túneis subterrâneos metro ferroviário sobre a RMSP. Estes túneis são extensos e com alta cobertura de rocha, portanto, se encaixam no item 1 da Figura 4, recebendo o valor de 0,70 de redutor.

9.2.2. Classificação da complexidade geológica

Item 1 - Quantidade de estudos na região da implantação da obra: a região foi intensamente estudada. Foram realizados diversos ensaios, desde mais simples até os mais complexos. No entanto, em alguns casos, demais ensaios poderiam ter sido efetuados, como no caso de ensaios de perda d'água sob pressão em rocha. Este tipo de informação pode ser importante para o entendimento de como a água se comporta no maciço rochoso.

Contudo, é possível atribuir valor 20 para este item, uma vez que houveram muitos ensaios que representam com bastante detalhe diversas características em subsuperfície.

Item 2 - Obras similares construídas no mesmo domínio geológico: a empresa responsável pela construção já efetuou outra obra do tipo em terrenos semelhantes a estes. A geologia local é composta por sedimentos terciários da bacia de São Paulo, depósitos aluvionares, solos de alteração de rocha, e rocha pertencente ao complexo Embu. Como exemplo temos a linha 4 do Metrô. Em razão destas informações, é possível conceder valor 20 para este item.

Item 3 - Tipo de rocha predominante no sítio da obra: das 27 sondagens realizadas, 12 chegaram até a rocha. A rocha predominante no local apresenta estrutura gnáissica, com variações de níveis mais ricos em biotitas, quartzo ou feldspatos. De acordo com a pesquisa na literatura e a análise de mapas geológicos, concluímos que estas rochas pertencem ao complexo Embu, que predominam gnaisses em geral. Com isso, é atribuído valor 5.

Item 4 - Atividade tectônica na região: a RMSP, assim como todo o Brasil, está no centro da placa tectônica Sul-americana, afastada das zonas de convergência e divergência, portanto não há indícios de sismos intensos na região. Assim, é dado valor 25 para a atividade tectônica.

A somatória dos quatro itens citados acima resulta no valor 70. Para a qualificação da complexidade geológica, devemos multiplicar a somatória dos valores pelo redutor do tipo de obra (Somatória de valores x redutor do tipo de obra = Peso), que é igual a $(70 \times 0,70)$ 49. Portanto, de acordo com a classificação de Pastore (2009), a área de estudo apresenta complexidade geológica “Média” (Figura 33).

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS (Complexidade geológica)		Valores Atribuídos
ITEM	PARÂMETRO	
1	Quantidade de estudos na região da implantação da obra	muitos 20
2	Obras similares construídas no mesmo domínio geológico	muitas 20
3	Tipo de rocha predominante no sítio da obra	B 5
4	Atividade tectônica regional	A 25
Somatória		70
Peso		Média 49

Figura 33 – Resultado do peso para a classificação da complexidade geológica.

9.2.3. Classificação da complexidade geológica

Item 1 – Pesquisa bibliográfica: conforme já havia sido abordado, não houve acesso a pesquisa bibliográfica, uma vez que este é o primeiro passo para realizar investigações geológico/geotécnicas. Ao longo da vivência com os funcionários da empresa responsável pelo projeto, foi observado que toda a equipe tem conhecimento bastante amplo relacionado a assuntos geológicos como também construtivos (métodos de escavação, mecânica de solo e rocha, etc). Ainda, para a elaboração deste trabalho, foram sugeridos diversos trabalhos científicos atuais que são utilizados constantemente por eles. Por isso, foi concluído que a pesquisa bibliográfica é bastante satisfatória, podendo atribuir nota 4.

Item 2 – Interpretação de fotografias aéreas e análise de imagens de radar e satélite: assim como já abordado no tópico de Resultados, não foram feitas interpretações de fotografias e imagens, já que a região é urbanizada.

Item 3 – Caminhamento elétrico: em virtude de estar sendo realizado num local com muitas interferências, este tipo de método geofísico não foi efetuado, pois os dados não seriam relevantes.

Item 4 – Sísmica de refração: assim como o caminhamento elétrico, a sísmica de refração não foi efetuada, pois não haviam evidências de afloramentos de rocha e as sondagens realizadas eram suficientes para a determinação bastante precisa do topo do maciço rochoso.

Item 5 – Sondagens rotativas nas estruturas: regionalmente, não foi observada nenhuma estrutura além do bandamento composicional da rocha. Portanto, não houve a necessidade de locação de sondagens adicionais. No entanto, foram realizadas diversas sondagens rotativas, que possibilitou mapear o topo rochoso e identificar o tipo de rocha presente, resultado na nota 8.

Item 6 – Qualidade da descrição do testemunho: os testemunhos de sondagem estavam muito bem descritos, porém houve um problema de correlacionamento entre a descrição do furo SM-5671 e os demais. Outro fato a relatar é sobre a ausência de descrição mais detalhada das fraturas, quanto a sua orientação, preenchimento e rugosidade. Através destas considerações, o valor mais adequado para este item seria 6, intermediário àquele sugerido por Pastore (2009).

Item 7 – Ensaios de infiltração e perda d'água: os ensaios de infiltração realizados foram o suficiente para o entendimento da permeabilidade do solo da área. No entanto, a não realização de ensaio de perda d'água sob pressão contribui para redução do conhecimento do maciço rochoso frente à percolação de água, já que parte da perfuração será realizada em rocha. Por isso, o valor atribuído a este item é 2.

Item 8 – Ensaios em amostra de rocha: foram executados diversos ensaios em rocha, como: compressão axial, CECHAR, compressão diametral, parâmetros físicos e petrografia. Estes ensaios são bastante representativos para a geotecnia e podem auxiliar na determinação de ferramentas específicas para o corte da rocha e entendimento das tensões do maciço. Através destas considerações, o valor dado a este item é 8.

Item 9 – Ensaios em amostra de solo: para este caso, foram feitos somente alguns ensaios em amostra de solos, como granulometria e os limites de liquidez e plasticidades para determinação do índice de plasticidade. Faltou aplicar os demais ensaios que também são importantes para o entendimento do subsolo, como triaxial e cisalhamento. Grande parte da perfuração será feita em solo de alteração de rocha, portanto o conhecimento detalhado das suas características é importante para evitar problemas futuros.

Adicionalmente, o respectivo trabalho aplicou o modelo de Thewes & Burger (2004) que estima o risco de entupimento das ferramentas de corte e de sucção do rejeito do TBM. O valor dado para este item é 4.

Item 10 – Modelo geológico: o modelo geológico apresentado apresenta pontos positivos e negativos. Como positivos temos a grande quantidade de perfis geológicos construídos para o entendimento e visualização da geologia em subsuperfície e a compilação de dados de resistência do solo obtidos através de sondagens a percussão. Além disso, são apresentados ensaios granulométricos que podem contribuir para a identificação mais detalhada dos solos, e evitar problemas de entupimento das ferramentas e do sistema de refrigeração/lubrificação da tuneladora.

Como pontos negativos, ressaltamos que existe a necessidade de revisão de alguns tópicos e sugerimos que seja feitas ressalvas sobre a irregularidade do maciço rochoso, a existência de rocha muito fraturada e alterada na interface solo/rocha e da foliação marcante encontrada nas amostras de rocha. Adicionalmente, seria interessante que no próprio modelo geológico fosse sugerido que houvesse televisamento de alguns furos, para obter as atitudes das fraturas, foliações e investigar se as discontinuidades apresentam preenchimento. Levando em conta as considerações feitas acima, o modelo geológico pode receber o valor 6, intermediário àqueles sugeridos por Pastore (2009).

Item 11 – Modelo geomecânico: a área estudada não possui modelo geomecânico, são divulgados somente ensaios em rocha e solo e dados de resistência obtidos pela sondagem a percussão. A interpretação em conjunto destes dados são essenciais para elaboração do GBR. Portanto, o valor atribuído é 0.

Item 12 – Modelo hidrogeológico: assim como o modelo geomecânico, não foi criado nenhum modelo hidrogeológico, houve somente a apresentação de dados obtidos em piezômetros e do intenso monitoramento de nível d'água em sondagens. Através destas considerações, o valor atribuído é 0.

Item 13 – Interatividade entre informações geológicas e projeto: embora não houve contato com estas informações, é possível perceber que os documentos de pesquisa geotécnica foram revisados, comprovando a alta qualidade desta interatividade entre as informações geológicas e projeto, portanto, atribuindo valor 8 para este item.

Item 14 – Análise de riscos geológicos esperados: a análise de riscos geológicos esperados é feita através da identificação das feições/condicionantes geológicos. Estes podem ser responsáveis por atrasos no processo de perfuração, colapso das paredes e teto e convergência do túnel, alagamento do túnel, entre outros. Por isso que a identificação prévia dos mesmos é importante, assim será possível citar a possibilidade de problemas que podem ocorrer no GBR proposto por Randal (2007).

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS (Qualidade do programa de investigação)	Valores Atribuídos
1 – Pesquisa bibliográfica	Boa 4
2- Interpretação de fotografias aéreas e análise de imagens de radar e satélite	-
3 – Caminhamento elétrico	-
4 – Sísmica de refração	-
5 – Sondagens rotativas nas estruturas	Em todas 8
6 – Qualidade da descrição do testemunho	Boa/Razoável 6
7 – Ensaaios de infiltração e perda d'água	Parciais 2
8 – Ensaaios em amostra de rocha	Especiais 8
9 – Ensaaios em amostra de solo	Usuais 4
10 – Modelo geológico	Detalhado/Simplificado 6
11 – Modelo geomecânico	Inexistente 0
12 – Modelo hidrogeológico	Inexistente 0
13 – Interatividade entre informações geológicas e projeto	Intensa 8
14 – Análise de risco geológicos esperados	Criteriosa 4
Somatória	50
Peso	Média 35

Figura 34 – Resultado do peso para a qualidade do programa de investigação.

A somatória dos item listados acima resulta no valor 50. Para a classificação da qualidade do programa de investigação, deve-se multiplicar a somatória dos valores pelo redutor do tipo de obra (Somatória de valores x redutor do tipo de obra = Peso), que é igual a $(50 \times 0,70)$ 35. Portanto, de acordo com a classificação de Pastore (2009), a área de estudo atribuiu valor “Média” à classificação da qualidade do programa de investigação (Figura 34).

9.2.4. Classificação do risco geológico

Tanto a complexidade geológica como a qualidade do programa de investigação foram classificados como “Média”, portanto, de acordo com o modelo proposto por Pastore (2009), o risco geológico da área estudada pode ser classificado como médio (Figura 35).

COMPLEXIDADE GEOLÓGICA ↑	ALTA	A	A	M
	MÉDIA	A	M	B
	BAIXA	M	B	B
		RUIM	MÉDIA	BOA
		→ QUALIDADE DO PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO		

Legenda:

A:	ALTO
M:	MÉDIO
B:	BAIXO

Figura 35 – Classificação do risco geológico em função da complexidade geológica e da qualidade do programa de investigação.

10. CONCLUSÕES

Este trabalho de formatura teve como finalidade classificar o risco geológico de uma determinada área da RMSP, na qual será feita a escavação de túneis metro ferroviários. A classificação de risco foi feita através do método proposto por Pastore (2009) que considera o tipo de obra, a complexidade geológica e o programa de investigação. Além disso, foram feitas interpretações para prever a existência de feições/condicionantes geológicos que pudessem interferir no avanço de escavação e requisitar métodos diferenciados para tratamento das paredes do túnel.

A geologia local é composta por depósitos aluvionares, poucos corpos de solo da bacia sedimentar de São Paulo, solo proveniente da alteração de rocha do embasamento cristalino e, por fim, o próprio embasamento cristalino que é constituído por rochas com estrutura gnáissica pertencentes ao Complexo Embu.

Tanto a aplicação de ensaios geofísicos, bem como a interpretação de fotografias aéreas e imagens de radar e satélite, não se aplicam para este estudo, já que seus resultados não seriam representativos e foram supridos pelo intenso programa de investigação por sondagens. Em virtude de tal fato, foi necessário adaptar a avaliação da qualidade do programa de investigação de Pastore (2009), para que a classificação do risco geológico não fosse subestimada.

A determinação de riscos auxilia diretamente na prevenção de custos adicionais, já informando as empresas contratadas das dificuldades que podem ser encontradas durante a etapa de perfuração. Uma delas é a questão da resistência da rocha à abrasão, que está

diretamente relacionado ao desgaste de ferramentas de corte e redução do avanço. Outra dificuldade seria quando a perfuração é feita em solos muito argilosos. Estes materiais podem aderir às ferramentas de corte e impedir que funcionem do modo correto, além de entupir os mecanismos de sucção do material cortado. Isto poderia acarretar em atrasos, pois a tuneladora deveria ser interrompida para que os componentes fossem limpos.

Além do cumprimento das propostas deste trabalho, foram também executadas análises dos dados apresentados, como características geomecânicas do maciço rochoso através de ensaios de compressão axial e diametral, análise da permeabilidade do solo, sugestão da utilização da tuneladora *shield* EPB através de ensaios granulométricos em solos e risco de entupimento, em diferentes situações de umidade, (*clogging*) das ferramentas e aparelhos de sucção do rejeito escavado.

A classificação de risco geológico da região estudada foi “Médio”. Esta pontuação mediana reflete, principalmente, a ausência do modelo hidrogeológico e geomecânico. Estes dois documentos representam um grande peso quanto à classificação do programa de investigação. Além disso, o modelo geológico apresentado possui diversas incoerências e necessita ser revisado para que não haja interpretações equivocadas da geologia local. Ainda, é sugerido que ensaios adicionais em amostras de solo e de permeabilidade em rocha fossem executados, uma vez que a maior parcela da perfuração será feita em solo e outra a outra parcela será na interface solo/rocha e neste local o material rochoso apresenta-se muito fraturado e alterado.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for testing and Materials – ASTM. 2010. D 7012 – 10. Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, Pensilvânia, ASTM

American Society for testing and Materials – ASTM. 1995. D 2938 – 95. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, Pensilvânia, ASTM

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2001. 2001. NBR nº 6484. Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1984a. NBR nº 6459. Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, ABNT

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1984b. 7180. NBR nº 7180. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, ABNT.

Barla G. & Pelizza S. 2008. TBM tunneling in difficult ground conditions. *Tunneling and Underground Space Technology*, 23: 318 – 325.

Bieniawski, R., Celada, B., Tardaguila, I. 2009. *Selección de tuneladoras para macizos rocosos com frentes estables*. Ingeopres, Ed. 181. p. 16 – 22.

Bieniawski, Z. T 1989. Engineering Rock Mass Classification. A Wiley-Interscience publication, New York, 251pp.

Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M.C., Silva L.C., Trouw R.A.J. & Janas V., 2004. Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R. and Brito Neves, B. B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo. p.203-234.

Hoek, E., & Palmieri, A. 1998. Geotechnical risks on large civil engineering projects. *In: International Association of Engineering Geologists Congress, Vancouver, Canada*, p. 12.

Juliani, C. 1993. Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos grupos Serra do Itaberaba , São Roque e da Pedra Grande, NE da cidade de São Paulo, SP. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 803p.

Kanji, M. A., Teixeira, R. B., Cezar, M. R., Mattos, T. S. 2012. Fatores geológicos que influenciam o desempenho de um TBM. *In: 3º Congresso brasileiro de túneis*, p. 6.

Monteiro, M.D., Gurgueira, M.D. & Rocha, H.C. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. In: ABMS – Twin Cities – Solos das Regiões Metropolitana de São Paulo e Curitiba, org. Negro Jr., A., Namba, M., Dyminski, A.S., Sanches, V.L. & Kormann, A.C.M. ABMS. São Paulo, p.: 15 – 44.

Monteiro, M. D., Rocha, H. C., Massoni, F. 2012. Parâmetros relacionados à abrasividade das rochas do embasamento nos estudos do projeto básico da extensão da Linha 5 do Metrô de São Paulo. *In: 3º Congresso brasileiro de túneis*, p. 8.

Randal J. E. (Eds.) 2007. Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction – Guidelines and Practices. American Society of Civil Engineers ASCE, Virginia, 40pp.

Pastore, E.L. 2009. Risco Geológico em Obras Civis. *Engenharia*., 592: 110 – 115.

Pinto C. S. 2006. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. Oficina de Textos, São Paulo, 367 pp.

Riccomini, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 256p.

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, ABMS/ABEF, p.37-94.

Riccomini, C; Sant'anna, L.C.; Ferrari, A.L. 2004. Evolução Continental do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Neto, V.M.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Neves, B.B.B. (orgs). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p.: 385-405.

Rodriguez, S.K. 1998. Geologia Urbana da Região Metropolitana de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 171p.

Santos A. M & Brito S. N. A (Eds.) 1998. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 569pp.

Thewes, M., & Burger, W. 2004. Clogging risks for TBM drives in clay. Tunnels & Tunnelling International, **36**: 28 – 31.

Vlach S.R.F. 2001. Microprobe monazite constraints for an early (Ca. 790 Ma) Brasiliano orogeny: the Embu Terrane, Southeastern Brazil. In: South American Symposium On Isotope Geology, 3., Pucón, 2001. Extended Abstract. Pucón, Sociedad Geológica de Chile, p.265- 268. (CD-ROM).