

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E MODELO ESTRUTURAL DE UM TRECHO DA  
LINHA 5 DO METRÔ DE SÃO PAULO**

Alessandro Velasquez Pezzin

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pissato

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-2017/01)

SÃO PAULO

2017

De acordo:

---

Professor Doutor Edilson Pissato

---

Alessandro Velasquez Pezzin

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente eu gostaria de agradecer o Prof. Dr. Edilson Pissato, pela paciência, apoio e voluntariedade a ajudar ao longo do ano neste Trabalho de Formatura. Foi em suas aulas que me despertou o interesse pela área e, por meio de seu conhecimento, me ajudou a escolher o tema e me aprofundar numa área tão importante para o desenvolvimento da sociedade.

Ao Metrô de São Paulo pelo fornecimento dos dados para a elaboração deste Trabalho de Formatura, sempre de forma clara e organizada, facilitando o entendimento do tema e da importância do trabalho que lá é realizado.

Agradeço também ao Geólogo Me. Marcelo Denser Monteiro, que trabalha no Metrô de São Paulo, pelo apoio, confiança no trabalho e ajuda nos momentos necessários, além de seu vasto conhecimento na área.

Agradeço à minha namorada Isadora, que me ajudou muito ao longo deste difícil ano, sempre me incentivando e me inspirando a seguir em frente fazendo o melhor possível.

Agradeço à minha família pelo incentivo que me deram ao longo de toda esta jornada de aprendizado, sempre me ensinando que educação é um investimento que gera muitos frutos no futuro.

Aos meus companheiros da sala 56, sempre unidos do início ao fim desta longa caminhada da graduação, sempre atenciosos, bem humorados, solícitos, generosos e engraçados. Em especial, àqueles que são mais próximos a mim: Guilherme , Raphael, Marcelo, Victor, João, Bruna, Gabriel G., Maria, Gabriel D., Paulo, Fernanda, Ângela e Mariana.

## **SUMÁRIO**

<b>1. RESUMO</b>	<b>5</b>
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>3. INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
<b>4. OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E METAS</b>	<b>7</b>
<b>6. ESCOPO DO PROJETO</b>	<b>9</b>
<b>7. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR</b>	<b>10</b>
<b>8. RESULTADOS</b>	<b>34</b>
<b>9. CONCLUSÕES</b>	<b>78</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>80</b>

## **1. RESUMO**

O presente trabalho apresenta os resultados da análise das condições do maciço rochoso de um trecho da Linha 5 - Lilás, do Metrô de São Paulo com o auxílio da técnica do televisionamento de sondagens. Neste trecho o traçado da linha intercepta rochas cristalinas do embasamento da Bacia Sedimentar de São Paulo, cujas características litológicas e estruturais puderam ser melhor descritas a partir das imagens do televisionamento óptico.

As análises realizadas podem fornecer subsídios para as fases de viabilidade e projeto básico das obras do Metrô nesse trecho da Linha 5. Para este estudo, foram utilizados as imagens de sondagem televisionadas, que fornecem diversos tipos de informações essenciais para essa etapa da obra, contribuindo para uma melhor caracterização e classificação geomecânica do maciço. Por meio da classificação geomecânica e do modelo estrutural elaborados a partir das imagens de televisionamento óptico, foi possível obter uma melhor avaliação da qualidade do maciço rochoso nas profundidades estudadas e identificar os principais blocos instáveis que poderão ser formados no processo de escavação. Realizou-se ainda uma análise cinemática de mobilidade de blocos, utilizando o Programa Unwedge, da Rocscience Corporation. Com estas análises pode-se realizar uma avaliação mais precisa da viabilidade de execução das escavações em diferentes profundidades para continuação do projeto de ampliação da malha metroviária da cidade de São Paulo.

## **2. ABSTRACT**

The main purpose of engineering geology is to bring infrastructure to every corner of modern society, since the construction of buildings and highways to the construction of subway lanes. The study of the underground content is essential for every project, from little houses to skyscrapers and subway lanes that goes under a big city with over 12 million people. However, when the project is not well designed or not even made, the occurrence of disasters in different scales is imminent, like a mudslide on the sidewalk of a highway or the collapse of a rock block with hundreds of tons inside a tunnel or over the excavation front.

The present work makes an analysis of the conditions of the rock mass in two divided areas with televised soil survey. The choice of the areas was based on the presence of the São Paulo basin basement, so the main characteristics of the rocks such as lithology and structural data could be described with the images of the optical television.

The goal of this project is to show how a basic project is made, aiming the study of viability to the constructions of the subway lane. In order to achieve this goal, televised soil

surveys were used, providing a diverse variety of data allowing the geomechanical classification of the rock mass and the structural model of this basic project of the subway lane number 5 - Lilás.

Applying the geomechanical classification and the structural model made using the televised soil survey is possible to evaluate the quality of the rock mass on the target depths, showing the block types formed when the excavations of the subway lane is made.

### 3. INTRODUÇÃO

Para a melhor descrição de um maciço rochoso é necessário mais do que apenas a análise de testemunhos de sondagem. Um método relativamente novo, que passou a ser utilizado no Brasil a partir de 2001 (Baillot *et al.*, 2004) é o televisionamento de furos de sondagem. A partir de uma análise elaborada das imagens do televisionamento óptico dos furos de sondagem é possível extrair diversas informações para melhor classificar um maciço rochoso.

A partir de uma imagem de televisionamento de um furo de sondagem, é possível tirar várias informações imediatas, incluindo orientação do furo, orientação de estruturas presentes, influência da água ou fluidos que atravessam o maciço, entre outras. Com essas informações, é possível qualificar com maior precisão as propriedades do maciço rochoso e realizar projetos básicos seja de uso imediato caso a qualidade do maciço rochoso seja boa, ou de remediação, para melhorar as qualidades do maciço, visando suportar a obra a ser elaborada.

Neste trabalho foi realizada uma análise, a partir das imagens de televisionamento óptico e das descrições dos testemunhos de sondagem rotativa de um trecho da linha 5 - Lilás do Metrô de São Paulo. A partir das características litológicas e estruturais obtidas foi realizada a classificação geomecânica do maciço no trecho e a elaboração de um modelo estrutural, com o intuito de analisar os principais tipos de blocos rochosos que poderão ser formados após a escavação do túnel, e a possibilidade de mobilização destes por meio de análise cinemática. A localização da área em estudo pode ser vista nas **Figuras 1 e 2 - Anexo I**.

Primeiramente, foram analisados os diversos parâmetros para a caracterização do maciço rochoso por meio da análise dos testemunhos de sondagem: RQD, grau de alteração, grau de fraturamento, grau de coerência e as principais características das descontinuidade, tais como tipo de superfície, alteração, preenchimento e abertura. A partir

da combinação da descrição destes parâmetros, chegou-se a uma classificação geomecânica com base no trabalho de Bieniawski (1989).

Em seguida, foram identificadas as principais famílias de descontinuidades separadas por trechos com maior densidade de imageamentos televisionados para elaboração do modelo estrutural.

#### **4. OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E METAS**

Seja na construção de edifícios, obras rodoviárias ou metroviárias, a Geologia de Engenharia está presente nos estudos para as obras que levam infraestrutura para todos os cantos possíveis. O estudo do substrato é essencial para elaboração de qualquer projeto, seja de pequeno porte como uma casa, ou de grande porte como um edifício "arranha-céu" ou um sistema metroviário que passa debaixo de uma cidade com mais de 12 milhões de pessoas. Porém, uma vez que este estudo não é bem detalhado ou nem sequer é feito, a ocorrência de desastres em diferentes escalas é iminente, seja um escorregamento de terra na beira de uma rua ou estrada movimentada como um colapso de um bloco rochoso em túneis ou escavações que podem causar interferências na superfície.

As obras do Metrô na cidade de São Paulo são realizadas sob condições de grande complexidade geológica e urbana, muitas vezes envolvendo escavações subterrâneas sob edifícios e importantes vias de forte fluxo. Nestas, as investigações, avaliações e formulações dos modelos geológicos e geomecânicos adequados são determinantes para a segurança e bom andamento das obras.

O propósito do presente trabalho é apresentar as análises realizadas para as fases de viabilidade e projeto básico do trecho da Linha 5 - Lilás, do Metrô de São Paulo, utilizando além das descrições tradicionais de testemunhos de sondagem rotativa, as imagens de televisionamento óptico das perfurações. Com esses elementos foram realizadas as classificações geomecânicas do maciço e o modelo estrutural.

Cabe ressaltar que a classificação geomecânica e o modelo estrutural são ferramentas complementares que permitem uma melhor avaliação das condições do maciço rochoso para as fases de viabilidade e projeto básico. A partir da compilação de ambas análises, é possível obter uma melhor caracterização das condições do maciço rochoso em diferentes profundidades, tal como foi feito neste trabalho.

A partir da classificação geomecânica e do modelo estrutural elaborados utilizando as imagens de televisionamento óptico, foi possível determinar a qualidade do maciço

rochoso nas profundidades estudadas e identificar os principais tipos de blocos que podem ser formados no processo de escavação, chegando a uma análise de viabilidade de execução das escavações em diferentes profundidades para continuação do projeto de ampliação da malha metroviária da cidade de São Paulo.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho teve início com a pesquisa bibliográfica para levantamento dos conhecimentos prévios a respeito de classificação geomecânica e elaboração de um modelo estrutural básicos, além da geologia regional e de outros temas relacionados ao principal objetivo do presente estudo.

Em seguida, foram recebidos os perfis geológico-geotécnicos das nove sondagens realizadas pelo Consórcio Damasco Penna - Sondaeste e descritas pelo Metrô de São Paulo no trecho correspondente à Linha 5 - Lilás realizados entre o segundo semestre de 2014 e o primeiro semestre de 2015, Foram obtidas também as imagens de televisionamento óptico, realizadas pela empresa Alphageos Tecnologia Aplicada S.A.

Nos testemunhos de sondagem foram descritas as principais características da rocha, tais como grau de alteração, grau de coerência, grau de fraturamento, além das principais características das discontinuidades, como tipo de superfície, alteração, preenchimento e abertura.

A partir das imagens do televisionamento óptico, foram detalhadas as principais características das discontinuidades, tais como as profundidades que estas ocorrem, tipo de estrutura descrita (fraturas, veios, foliação), rugosidade, abertura, preenchimento, espessura, alteração das paredes e a ação da água. A partir destes dados foram feitos estereogramas e diagramas de frequência usando o programa OpenStereo (Grohmann & Campanha, 2010), que contribuiu para a classificação geomecânica simplificada de cada testemunho de sondagem em diferentes profundidades com base na sistemática proposta por Bieniawski (1989).

Com a classificação geomecânica feita, foram elaborados dois perfis geológicos (**Perfis 1 e 2 - Anexo II**) com base na proximidade dos testemunhos de sondagem (separados em trecho norte e trecho sul, como pode ser visto nas **Figuras 3 e 4 - Anexo I**) com as características geológicas e a classificação geomecânica por profundidade.



Feita a classificação geomecânica para cada testemunho e o perfil geológico por trecho, foram identificadas as principais famílias de descontinuidades por trecho a partir das medições de fraturas, veios e foliação ainda utilizando o programa OpenStereo, analisando os estereogramas e os diagramas de frequência elaborados para cada trecho.

Com base na separação das principais famílias de descontinuidades e na classificação geomecânica dos testemunhos, foi feito o modelo estrutural utilizando o *Software Unwedge* (Rocscience, 2004) identificando os principais tipos de blocos formados por trecho e por profundidade estudada com base na Teoria dos Blocos-Chaves, abordados no trabalho de Goodman & Shi (1985).

## **6. ESCOPO DO PROJETO**

O desenvolvimento do trabalho foi baseado no acordo feito no início do ano com o Metrô de São Paulo, sendo previsto o seguinte escopo:

- Revisão bibliográfica visando contextualizar o site no qual o trecho da Linha 5 - Lilás do Metrô de São Paulo se encontra, caracterizando a geologia regional e local;
- Estudo da metodologia utilizada para a análise das imagens de televisionamento óptico;
- Recebimento dos dados necessários para a descrição do subsolo em uma das sedes do Metrô na Rua Augusta;
- Descrição das unidades vistas por meio das imagens de televisionamento óptico, juntamente com a compilação dos dados em formas de tabelas e diagramas;
- Comparação dos dados fornecidos pelas imagens do televisionamento com a descrição dos testemunhos de sondagem, visando confirmar ou acrescentar informações às descrições das características do subsolo por televisionamento;
- Classificação geomecânica dos blocos rochosos fazendo uso da técnica empregada pelo Metrô;
- Montagem do modelo estrutural separado por segmentos unidirecionais;
- Tratamento dos dados e elaboração do relatório.

Vale ressaltar que a escolha da localização dos testemunhos de sondagem foi feita levando em consideração os trechos em que a linha do Metrô intercepta o embasamento cristalino de forma mais contínua, para que fosse possível uma análise mais completa das características geomecânicas e estruturais do maciço.

Por conta de uma inviabilidade logística, a análise e descrição dos testemunhos de sondagem que estão dispostos na cidade de Barueri não foram feitas. Contudo, como

objetivo desta etapa do trabalho era uma complementação às características já descritas por meio dos logs de sondagem e das imagens de televisionamento óptico, a continuidade do trabalho não foi prejudicada.

## 7. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR

### 7.1. Geologia Regional

A cidade de São Paulo está inserida em uma das bacias relacionadas ao contexto geológico do *Rift* Continental do Sudeste Brasileiro (**Figura 5**), uma feição tectônica de idade cenozóica desenvolvida sobre gnaisses, migmatitos e rochas metamórficas de baixo a médio grau, de idade arqueana a neoproterozóica, do Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui *et al.*, 1975) e diversas suítes granitóides intrusivas de idade neoproterozóica (Janasi & Ulbrich, 1991), que compõem o embasamento cristalino regional.



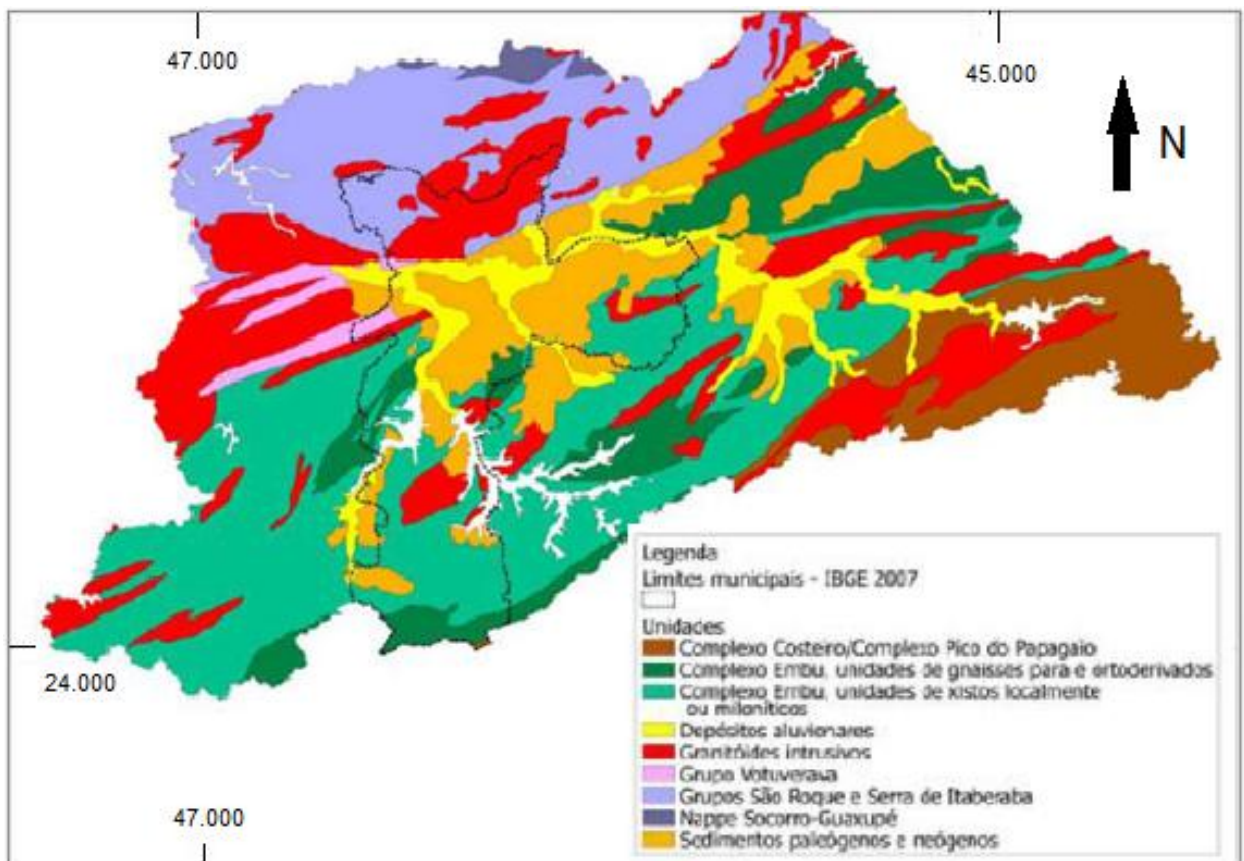
**Figura 5:** Contexto geol3gico regional do RCB - 1)embasamento pré-cambriano; 2)rochas sedimentares paleoz3icas da Bacia do Paraná; 3)rochas vulcânicas toleíticas eocret ceas da Forma o Serra Geral; 4)rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesoz3ico-cenoz3ico; 5) bacias cenoz3icas do rift (1-Bacia de Itaboraí, 2- Gráben de Barra de São João, 3- Bacia do Macacu, 4- Bacia de Volta Redonda, 5- Bacia de Resende, 6- Bacia de Taubaté, 7- Bacia de São Paulo, 8- Gráben de Sete Barras, 9- Forma o Pariquera-Açu, 10- Forma o Alexandra e Gráben de Guaraque ba, 11- Bacia de Curitiba, 12- Gráben de Cananéia); 6)zonas de cisalhamento pré-cambrianas, em parte reativadas durante o Mesoz3ico e Cenoz3ico. (Riccomini *et al.*, 2004)

A defini o de Cinturão de Dobramentos Ribeira foi distinguida por Hasui *et al.* (1978) e Shobbenhaus & Campos (1984) por conta de sua posi o na Plataforma Sul-

Americana (Almeida *et al.*, 1977), e Almeida & Hasui (1984) incluíram-na no setor central da Província Mantiqueira. Esta província possui 450.000 km<sup>2</sup> e é limitada de um lado pelas bacias costeiras e margem continental, enquanto pelo outro lado é limitada pelas Províncias Tocantins, São Francisco e Paraná.

A Província Mantiqueira é composta por três grandes compartimentos. Em ordem estratigráfica, é composta pelo embasamento Pré-Cambriano, pelos sedimentos Paleógenos e Neógenos da Bacia de São Paulo e pelas coberturas Quaternárias (Pleistocênicas e Holocênicas). De acordo com Hasui (2010), a estruturação regional do embasamento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) está relacionada a movimentos de fragmentação e colisão que ocorreram durante o Neoproterozóico (1000 a 542 Ma), apesar da história geológica regional remontar ao Arqueano (4000 a 2500 Ma) e envolver processos Paleoproterozóicos e Mesoproterozóicos relacionados à evolução dos supercontinentes Colúmbia e Rodínia.

A região na qual será realizado o estudo encontra-se o Orógeno Ribeira. A porção referente à RMSP corresponde a parte do Segmento Meridional do Orógeno Ribeira, com um *trend* estrutural de direção NNE associada a um sistema de falhas transcorrentes (Hasui *et al.*, 1975). Quanto à assembléia litológica, a Região Metropolitana de São Paulo é basicamente composta por rochas metamórficas e ígneas associadas ao Complexo Embu e aos Grupos São Roque e Serra do Itaberaba e também corpos intrusivos de rochas granitóides. Em menor expressão, encontram-se rochas do Complexo Costeiro, Complexo Pico do Papagaio, Nappe Socorro-Guaxupé e Grupo Votuverava (Monteiro *et al.*, 2012). A **Figura 6** mostra a distribuição das unidades litológicas na Região Metropolitana de São Paulo, com o embasamento em maior destaque.



**Figura 6:** Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo (Monteiro *et al.*, 2012 - modificada).

### 7.1.1. Complexo Embu

Dentre as rochas do embasamento da RMSP, as rochas do Complexo Embu são as mais presentes e ocupam grande parte da região centro-sul da Grande São Paulo, ocupando algumas faixas de afloramentos com direção NE-SW, constituídas principalmente por migmatitos, filitos, gnaisses migmatizados e xistos, além de corpos lenticulares de quartzitos, anfibolito e rochas calciossilicatadas (Oliveira, 2015). A norte, o Complexo Embu é limitado pelo sistema de falhas Taxaquara e do Rio Jaguari, enquanto que a sul, o Complexo é limitado pela Falha de Cubatão, separando-o dos Grupos São Roque e Serra do Itaberaba, respectivamente (Monteiro *et al.*, 2012).

De acordo com Juliani (1992), o Complexo Embu pode ser dividido em três grupos de rochas que apresentam características distintas de metamorfismo entre si:

- rochas que constituem o Complexo Granito-Gnáissico Migmatítico, com ortognaisses polimigmatizados e polideformadas que representam o embasamento das rochas supracrustais, com idades preliminares Arqueanas a Paleoproterozóicas, mais ou

menos migmatizadas e possuem enclaves esparsos e restritos de rochas metassedimentares e anfibolitos;

- rochas metassedimentares de alto grau metamórfico com algumas evidências de migmatização (apesar das estruturas serem majoritariamente bandadas ou estromatíticas) , incluindo gnaisses com extensas faixas de xistos de fácies anfibolito médio a superior, além de micaxistos, quartzitos e rochas calciossilicáticas (Hasui, 1993), assumindo as condições de metamorfismo dessas rochas, e;
- sericita xistos e filitos de baixo grau metamórfico, que também podem ser parte das rochas metassedimentares só que com um grau de metamorfismo mais baixo.

### **7.1.2. Grupos São Roque e Serra do Itaberaba**

As rochas de ambos Grupos, tanto São Roque quanto Serra do Itaberaba são representadas por unidades metassedimentares e metavulcânicas, sendo elas principalmente filitos, metarenitos e quartzitos, além de ocorrerem em menor proporção a ocorrência de anfibolitos, metacalcários, dolomitos, xistos porfiroblásticos e rochas calciossilicáticas (Oliveira, 2015). De acordo com Juliani & Beljavskis (1995), o Grupo São Roque depositou sobre a unidade metavulcanossedimentar do Grupo Serra do Itaberaba, considerado como sendo a unidade basal.

De acordo com a análise petrológica, estratigráfica e química das rochas pertencentes ao Grupo Serra do Itaberaba, o ambiente deposicional dos sedimentos e também das rochas ígneas teria sido em um rifte ensialítico que posteriormente evoluiu para bacia oceânica, enquanto que o ambiente deposicional das rochas do Grupo São Roque estão associadas a correntes de turbidez em um ambiente marinho provavelmente plataformal (Juliani, 1993).

### **7.1.3. Granitóides Intrusivos**

Nas proximidades da Região Metropolitana de São Paulo afloram diversos batólitos e pequenos *stocks* de granitóides que estão parcialmente ou totalmente recobertos pelos sedimentos da Bacia de São Paulo. De acordo com Hasui & Carneiro (1980), esses corpos granitóides garantem uma topografia elevada ao terreno, sendo possível notar em relevos como serras da Cantareira, Itaqui, Itapeti e Caucaia. Esses granitóides são compostos principalmente por granito-gnaisses de granulação fina a média, com foliação bem evidente, sem variações expressivas tanto composicionalmente quanto texturalmente, a partir de uma análise macroscópica (Hasui *et al.*, 1978).

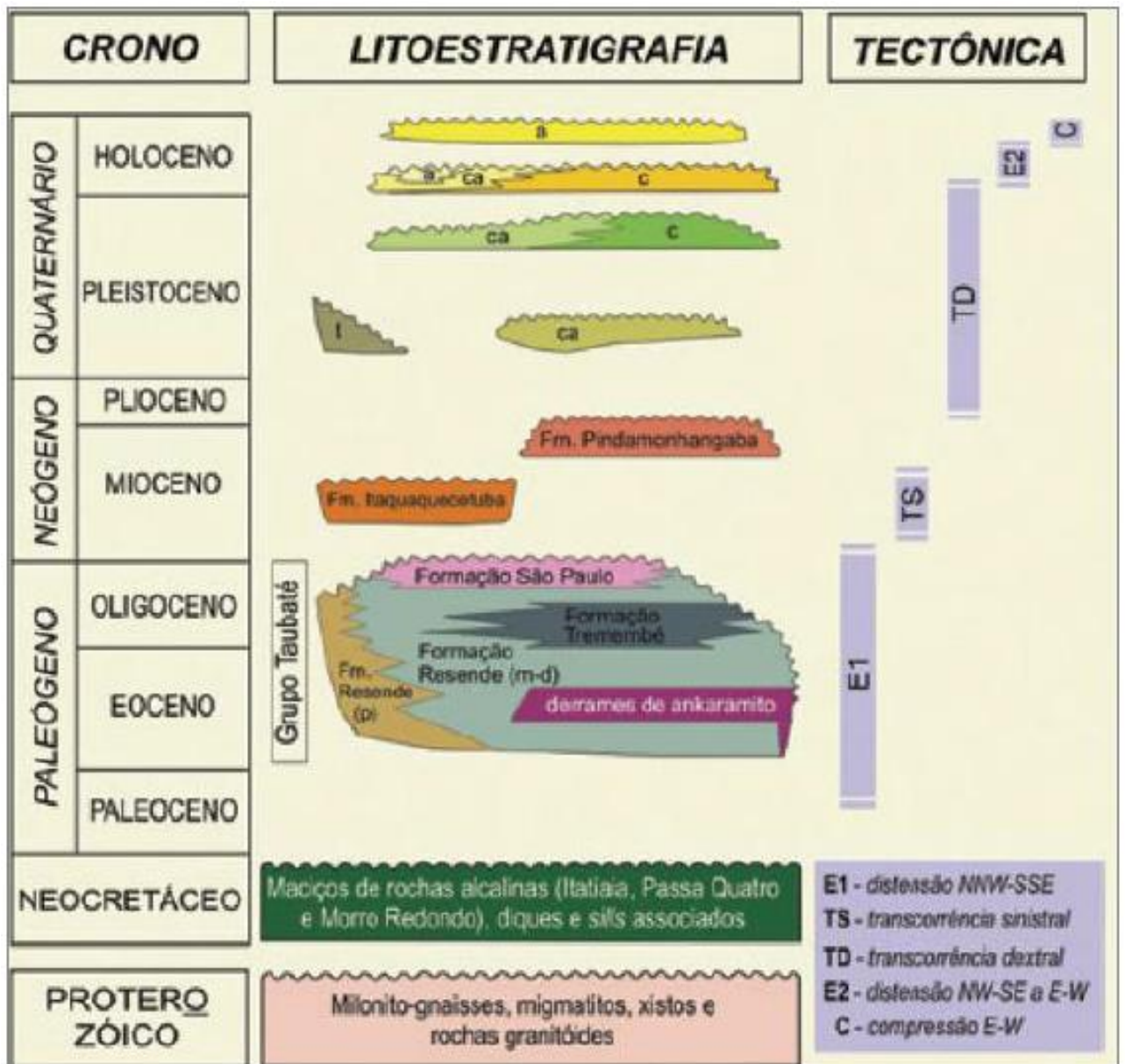
#### 7.1.4. Bacia de São Paulo

A Bacia de São Paulo (BSSP) corresponde à cobertura sedimentar Fanerozóica da porção central do RCSB. Apresenta depósitos Terciários e Quaternários, sendo este caracterizado por aluviões, colúvios e elúvios relacionados à morfologia do terreno (Oliveira, 2015). De acordo com Riccomini (1989), o ambiente deposicional do Grupo Taubaté (representante das Formações Resende, Tremembé e São Paulo) pode ser dividido em três: leques aluviais associados à planícies fluviais de rios entrelaçados, da Formação Resende; um sistema lacustre lateral e basal da Formação Tremembé, e; um sistema meandrante já em fase de colmatação da depressão, da Formação São Paulo. Ainda segundo o autor, as condições climáticas durante a deposição seriam de clima semiárido durante a sedimentação das Formações Resende e Tremembé, transicionando para um ambiente mais úmido na sedimentação da Formação São Paulo, todos estes de idades Paleógenas. Por outro lado, a Formação Itaquaquetuba apresenta idade Neógena e representa um sistema fluvial entrelaçado, restrito à BSSP. (**Figura 7**).

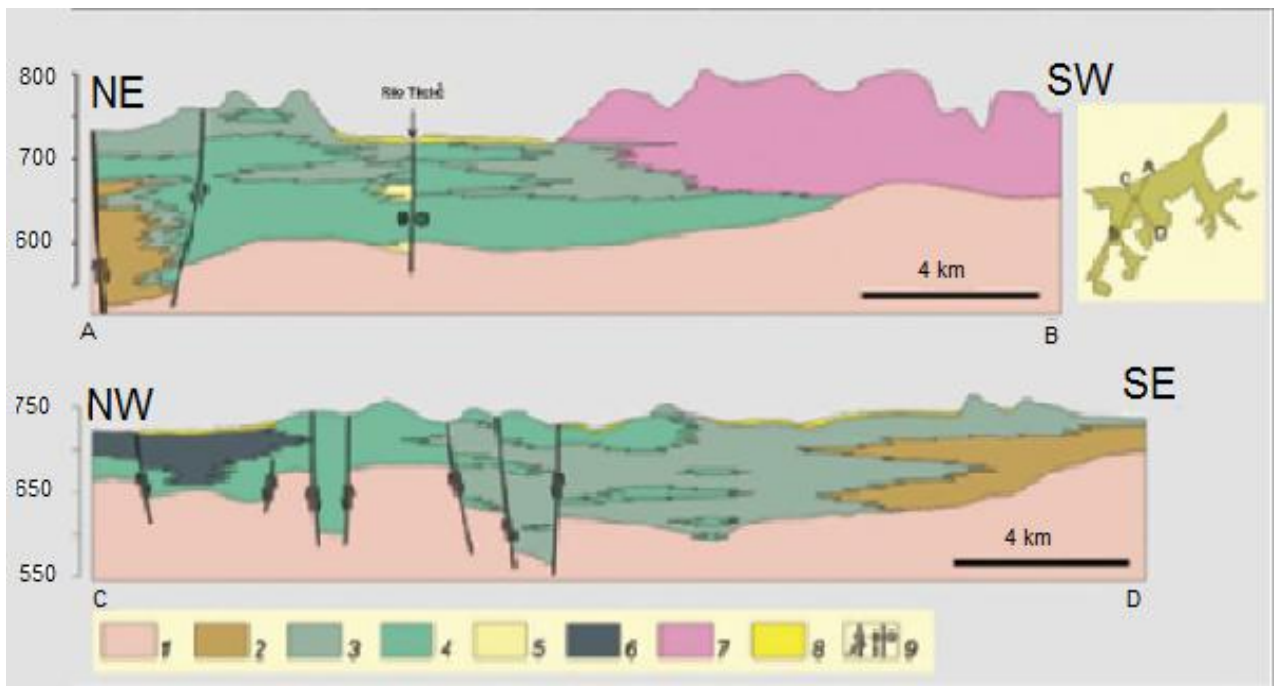
A presença do embasamento abaixo dos sedimentos da Bacia de São Paulo influi na distribuição destes ao longo do Rifte Continental do Sudeste do Brasil. Ora a coluna sedimentar se apresenta mais delgada ora bem espessa, afetando também a área que os sedimentos ocupam em superfície. De acordo com Hasui & Carneiro (1980), a bacia tem uma forma irregular, aproximando-se de uma elipse com 60X30 km, sendo que esta configuração pode ser afetada pela sedimentação dos rios que podem mudar seu curso.

Os sedimentos da Bacia de São Paulo são cortados por inúmeras falhas que causaram soerguimento e também abatimento no terreno. Essas falhas pós-sedimentares são predominantemente normais e foram reativadas ao longo das zonas de cisalhamento Proterozóicas e Taxaquara e Jaguari, dispostas ao longo da borda norte da bacia (Riccomini & Coimbra, 1992). Fazendo a reconstituição do substrato e analisando a sequência deposicional junto à morfologia da sequência sedimentar, pode-se dizer que a bacia era originalmente um hemigráben (**Figura 8**) controlado por falhas normais. Estas, já citadas acima, foram reativadas pela zona de cisalhamento gerando soerguimento e abatimento no substrato.





**Figura 7:** quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB. Letras: p - leques aluviais proximais; m-d-leques aluviais medianos a distais associados à planície aluvial de rios entrelaçados; t-depósito de tálus; c-depósitos coluviais; ca-depósitos colúvio-aluviais; a-depósitos aluviais (Riccomini *et al.*, 2004).



**Figura 8:** Seções geológicas na Bacia de São Paulo construídas a partir de dados de sondagens para água subterrânea e observações de superfície: 1) embasamento Pré-Cambriano; 2) orto e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) lamitos e leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) lamitos e leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) predominância de areias grossas e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 6) sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) aluviões Quaternários; 9) falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B) (Riccomini *et al.*, 2004).

## 7.2. Geologia Local

A Linha 5 do Metrô está localizada na região sudoeste da cidade de São Paulo, indo desde Capão Redondo e passando por bairros como Santo Amaro e Brooklin, até a região central, cruzando com a estação Chácara Klabin da Linha 2 Verde do Metrô de São Paulo. No trecho escolhido para o presente estudo ocorrem gnaisses do Complexo Embu, cobertos por sedimentos da Formação São Paulo e também depósitos aluvionares.

Na descrição dos testemunhos de sondagem foi possível observar que as unidades interceptadas não apresentam um padrão de espessura neste trecho. O embasamento varia de profundidade, assim como a espessura do pacote sedimentar que se encontra em cima do gnaisse. Foi possível identificar três unidades que aparecem com maior frequência entre os nove testemunhos de sondagem analisados. A descrição destas unidades está a seguir:

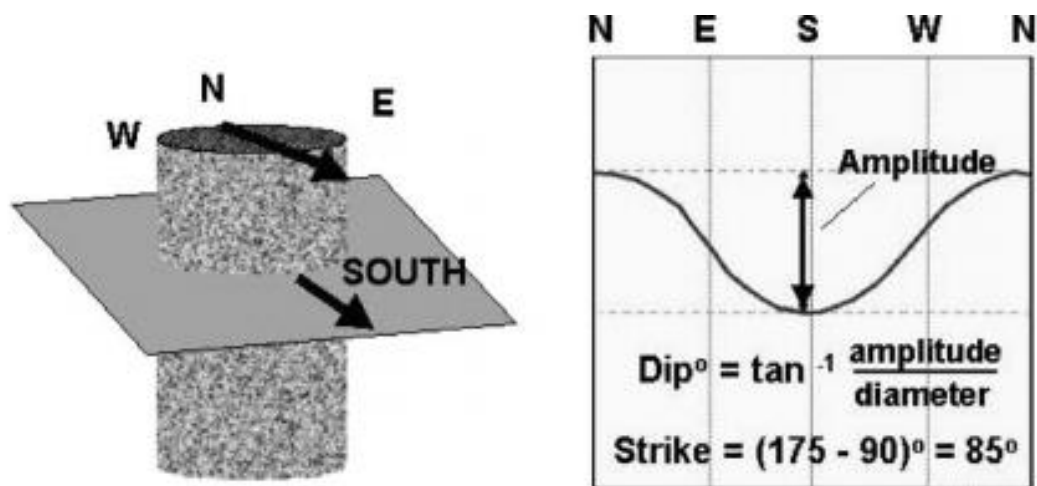


- silte argiloso com presença de areia fina. A granulometria varia bastante dentro desta unidade, ora com maior proporção de sedimentos finos ora com maior proporção da fração mais grossa. A espessura desta unidade é bem variável, aparecendo com 5 metros de espessura (como no caso do testemunho de sondagem SM-630) e até com mais de 20 metros de espessura (como é o caso do testemunho SM-560). Esta unidade aparece principalmente no topo da estratigrafia do trecho estudado;
- areia grossa a fina com presença de silte, por vezes micácea, variando entre medianamente compacta a muito compacta. Esta unidade ocorre principalmente abaixo estratigraficamente do silte argiloso e também apresenta espessura variável. Por vezes nem aparece no perfil estratigráfico (como é o caso do testemunho SM-622) enquanto em outros trechos aparece com com mais de 25 metros de espessura (testemunho de sondagem SM-518);
- biotita gnaisse bandado de textura granolepidoblástica, de granulação fina a grossa, coloração acinzentada com bandas predominantemente máficas e bandas predominantemente félsicas. No perfil estratigráfico aparece a partir de 10 metros de profundidade, a depender da espessura da coluna estratigráfica e permanece até o fim do testemunho de sondagem.

Além destas principais unidades geológicas descritas, aparecem também lentes métricas de uma argila com plasticidade variando entre mole e rija. Outra unidade que ocorre em uma expressão bem menor é a tonalítica, localmente foliada, com textura fanerítica inequigranular média a grossa intercalando com o biotita gnaisse.

### 7.3 Perfilagem Óptica

O método de imageamento óptico, conhecido como OTV (*Optical Televiwer*), fornece uma imagem do perímetro completo da parede do furo, ou seja 360°. A partir destas imagens, é possível analisar as feições geológicas que interceptam o furo, como fraturas, falhas, contatos litológicos, preenchimentos e também a oxidação do material geológico, evidenciando ou não a presença de fluidos que percolam por estes espaços (**Figura 9**). Esses dados que são coletados a partir do imageamento do furo de sondagem são orientados e podem ser interpretados assim que a imagem é feita através de um software, que "desenrola" as imagens obtidas, ou seja, essas imagens aparecem como perfis sinusoidais (Oliveira, 2015).



**Figura 9:** Imagem 360°, orientada da parede de uma perfuração e como é feito o cálculo da direção e mergulho de uma fratura planar (Williams & Johnson, 2004).

O equipamento utilizado para realizar a perfilagem óptica foi primeiramente introduzido no Brasil no ano de 2001, comercializada pelo nome de Colas Câmera, que segundo autores foi desenvolvida por René Colas no ano de 1998. Este tipo de perfilagem é bastante útil, porém utilizada em poucos casos, por se tratar de uma tecnologia relativamente recente e de alto custo.

Para que este tipo de análise de furo de sondagem seja feita, é necessário tomar alguns cuidados na hora do estudo de viabilidade de utilização do método. Primeiramente, a imagem não pode ser feita quando há a presença de água turva, pois como numa foto comum, as estruturas não serão bem visualizadas. Outro cuidado a ser tomado se trata quanto ao revestimento do furo. Quando este é metálico, causa uma interferência na imagem, deixando-a irreal e difícil de ser analisada. Porém, de acordo com Williams e Johnson (2004), este problema pode ser solucionado apenas desligando o magnetômetro para filmar o trecho com revestimento, sendo feito o encaixe da imagem posteriormente, ajustando a imagem.

#### 7.4 Classificação Geomecânica

Para fazer um estudo detalhado das características do substrato da Linha 5 - Lilás do Metrô de São Paulo, é necessário levar em conta diversos aspectos que caracterizam o maciço rochoso no qual o local em estudo se localiza. Maciço rochoso é, por definição, um agregado descontínuo de blocos, uma massa rochosa limitada por discontinuidades e apresenta certos aspectos sob condições hidrogeológicas conhecidas (IPT, 1984). São

heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, variando muito o estado de alteração e características estruturais ao longo de sua constituição (IPT, 1984).

Com a finalidade de elaborar um perfil estrutural e um modelo estrutural para o trecho em estudo, diversas descrições foram feitas a partir dos testemunhos de sondagem e da perfilagem óptica. Esta seguiu as diretrizes apontadas nas especificações técnicas do Metrô de São Paulo, adaptada do trabalho de Oliveira *et al.*, 2013.

Para que a aquisição das imagens fosse feita da melhor maneira possível, diversas precauções foram tomadas para que as imagens ficassem claras. Para isso, foi garantido que as perfurações televisionadas fossem limpas, evitando que houvesse ocultação de informações por conta da turbidez da água. Outro cuidado tomado foi o televisionamento posterior à perfuração nos casos de furos inclinados. Este cuidado deve ser tomado pois em furos inclinados a probabilidade de aporte de sedimentos no furo que turvam a água é maior, além do risco de queda de blocos que danificam a aparelhagem utilizada para obtenção das imagens.

O equipamento utilizado para a produção dos furos de sondagem televisionados, o Hi-OPTV, pertence à empresa *Robertson Geologging Ltd* e foi operado por colaboradores da Alphageos Tecnologia Aplicada. As imagens produzidas foram tratadas e visualizadas tridimensionalmente utilizando o programa MakiCad, como proposto por Baillot *et al.*, 2004, enquanto as discontinuidades foram tratadas utilizando o programa RGLdip versão 6.2. A declinação magnética foi incluída apenas na parte de tratamento dos dados com a utilização da declinação apontada pelo Observatório Nacional (disponível na internet) para a data de aquisição das imagens (Monteiro, 2016).

Dentre as descrições feitas a partir das imagens televisionadas tratadas, destacam-se as seguintes:

#### **7.4.1 Litologia**

A litologia corresponde à rocha e suas características intrínsecas, como composição, textura, estrutura, mineralogia, que conferem à rocha propriedades muito importantes para a elaboração de uma obra de grande importância como é esta do Metrô. As diferentes litologias apresentam propriedades físicas distintas, como deformabilidade, permeabilidade, abrasividade, resistência mecânica, entre outras características;

#### 7.4.2 Alteração

Esta característica se refere às alterações químicas e físicas nas quais a rocha está submetida. Estas alterações promovem variações nas propriedades físicas da rocha (como resistência à deformação, abrasividade, etc) assim como nas propriedades químicas (variação na composição química dos minerais). A variação da alteração da rocha está associada ao grau de intemperismo que esta sofre, estando diretamente relacionada ao tempo de exposição, atividade da água, presença de fraturas na rocha, etc. O **Quadro 1** mostra a classificação da rocha com base no seu grau de alteração (IPT, 1984). A letra W é referente à designação internacional, utilizada pela *International Society of Rock Mechanics* (ISRM, 1981).

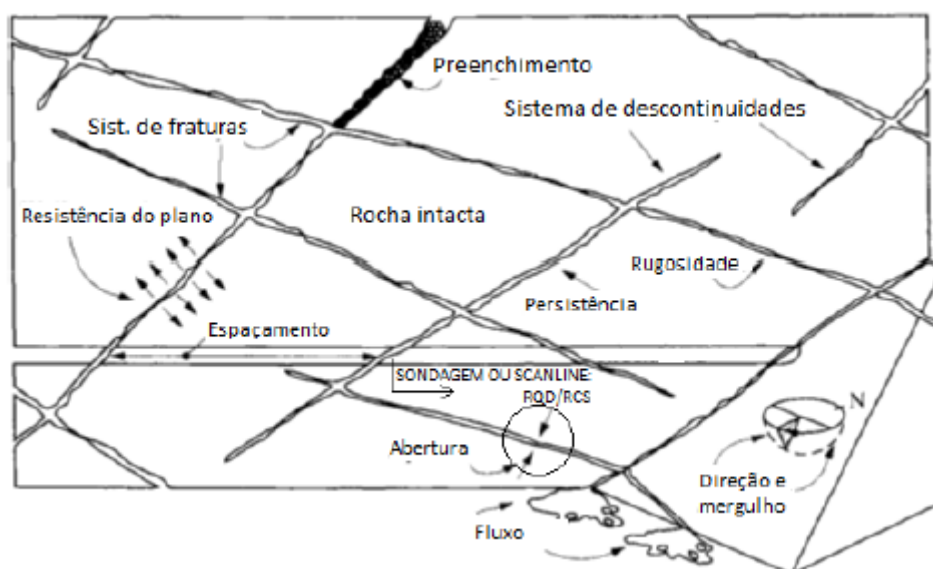
**Quadro 1: classificação do grau de alteração de uma rocha**

Sigla	Denominação	Características da rocha
A1/ W1/RS	Rocha sã ou praticamente sã.	Apresenta minerais primários de vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
A2/ W2/ RAD	Rocha medianamente alterada (rocha alterada dura)	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3/ W3 /RAM	Rocha muito alterada (rocha alterada mole)	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4/ W4 /REA	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Fonte: IPT, 1984.

#### 7.4.3 Descontinuidades

As descontinuidades controlam grande parte da estabilidade do maciço rochoso. São exemplos de descontinuidades: foliação, acamamento, fraturas, juntas, etc. A descrição e a posição espacial (direção e rumo do mergulho) deste parâmetro é imprescindível para a caracterização do maciço rochoso, principalmente quando se trata de resistência, permeabilidade e deformabilidade. A **Figura 10** a seguir ilustra os componentes de um maciço rochoso e algumas características das descontinuidades.



**Figura 10:** principais estruturas presentes em um maciço rochoso (modificado de Hudson, 1969).

Para se representar o fraturamento ou caracterizar as descontinuidades, há duas técnicas mais conhecidas: a primeira faz a classificação do grau de fraturamento usando o espaço médio entre as fraturas e, a segunda, que vai ser a utilizada neste trabalho, se faz uso da análise da quantidade de fraturas por metro de sondagem. Esta é uma das técnicas mais empregadas no Brasil e proposta pelo IPT, na qual se mede o grau de fraturamento de um bloco rochoso com base na quantidade de fraturas por metro linear, como descrito na **Quadro 2** a seguir.

**Quadro 2: classificação do grau de fraturamento de uma rocha**

Fraturas/m	Fraturas/m	Denominação
F <sub>1</sub>	< 1	Ocasionalmente fraturado
F <sub>2</sub>	1 a 5	Pouco fraturado
F <sub>3</sub>	6 a 10	Medianamente fraturado
F <sub>4</sub>	11 a 20	Muito fraturado
F <sub>5</sub>	> 20	Extremamente fraturado

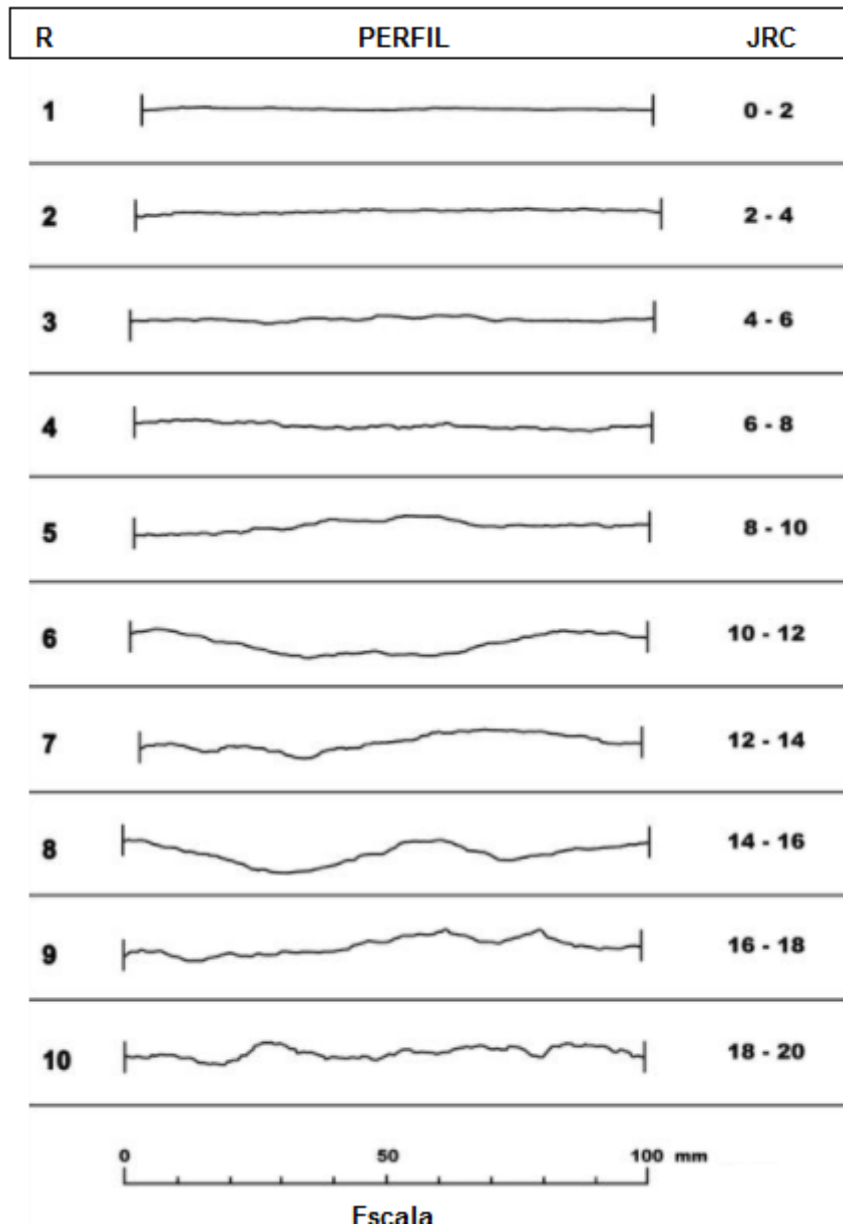
Fonte: IPT, 1984.

#### 7.4.4 Rugosidade

Para estabelecer a estabilidade de um bloco de rocha, é necessário analisar o contato entre seus limites, ou seja, o contato entre as descontinuidades que o limitam. A rugosidade deste contato é de extremamente importante pois, uma vez que este contato é rugoso, maior é a força necessária (ou resistência ao cisalhamento) para vencer o ângulo de

atrito entre eles, tornando o bloco de rocha mais estável. Por outro lado, quando estes contatos são pouco rugosos, lisos ou polidos (como é possível determinar a partir do **Quadro 3** a seguir), menor é a resistência ao cisalhamento para vencer o ângulo de atrito, tornando o bloco menos estável.

**Quadro 3: perfis de rugosidade típicos e os valores de JRC correspondentes**



Fonte: adaptado de Barton & Choubey, 1977.

#### **7.4.5 Abertura e preenchimento**

Muito importante na determinação da estabilidade de um bloco rochoso, a abertura consiste no espaço entre as duas superfícies das juntas. Estas podem estar preenchidas ou não, variando de acordo com o material de seu preenchimento e a estabilidade do bloco estudado. Contudo, a análise do preenchimento é difícil de ser feita em testemunhos de sondagem comuns, pois normalmente a sondagem rotativa retira todo o preenchimento das descontinuidades abertas por apresentarem uma menor resistência e uma maior suscetibilidade a serem lavados pela água durante a perfuração. Esse fato, contudo, não ocorre no caso das sondagens televisionadas, motivo pelo qual pode ser realizada a análise quanto ao preenchimento e abertura das descontinuidades. Inclusive esta é uma das vantagens do método em relação à descrição de testemunhos de sondagem, além de permitir a medida de direção e mergulho das descontinuidades.

#### **7.4.6 RQD (*Rock Quality Designation*)**

Este parâmetro é muito importante para a classificação geomecânica de um bloco rochoso. Antes utilizado como um sistema de classificação geomecânica (proposto por Deere, 1974), é um parâmetro que pode ser extraído em sondagens rotativas, túneis e até em afloramentos.

Neste trabalho, o parâmetro RQD foi medido a partir de testemunhos de sondagem rotativa. Para tal, deve-se somar os comprimentos dos fragmentos maiores que 10 centímetros e fazer a divisão deste valor pelo trecho total de perfuração (manobra). O resultado desta divisão é multiplicado por 100, de forma a obter o valor de RQD em porcentagem. A **Figura 11** a seguir mostra como é feito o cálculo do parâmetro a partir de um testemunho de sondagem.

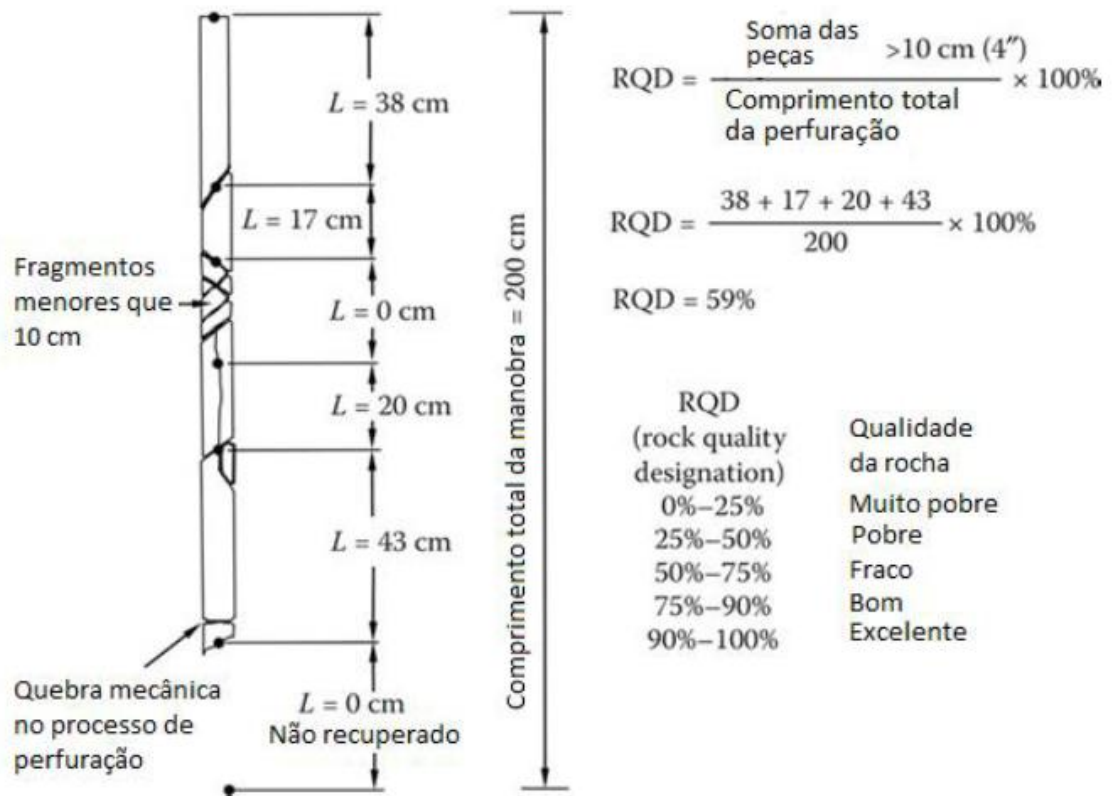


Figura 11: cálculo do RQD a partir de um testemunho de sondagem (Deere, 1989).

O valor que se obtém a partir do cálculo de RQD (que é dado em porcentagem) corresponde a qualidade da rocha, variando de acordo com intervalos de porcentagem:

- 0-25%: muito pobre;
- 25-50%: pobre;
- 50-75%: fraco;
- 75-90% bom;
- 90-100%: excelente.

#### 7.4.7 RMR (*Rock Mass Rating*)

Segundo Bieniawski (1993), a classificação geomecânica de um maciço rochoso tem como objetivo quantificar conjuntamente diversos atributos para avaliar a qualidade deste. Isto é feito a partir de observações diretas das características do maciço em campo e da realização de ensaios, cujos objetivos constituem:

- identificar os parâmetros mais significativos no comportamento do maciço rochoso;
- dividir um maciço rochoso em classes, com diferentes qualidades;
- fornecer as bases para o entendimento de cada maciço rochoso;
- fornecer dados quantitativos para projetos de engenharia;



- e) recomendar níveis de suporte para minas e túneis, e;
- f) prover bases comuns para comunicação entre engenheiros e geólogos.

Com isso, o autor aponta três benefícios principais: a melhora da qualidade da investigação do local, solicitando o mínimo de dados de entrada como parâmetros de classificação; fornecer informações quantitativas para fins de projeto; possibilitar o melhor julgamento de engenharia, e mais efetiva comunicação no projeto.

Por isso, para fins de uma avaliação qualitativa e quantitativa de um maciço rochoso, Bieniawski (1989) propôs um método de classificação chamado RMR (*Rock Mass Rating*), que leva em consideração os seguintes parâmetros para a melhor caracterização dos maciços rochosos:

1. Resistência à compressão simples (ou uniaxial), obtida a partir de ensaio específico;
2. Grau de fraturamento do maciço através de RQD (*Rock Quality Designation*);
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Influência da água subterrânea (estimada nas piores condições possíveis);
6. Orientação relativa das descontinuidades/escavação.

De acordo com as características de cada parâmetro são atribuídos pesos (ou notas) que, quando somados, fornecem um valor de 0 a 100 , ou seja, a classificação RMR. Os quadros a seguir (**Quadros 4 a 6**) mostram os pesos que devem ser atribuídos de acordo com as características dos parâmetros analisados. Vale mencionar que, para uma melhor avaliação do maciço rochoso, este é dividido em blocos que apresentam características semelhantes, classificando cada região separadamente (Bieniawski, 1989).

**Quadro 4: parâmetros considerados no RMR**

Parâmetro		Coeficientes							
1	Resistência da rocha intacta (MPa)	Point load	>10	4-10	2-4	1-2	Para estes valores menores, recomenda-se ensaio RCS		
		RCS	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Pesos	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	Pesos	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades (ver Quadro 8)	Superfície muito rugosa, fechada, não contínuas	Superfície pouco rugosa, levemente alterada, abertura < 1 mm	Superfície pouco rugosa, muito alterada, abertura < 1 mm	Superfície estriada ou Com espessura de preenchimento < 5 mm ou abertura persistente de 1-5 mm	Preenchimento com material argiloso > 5 mm ou abertura não contínua > 5 mm.			
		Pesos	30	25	20	10	0		
5	Ação da água subterrânea	Vazão de infiltração por 10 m de túnel (l/m)	Nulo	<10	10-25	25-125	>125		
		Pressão de água na junta (Lmin <sup>-1</sup> )	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condições gerais no maciço	Seco	Úmido	Molhado	Gotejamento	Fluxo abundante		
		Pesos	15	10	7	4	0		

Fonte: Bieniawski, 1989.

**Quadro 5: classificação das descontinuidades**

CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES					
Persistência/Comprimento (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20
Peso	6	4	2	1	0
Abertura (mm)	Nula	<0,1	0,1-1,0	1-5	>5
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Superfície estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento/Espessura (mm)	Nulo	Duro / <5	Duro / >5	Mole / <5	Mole / >5
Peso	6	4	2	2	0
Grau de Alteração (Intemperismo)	Inalterada	Levemente alterada	Moderadamente alterada	Fortemente alterada	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Bieniawski, 1989.

**Quadro 6: efeito da direção das descontinuidades**

Direção e orientação do mergulho		Muito favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
EFEITOS DA DIREÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES, EM TÚNEIS						
Orientação do mergulho				< 20°	20 – 45°	45 – 90°
Direção Perpendicular ao eixo do Túnel	Avanço no mesmo sentido da inclinação			Moderado	Favorável	Muito favorável
	Avanço no sentido contrário ao da inclinação			Moderado	Desfavorável	Moderado
Direção paralela ao eixo do túnel				Moderado	Moderado	Muito desfavorável

Fonte: Bieniawski, 1989.

A partir da atribuição de valores às características acima descritas, é possível chegar a uma classificação geomecânica RMR, como pode ser vista no **Quadro 7**. A atribuição de um valor de RMR permite avaliar qual é o tempo médio de auto-sustentação do bloco e também o tamanho do vão formado, assim como a coesão do maciço rochoso e o seu ângulo de atrito.

**Quadro 7: classificação geomecânica e características estruturais do maciço rochoso**

RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
Tempo médio de auto sustentação / tamanho do vão	20 anos 15 m	1 ano 10 m	1 semana 5 m	10 h 2,5 m	30 min 1 m
Coesão do maciço rochoso (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Fonte: Bieniawski, 1989.

Por conta da praticidade de atribuição tanto de características qualitativas como quantitativas, o Metrô de São Paulo faz uso de uma classificação semelhante à proposta por Bieniawski (1989). Como pode ser visto no **Quadro 4**, a classificação geomecânica é feita a

partir de cinco parâmetros: resistência da rocha, RQD, espaçamento das descontinuidades, condição das descontinuidades e influência da água. Contudo, o Metrô não realiza ensaios de resistência da rocha e não descreve os parâmetros exatamente como eles estão dispostos no gráfico. A análise geomecânica feita se baseia na ponderação das características descritas no testemunho de sondagem, tais como grau de alteração, grau de coerência, grau de fraturamento, superfície de alteração das descontinuidades e preenchimento/ abertura das descontinuidades, como pode ser visto nas **Tabelas 1 a 5**.

**Tabela 1: grau de alteração descrito a partir do testemunho de sondagem.**

GRAU DE ALTERAÇÃO	
A1	Rocha sã
A2	Rocha pouco alterada
A3	Rocha medianamente alterada
A4	Rocha muito a extremamente alterada

**Tabela 2: grau de coerência descrito a partir do testemunho de sondagem.**

GRAU DE COERÊNCIA	
C1	Rocha muito coerente
C2	Rocha coerente
C3	Rocha medianamente coerente
C4	Rocha pouco coerente

**Tabela 3: grau de fraturamento (em nº de frat./m) descrito a partir do testemunho de sondagem.**

GRAU DE FRATURAMENTO (frat/m)	
F1	0 a 1 - pouco fraturado
F2	2 a 5 - fraturado
F3	6 a 10 - muito fraturado
F4	11 a 20 - extremamente fraturado
F5	mais de 20 - fragmentado

**Tabela 4: condição da superfície/alteração das descontinuidades descrito a partir do testemunho de sondagem.**

SUPERFÍCIE	
S1	áspera
S2	lisa
S3	estriada
ALTERAÇÃO	
A	sem alteração
B	pouco alterada
C	muito alterada

**Tabela 5: preenchimento/ abertura das descontinuidades descrito a partir do testemunho de sondagem.**

PREENCHIMENTO	
P1	sem preenchimento
P2	paredes oxidadas
P3	material argiloso
P4	material granular
ABERTURA	
A	menor que 1 mm
B	entre 1 e 5 mm
C	maior que 5 mm

Tendo estes parâmetros já descritos no testemunho de sondagem, é feita a classificação geomecânica a partir da ponderação de seus parâmetros e atribuição de pesos de acordo com as características descritas, como explicado na **Tabela 6** (adaptado de Bieniawski, 1989).

**Tabela 6: sistema de classificação geomecânica ponderada de Bieniawski (1989) adaptada ao sistema utilizado pelo Metrô de São Paulo**

A	PARÂMETRO		FAIXAS DE VALORES						
1	Resistência da rocha intacta	Índice de compressão puntiforme	>10 MPa (A1)	4-10 MPa (A2)	2-4 MPa (A2)	1-2 MPa (A3)	Não recomendável p/ <1MPa (A4 e A5)		
		Resistência à compressão simples	>250 MPa (C1)	100-250 MPa (C1)	50-100 MPa (C2)	25-50 MPa (C3)	5-25 MPa (C3)	1-5 MPa (C4)	<1 MPa (C5)
	Pesos		15	12	7	4	3	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento descontinuidades		F1	F1-F2	F2-F3	F3	F4-F5		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Padrão das descontinuidades		S1	S2	S2C	S3 A/B	P3C		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Ação da água subterrânea		F1	F1	F2	F3	F4-F5		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Somando os pesos adotados para cada parâmetro analisado chega-se a um valor de zero a cem. Este valor ainda não é a classificação geomecânica propriamente dita, pois deve-se ainda levar em consideração a relação entre a direção das descontinuidades e o avanço das escavações, como visto no **Quadro 6**. Este parâmetro faz com que haja um desconto no valor de zero a cem atribuído anteriormente, uma vez que a orientação e o mergulho das descontinuidades em relação a orientação da escavação descrevem relações que variam de muito favorável (onde não há desconto na classificação geomecânica) até muito desfavorável que, no caso de túneis e minas, desconta-se um valor igual a 16.

## 7.5. Modelo Estrutural

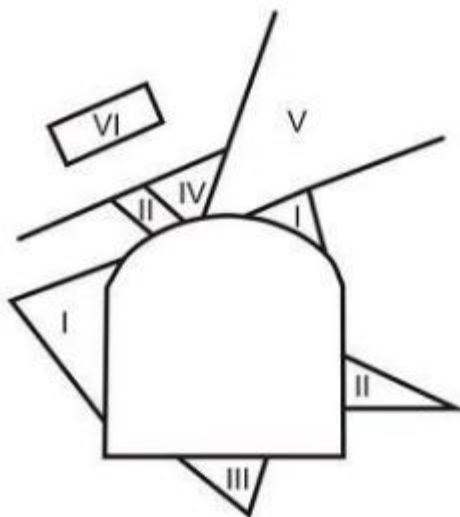
Para que a escavação do túnel do metrô seja feita de maneira segura, é necessário ter conhecimento das principais características estruturais do maciço rochoso a ser perfurado. A elaboração de um modelo estrutural para o trecho em estudo se baseia na análise de removibilidade de blocos dos trabalhos de Goodman e Shi (1985) e Goodman (1989), que desenvolveram a teoria de blocos a partir de projeções estereográficas.

Dentro de um maciço rochoso, existem diversas famílias de descontinuidades que apresentam diferentes atitudes. Estas diferentes atitudes fazem com que haja intersecção entre estas descontinuidades, provocando a geração de blocos de diferentes tamanhos, cujas dimensões são controladas principalmente pelas características das descontinuidades (como sua direção, ângulo de mergulho, preenchimento, etc.). Ao fazer uma escavação dentro deste maciço rochoso, está sendo inserido um novo plano no contexto, gerando mais possibilidades de intersecções entre as descontinuidades presentes no maciço e os novos planos gerados a partir da escavação do túnel. Alguns destes blocos tem sua movimentação impedida pela presença de blocos adjacentes. Porém, outros blocos podem estar em condições instáveis ou aptos a se movimentar de imediato, instantaneamente após a escavação ou retirada da condição que antes restringia sua movimentação (Fiori & Carmignani, 2009). A movimentação ou retirada de alguns blocos críticos pode provocar uma reação em cadeia, movimentando blocos adjacentes e provocando um possível desmoronamento da frente de escavação. Estes blocos considerados críticos são chamados também de "blocos-chave".

Esta análise tridimensional de geração de blocos para verificar sua removibilidade é feita a partir da descrição da geologia estrutural, que promove a localização de blocos-chave potenciais a partir de descrições bidimensionais na superfície. Uma análise bem feita permite a localização destes blocos antes da escavação, permitindo que sejam tomadas as devidas providências para fixar estes blocos e assegurar a estabilidade da escavação.

Para entender a análise de removibilidade de blocos, é necessário ter conhecimento dos tipos de blocos que são formados quando o maciço rochoso está sujeito a uma escavação. Como pode ser notado na **Figura 12** abaixo, existem seis tipos de blocos que podem ser formados.





**Figura 12:** tipos de blocos formados a partir da escavação de um túnel subterrâneo. Tipos de blocos: I - blocos-chave; II - bloco-chave potencial; III - bloco estável removível; IV - bloco afunilado; V - bloco infinito; VI - bloco de junta. (Pio Fiori & Carmignani, 2009).

Como mostrado na figura acima, existem seis tipos de blocos que podem ser formados. Estes são separados em dois: os de tipo I, II e III, que são finitos e removíveis e os de tipo IV, V e IV, que não podem cair no espaço aberto sem arrastar consigo outros blocos (não removíveis).

O bloco tipo VI não possui nenhuma face livre aflorante no perímetro da escavação, enquanto que o bloco V apresenta uma face livre, mas é de caráter infinito. O bloco tipo IV, assim como os blocos tipo V e VI, não é considerado um bloco-chave, pois não pode cair sem arrastar consigo blocos adjacentes por suas características mais afuniladas.

No caso dos blocos I, II e III, sua movimentação depende da geometria, direção da força resultante no bloco e da magnitude da força de atrito que está atuando nas faces. Os blocos II e III são estáveis por conta do ângulo de atrito e da ação da gravidade, respectivamente. Os blocos do tipo II da figura acima podem ser considerados estáveis levando em consideração apenas o ângulo de atrito. Porém, caso haja outra força atuante nestes blocos (como a pressão da água ou mudança na direção da tração, por exemplo), a resultante pode mudar de direção, apontando rumo à face livre e provocando sua queda. Este tipo de bloco também é chamado de bloco-chave potencial.

Já os blocos tipo I são considerados instáveis, ou blocos-chave. Situados no teto e nas paredes do túnel, podem estar em queda livre ou deslizar ao longo do plano de descontinuidade, oferecendo risco às obras de escavação.

## 8. RESULTADOS

O trecho em estudo compreende duas estações de metrô da Linha 5. Neste intervalo, foram coletados 25 testemunhos de sondagem sendo que, destes, apenas nove atingiram rocha sã e obtiveram as imagens do televisionamento óptico.

Estes 9 testemunhos de sondagem que possuem as imagens de televisionamento foram detalhadamente descritos e organizados em tabelas, que descrevem as características da rocha sã como: litologia, a qual unidade pertence, estrutura, textura, composição mineralógica, grau de alteração e profundidade do furo. Em seguida, foram tabeladas as principais estruturas presentes junto com suas respectivas atitudes, como as descontinuidades e estruturas penetrativas.

Tendo estes dados organizados em tabelas, foram construídos Diagramas de Roseta para cada um destes furos, mostrando quais são as direções das famílias de descontinuidades que apresentam maior frequência.

Para elaboração da classificação geomecânica de cada testemunho de sondagem, foi levada em consideração a profundidade na qual a escavação do túnel do metrô foi feita e a localização do furo. Como pode ser visto na **(Figura 2 - Anexo I)**, foram separados dois trechos com maior concentração de informações: o trecho Norte, que engloba os testemunhos SM-630, SM-622, SM-621 e SM-620; e o trecho Sul, que engloba os testemunhos de sondagem SM-518, SM-512, SR-510 e SR-633. A escolha da profundidade de escavação foi feita com base na profundidade do embasamento da Bacia de São Paulo, pois este geralmente apresenta uma estabilidade maior do que os sedimentos Terciários que estão dispostos estratigraficamente acima do embasamento.

Com isso, temos que:

- Trecho Norte: profundidade média de classificação geomecânica entre as cotas 750,0 e 730,0 metros (em relação ao nível do mar);
- Trecho Sul: profundidade média de classificação geomecânica entre as cotas 800,0 e 790,0 metros (em relação ao nível do mar).

Vale mencionar que esta variação da cota topográfica de um trecho ao outro tem a ver com as características geomorfológicas do terreno. Como é possível observar, os testemunhos de sondagem localizados no trecho Sul se encontram em um alto topográfico, fazendo com que a cota média de escavação deste trecho em relação ao nível do mar seja mais elevada do que a cota média de escavação no trecho Norte.

Para este trabalho, foi adotado que as obras de escavação rumam sempre de norte para sul. Ou seja, no trecho norte, o avanço das obras vai de NNE para SSW, enquanto que no trecho sul o avanço das obras vai de NE para SW, causando o desconto na classificação geomecânica, como será demonstrado por meio de tabelas no próximo tópico.

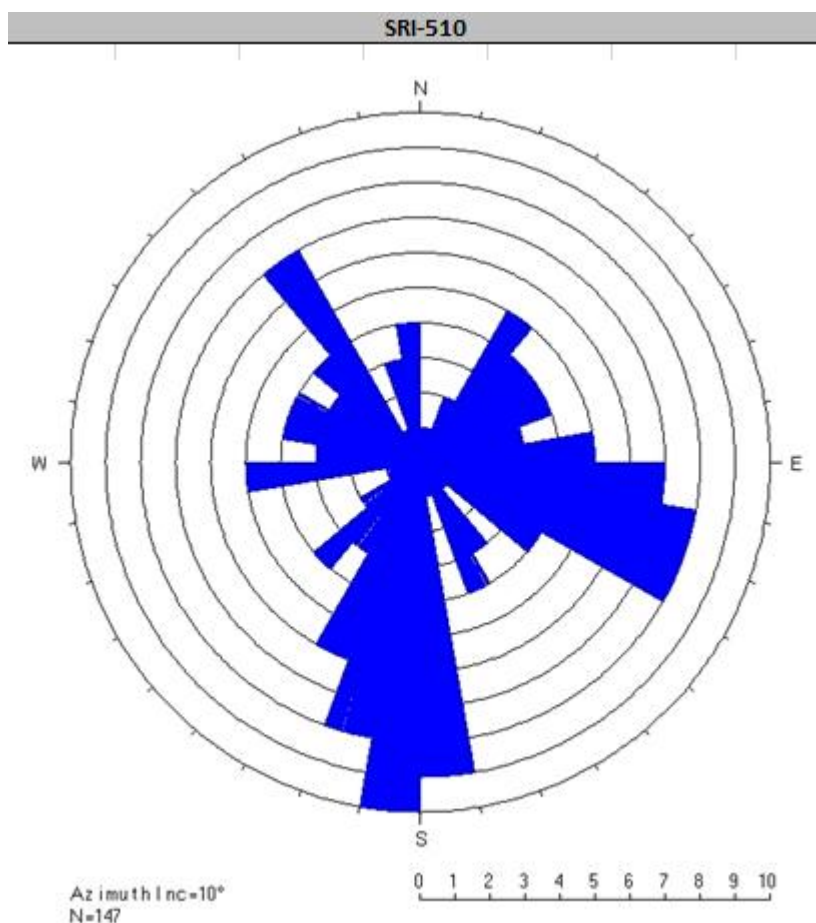
Foram levados em conta dois cenários para a classificação geomecânica de cada furo de sondagem. O primeiro cenário foi feito nas profundidades previstas, como descritas acima, enquanto que o segundo cenário foi feito em uma profundidade maior, em torno de 10 metros abaixo da primeira. O objetivo desta segunda classificação geomecânica é avaliar se as condições do maciço melhoram a medida que se distancia da capa sedimentar, proporcionando melhores condições na escavação e estabilidade do maciço rochoso. Um terceiro cenário foi cogitado, de profundidade mais rasa. Porém, este intercepta a capa sedimentar em grande parte de sua extensão ao longo dos trechos norte e sul, apresentando uma classificação geomecânica Classe V - Péssima, como pode ser visto nos **Perfis 1 e 2 - Anexo II**.

Por fim, para a elaboração do modelo estrutural da região, a divisão das áreas em trechos Norte e Sul foi mantida, pois cada uma apresenta características estruturais distintas. Para que o modelo fosse feito, foram elaborados dois estereogramas (um para o trecho Norte e outro para o trecho Sul) com as principais famílias de descontinuidades. Estas famílias de descontinuidades fazem intersecções entre si e entre o novo plano formado pelas paredes da escavação, formando blocos que podem ser blocos-chave (Goodman & Shi, 1985). Fazendo uso do *Software Unwedge*, estes blocos que são blocos-chave ou blocos-chave potenciais (tipo I e II, respectivamente) são identificados e posteriormente tratados para evitar seu colapso.

### **8.1 Classificação Geomecânica dos furos de sondagem**

**SR-510:** este primeiro furo de sondagem descrito a partir de imagens de televisionamento óptico apresenta uma litologia composta por gnaisse migmatítico, pertencente ao embasamento cristalino da Bacia de São Paulo, com estrutura migmatítica e gnáissica, cuja foliação e o bandamento se encontram dobrados. Apresenta também veios máficos e félsicos, compostos por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita e anfibólio. Esta rocha de textura granolepidoblástica inequigranular apresenta diferentes graus de alteração, sendo que esta diferença parece estar associada à presença de película oxidante na superfície das descontinuidades, que pode indicar que há percolação de água na rocha. Todas descontinuidades apresentam superfície rugosa e, a exceção de uma, não apresentam qualquer abertura. Esta rocha bem fraturada apresenta grande parte de suas

estruturas com mergulho preferencial para as direções S e SE, como pode ser visto na **Figura 13**.



**Figura 13:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SR-510.

As **Tabelas 7 e 8** mostram o resumo da classificação dos parâmetros analisados para este testemunho de sondagem localizado no trecho sul para dois cenários diferentes. Como é possível observar, entre as cotas 800m e 790m (**Tabela 7**) o maciço rochoso apresenta uma soma de pesos igual a 79, indicando que neste trecho o maciço é **Classe II - Bom**, apresentando um tempo médio de auto-sustentação de seus blocos igual a 1 ano, formando vãos de aproximadamente 10 metros, um ângulo de atrito próximo a 40° e uma coesão próxima a 375kPa.

**Tabela 7: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 800,0 e 790,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SR-510	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	75-90%	17
Espaçamento das descontinuidades	F2	15
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F2	7
Atitude da descontinuidade	Moderado	-5
Classificação	79	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

A **Tabela 8** mostra que, 10 metros abaixo da análise anterior, o maciço rochoso apresenta uma classificação geomecânica pior do que a níveis mais rasos, apresentando um grau de fraturamento maior, além da maior ação da água, fazendo com que sua classificação seja igual a 71, também **Classe II- Bom**. Assim como na análise anterior, apresenta um tempo médio de sustentação dos blocos igual a 1 ano, tamanho do vão próximo a 10 metros, ângulo de atrito em média igual a 40° e uma coesão em torno de 350 kPa.

**Tabela 8: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 790,0 e 780,0 metros**

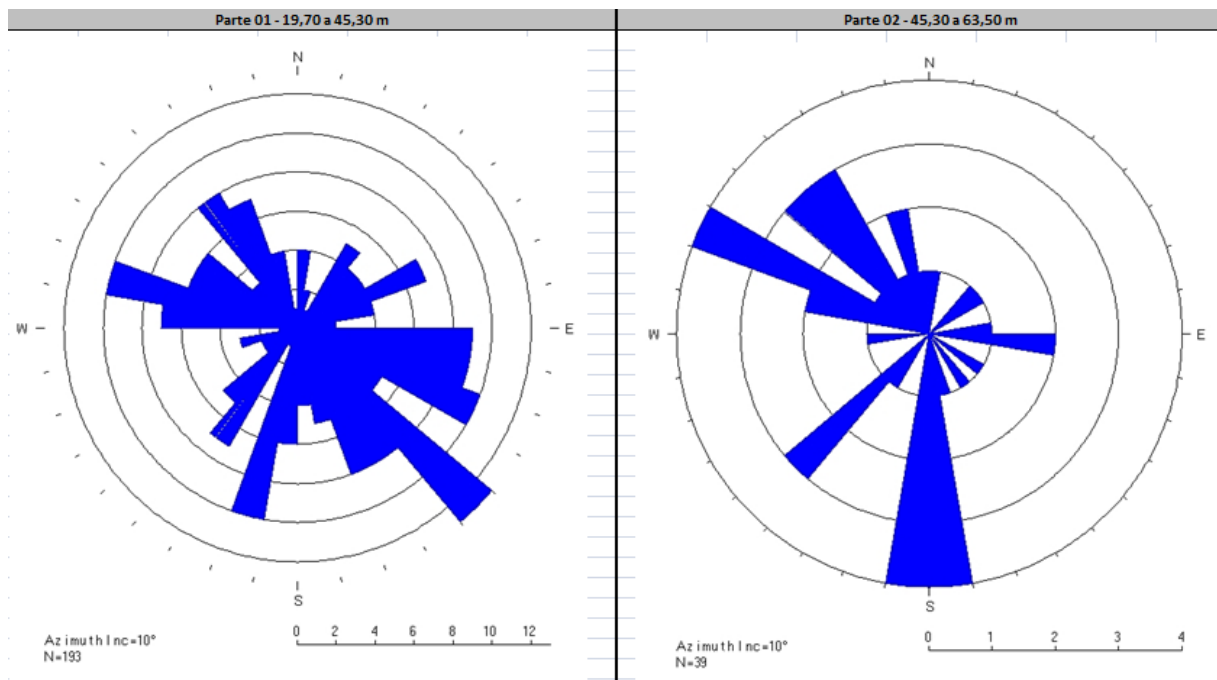
FURO DE SONDAGEM	SR-510	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	75-90%	17
Espaçamento das descontinuidades	F2-F3	10
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F2-F3	4
Atitude da descontinuidade	Moderado	-5
Classificação	71	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**SM-512:** este furo atingiu uma profundidade de 63,50 metros. Porém, o trecho televisionado se restringiu até a profundidade de 57,5 metros por conta da presença de água turva. A litologia deste ponto é composta por um gnaiss migmatítico pertencente ao embasamento cristalino com estrutura migmatítica e gnáissica, com minerais orientados de acordo com a foliação e dobrados. Há veios e bandamentos dobrados de composição quartzo-feldspática, além de conter também, clorita, biotita, epidoto, plagioclásio e anfibólio. A textura desta rocha é granolepidoblástica e apresenta feições de um grau metamórfico mais elevado na rocha, observadas a partir de bandas máficas e félsicas menos dobradas com indícios de migmatização.

Este furo pode ser dividido em duas partes: a mais próxima da superfície, que apresenta um grau de alteração mais elevado e a parte mais profunda, com menos evidências de alteração. A maioria de suas estruturas apresentam superfície rugosa e são fechadas, apesar de conter fraturas abertas com até 10 centímetros, preenchidas por

fragmentos líticos e por um material argilo-arenoso. A maioria das estruturas da parte mais superficial do maciço apresentam caimento na direção NW-SE, enquanto que as estruturas mais profundas apresentam um caimento preferencial para S, como pode ser visto na **Figura 14**.



**Figura 14:** diagramas de roseta para estruturas presentes no furo SR-512 para as profundidades entre 19,7 e 45,3 metros (esquerda) e 45,3 e 63,5 metros (direita).

A classificação geomecânica do maciço neste furo de sondagem nas duas profundidades analisadas está apresentada nas **Tabelas 9 e 10**. A **Tabela 9** evidencia que a classificação deste furo de sondagem localizado no trecho sul entre as cotas 800m e 790m é 87, ou seja, **Classe I - Excelente**. O tempo médio de auto-sustentação de seus blocos é de 20 anos, formando vãos estáveis de 15 metros e um ângulo de atrito maior do que 45°. O maciço apresenta também uma coesão elevada, apresentando valores superiores a 400 kPa.

**Tabela 9: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 800,0 e 790,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-512	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	>90%	20
Espaçamento das descontinuidades	F2	15
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F2	7
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	87	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

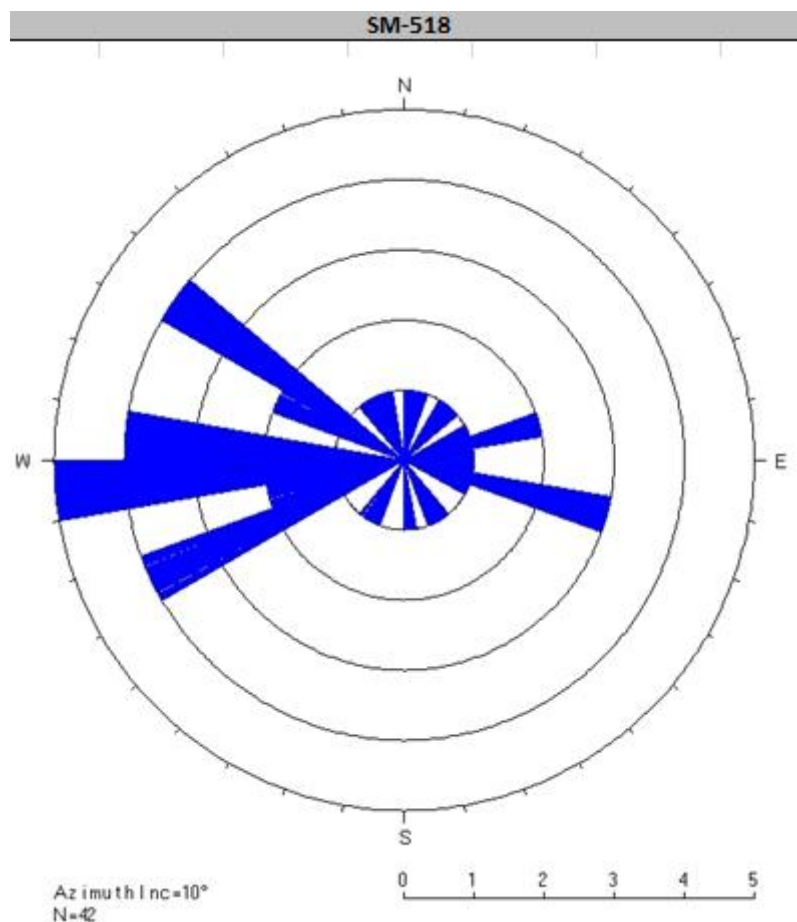
Por outro lado, a **Tabela 10** mostra que a classificação geomecânica deste maciço a uma profundidade 10 metros maior é pior, evidenciado por quase todos os parâmetros, passando de um maciço Classe I para um maciço **Classe II - Bom**, com RQD pior, descontinuidades mais espaçadas e alteradas e uma maior ação da água, chegando ao valor de 64. Com isso, o tempo médio de auto-sustentação dos blocos diminui de 20 para 1 ano, além da diminuição do tamanho do vão (10 metros), do ângulo de atrito ( $35^{\circ}$ ) e da coesão do maciço (300 kPa).



**Tabela 10: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 790,0 e 780,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-512	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	75-90%	17
Espaçamento das descontinuidades	F3	8
Condição das descontinuidades	S2	25
Ação da água subterrânea	F3	4
Atitude da descontinuidade	Moderado	-5
Classificação	64	
*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada		

**SM-518:** a profundidade atingida por este testemunho chega a 52,2 metros. Nele foi encontrado um gnaiss migmatítico pertencente ao embasamento da região com estrutura bandada, cujos bandamentos são compostos por quartzo, feldspato, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita e anfibólio que estão orientados de acordo com a foliação da rocha, descrevendo veios e bandamentos máficos e félsicos e caracterizando uma textura granolepidoblástica inequigranular. Este furo apresenta descontinuidades ao longo de quase toda sua extensão, apresentando dois intervalos métricos sem presença de estruturas. Grande parte destas descontinuidades são fechadas e com superfícies rugosas, com apenas duas estruturas com abertura centimétrica e sem preenchimento. Como é possível observar na **Figura 15**, as estruturas deste furo apresentam um caimento predominante para W, além de apresentar também diversas estruturas com mergulho para E.



**Figura 15:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SM-518.

As classificações deste testemunho de sondagens nas duas profundidades analisadas estão dispostas nas **Tabelas 11 e 12**. A uma cota de 800 a 790 metros, a classificação geomecânica é **Classe V - Péssima**, pois nesta profundidade é interceptada a capa sedimentar que, por convenção, é classificada como sendo da pior classe por razões de conservadorismo. Com isso, assume-se que o tempo médio de auto-sustentação dos blocos formados é inferior a 30 minutos, formando vãos de no máximo 1 metro. Seu ângulo de atrito é estimado menor do que  $15^\circ$  e sua coesão menor do que 100 kPa.

**Tabela 11: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 800,0 e 790,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-518	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	-	-
RQD (%)	-	-
Espaçamento das descontinuidades	-	-
Condição das descontinuidades	-	-
Ação da água subterrânea	-	-
Atitude da descontinuidade	-	
Classificação	0	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

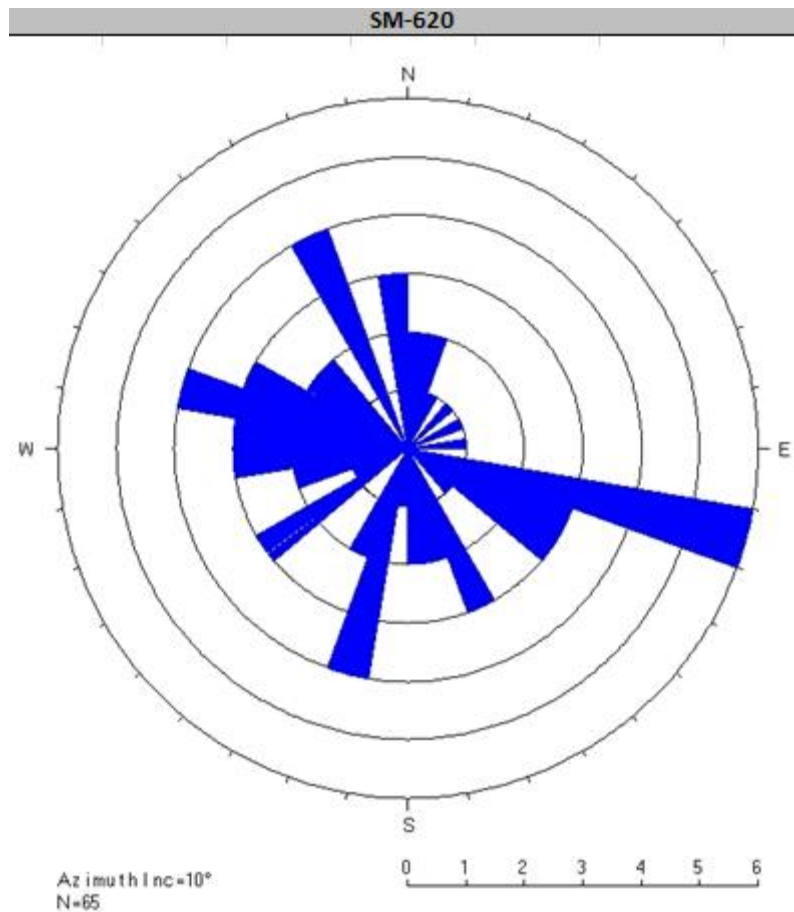
Contudo, ao aprofundar 10 metros, a classificação geomecânica varia drasticamente (**Tabela 12**). Neste trecho que intercepta a rocha, a classificação é igual a 85, ou seja, é um maciço **Classe I - Excelente**, com tempo médio de auto-sustentação em torno de 20 anos, formando vãos de até 15 metros, ângulo de atrito superior a 45° e coesão superior a 400 kPa.

**Tabela 12: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 790,0 e 780,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-518	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	90-100%	20
Espaçamento das descontinuidades	F1-F2	15
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F1-F2	7
Atitude da descontinuidade	Favorável	-2
Classificação	85	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**SM-620:** assim como nos furos de sondagem anteriores, a litologia encontrada é um gnaíse migmatítico, com estrutura gnáíssica bandada e textura granolepidoblástica inequigranular, cujos minerais que a compõem são quartzo, feldspato, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita e anfibólio que acompanham a foliação da rocha e por vezes descrevem veios máficos e félsicos ao longo da profundidade do furo. Todas as descontinuidades encontradas neste testemunho televisionado apresentam superfície rugosa e são fechadas. Algumas delas, entre 27 e 28,5 metros apresentam uma película de oxidação que, como descrito anteriormente, pode significar a percolação de água na rocha. As estruturas estudadas possuem um mergulho preferencial para a direção SE, apresentando também diversas estruturas com mergulhos para as direções SW e NW também, como visto na **Figura 16**.



**Figura 16:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SM-620.

A classificação geomecânica das duas profundidades descritas no testemunho de sondagem SM-620 localizado no trecho norte está disposta nas **Tabelas 13 e 14**. A **Tabela 13**, referente a profundidade entre as cotas 750 e 730 metros, revela que este bloco apresenta uma classificação igual a 37, ou seja, **Classe IV - Ruim**. O tempo médio de auto-sustentação dos blocos é aproximadamente 10 horas, formando vãos de até 2,5 metros. O ângulo de atrito deste bloco é próximo a  $25^\circ$  e sua coesão gira em torno de 150 kPa.

**Tabela 13: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 750,0 e 730,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-620	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A3-C3	4
RQD (%)	<20%	3
Espaçamento das descontinuidades	F5	5
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F5	0
Atitude da descontinuidade	Moderado	-5
Classificação	37	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

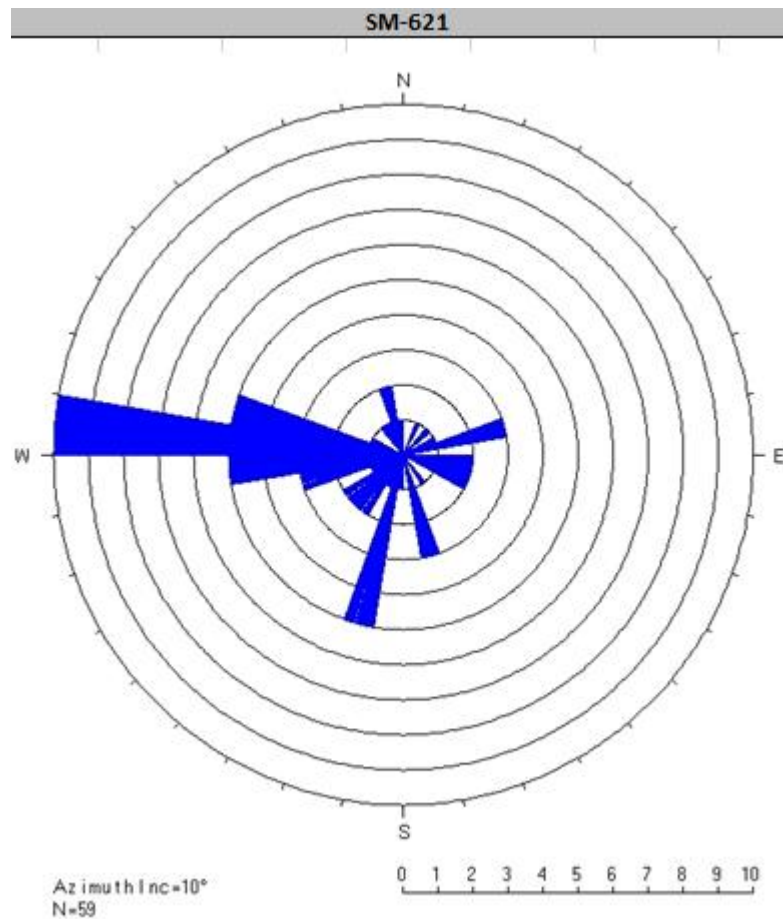
Aprofundando-se 10 metros (**Tabela 14**), a classificação geomecânica melhora significativamente, atingindo um bloco **Classe I - Excelente**, de classificação igual a 95. A soma dos pesos dos parâmetros permite chegar a um tempo médio de auto-sustentação dos blocos igual a 20 anos, formando vãos de até 15 metros, com um ângulo de atrito e uma coesão superiores a 45° e 400 kPa, respectivamente.

**Tabela 14: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 730,0 e 720,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-620	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	100%	20
Espaçamento das descontinuidades	F1	20
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F1	15
Atitude da descontinuidade	Moderado	-5
Classificação	95	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**SM-621:** a profundidade atingida por este furo de sondagem é igual a 47,7 metros. A estrutura deste gnaisse migmatítico é bandada e migmatítica, com textura granolepidoblástica inequigranular composta por quartzo, feldspato, plagioclásio, epidoto, clorita biotita e anfibólio, que definem veios máficos e félsicos na rocha, assim como seu bandamento. As descontinuidades neste furo presentes se encontram concentradas em longos trechos, sendo estas com superfícies rugosas e fechadas, sem qualquer preenchimento. Estas descontinuidades apresentam um mergulho preferencial na direção WNW, além de uma quantidade considerável de estruturas com mergulho para SW, como pode ser visto na **Figura 17**.



**Figura 17:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SM-621.

A classificação geomecânica das duas profundidades analisadas para o testemunho de sondagem SM-621 estão dispostas nas **Tabelas 15 e 16**. Como é de se observar, a classificação geomecânica dos blocos de ambas profundidades (entre as cotas 750 e 730 metros e entre 730 e 720 metros) é igual a 100, ou seja, **Classe I - Excelente**. O tempo médio de auto-sustentação dos blocos é próximo de 20 anos, formando vãos de até 15 metros. O ângulo de atrito é superior a  $45^\circ$  e a coesão do maciço é maior do que 400 kPa.



**Tabela 15: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 750,0 e 730,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-621	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	100%	20
Espaçamento das descontinuidades	F1	20
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F1	15
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	100	

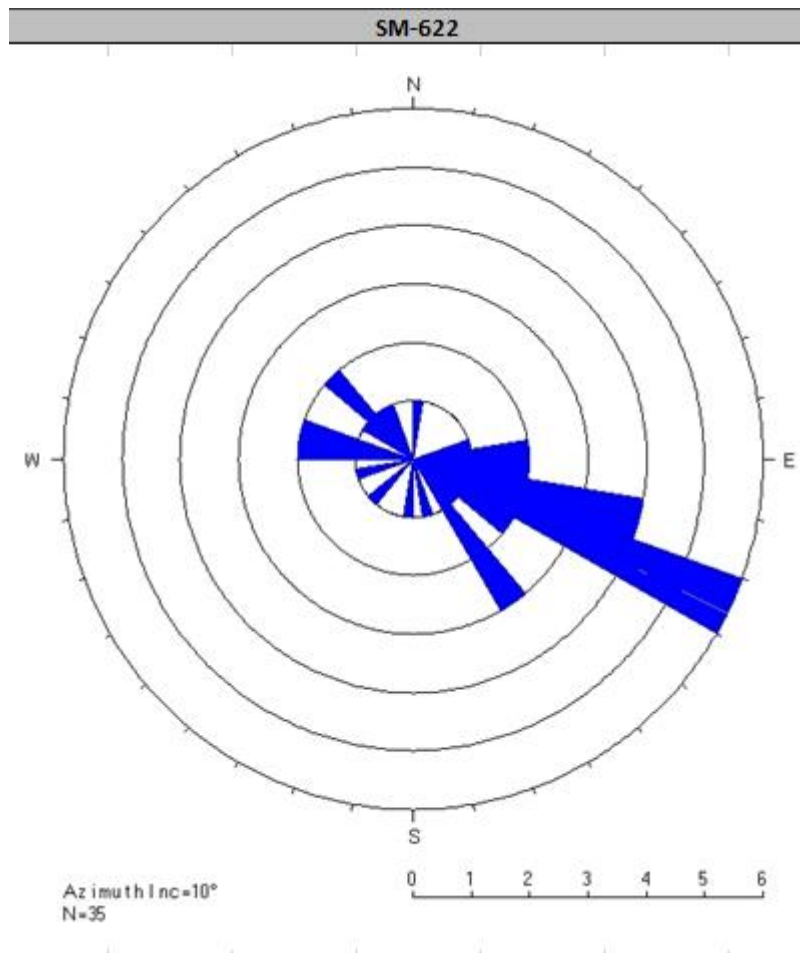
\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**Tabela 16: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 730,0 e 720,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-621	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	100%	20
Espaçamento das descontinuidades	F1	20
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F1	15
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	100	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**SM-622:** este furo atingiu uma profundidade de 46,40 metros, perfurando um migmatito pertencente ao embasamento da Bacia de São Paulo. A estrutura da rocha é migmatítica, com minerais orientados e com sua foliação e bandamentos composicionais dobrados compostos majoritariamente por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita e anfibólio, dando à rocha uma textura granolepidoblástica inequigranular. As descontinuidades se concentram em trechos e apresentam superfície rugosa, sendo que a maioria destas descontinuidades não apresentam abertura com a exceção de uma, com 1,9 centímetros de espessura preenchida por um material argilo-arenoso, sendo que a maioria destas estruturas apresentam um mergulho para SE, como é possível notar na **Figura 18**.



**Figura 18:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SM-622.

As **Tabelas 17 e 18** apresentam o resumo dos parâmetros analisados para classificação geomecânica do furo de sondagem SM-622, localizado no trecho norte. Assim como no furo de sondagem SM-621, os blocos pertencentes a esta sondagem em ambas profundidades (entre 750 e 730 metros e entre 730 e 720 metros) são de **Classe I - Excelente**, sendo classificados na soma dos pesos dos parâmetros como 87 (**Tabela 17**) e 100 (**Tabela 18**). Esta pequena diferença se dá por conta do maior espaçamento das descontinuidades e maior ação da água subterrânea a profundidades menores, atribuindo menores pesos a estes parâmetros, tornando o trecho profundo melhor classificado. Apesar desta pequena diferença, estes blocos de diferentes profundidades apresentam características muito semelhantes, com tempo médio de auto-sustentação dos blocos próximo a 20 anos, formando vãos de 15 metros, com ângulo de atrito superior a  $45^\circ$  e coesão superior a 400 kPa.

**Tabela 17: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 750,0 e 730,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-622	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	>90%	20
Espaçamento das descontinuidades	F2	15
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F2	7
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	87	

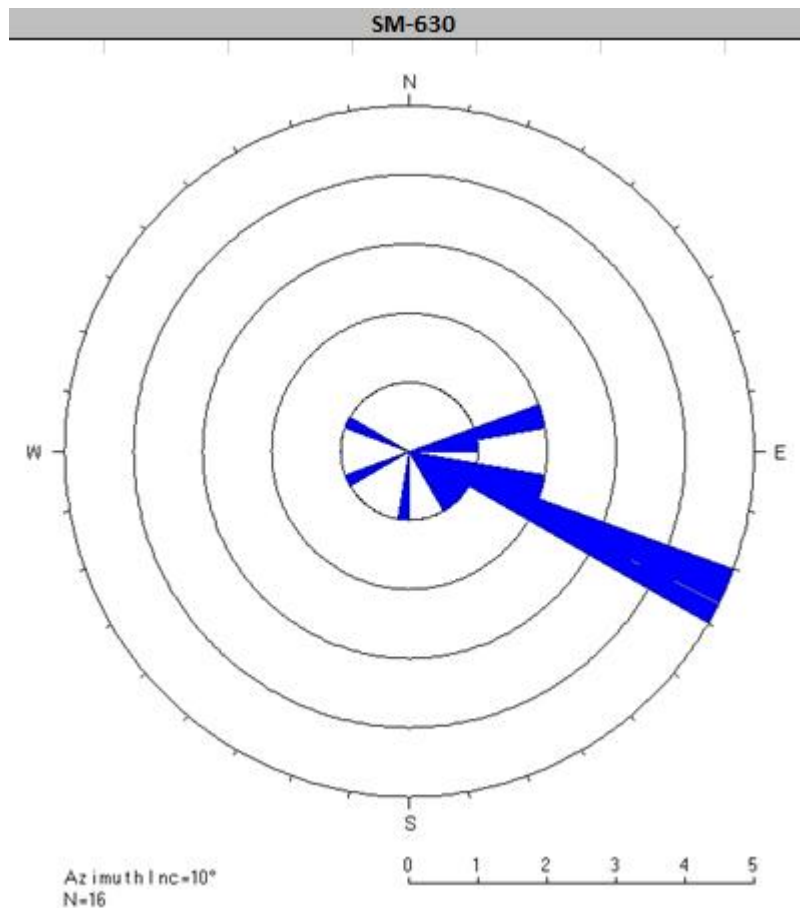
\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**Tabela 18: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 730,0 e 720,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-622	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	100%	20
Espaçamento das descontinuidades	F1	20
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F1	15
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	100	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**SM-630:** este furo apresenta uma profundidade reduzida quando comparada aos outros furos de sondagem, atingindo 22 metros. A rocha perfurada é um migmatito pertencente ao embasamento da BSP, com estrutura migmatítica, minerais orientados e com sua foliação e bandamentos composicionais dobrados compostos majoritariamente por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita e anfibólio, dando à rocha uma textura é granolepidoblástica inequigranular. Assim como no furo SM-622, este também apresenta trechos de perfuração que não interceptam qualquer descontinuidade e, quando interceptam, estas apresentam superfície rugosa e sem abertura, exceto a primeira, que apresenta uma abertura de 1.26 centímetros preenchida por um material argilo-arenoso. A **Figura 19** explicita uma característica comum das estruturas deste furo: caimento preferencialmente para SE.



**Figura 19:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SM-630.

Diferentemente das classificações geomecânicas anteriores, esta, do testemunho de sondagem SM-630 localizada no trecho norte foi feita em apenas uma profundidade, pois a profundidade máxima atingida neste local foi 24,71 metros, perfurando apenas até a cota 731,07 metros. A **Tabela 19** mostra os pesos atribuídos a cada parâmetro, chegando a uma classificação igual a 87, ou seja, **Classe I - Excelente**. Com base na geologia local do trecho norte, estima-se que abaixo da cota 730 metros neste ponto permaneça aflorando o embasamento gnáissico que, como nos outros casos do trecho norte, apresenta uma classificação geomecânica excelente. Com isso, estima-se que em ambas profundidades o tempo médio de auto-sustentação dos blocos seja em torno de 20 anos, formando vãos de até 15 metros e um ângulo de atrito superior a  $45^\circ$ , com coesão do maciço superior a 400 kPa.

**Tabela 19: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 750,0 e 730,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SM-630	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A1-C1	15
RQD (%)	100%	20
Espaçamento das descontinuidades	F2	15
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F2	7
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	87	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

**Tabela 20: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 730,0 e 720,0 metros**

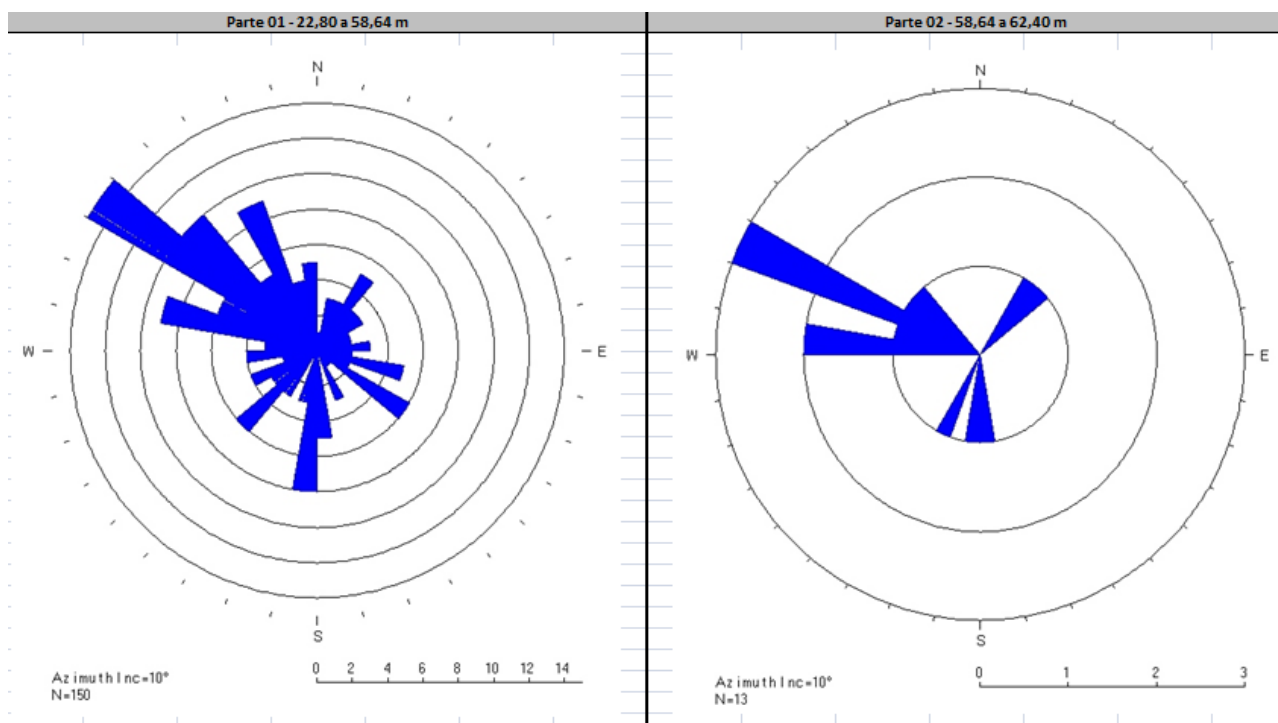
FURO DE SONDAGEM	SM-630	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	<p style="text-align: center;">Não Classificado</p> <p style="text-align: center;">Estima-se que esteja em torno de 81-100 devido à geologia local do trecho norte</p>	
RQD (%)		
Espaçamento das descontinuidades		
Condição das descontinuidades		
Ação da água subterrânea		
Atitude da descontinuidade		
Classificação		
*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada		

**SR-633:** este furo apresenta características distintas aos últimos furos: um maior grau de alteração mais próximo à superfície. A litologia do furo é composta por um gnaisse que pertence ao embasamento cristalino da BSP. Sua estrutura é gnáissica com minerais orientados de acordo com a foliação e bandada, com veios e bandas máficas e félsicas, compostas por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita e anfibólio, que definem a textura granolepidoblástica inequigranular da rocha.

Este furo pode ser dividido em 2 partes: a mais superficial, que apresenta um maior grau de alteração e a mais profunda, com um menor grau de alteração. Ambas partes possuem estruturas que possuem um mergulho predominantemente para NE (**Figura 20**) com superfícies rugosas e fechadas. Porém, há algumas estruturas abertas e semi-abertas, variando a sua abertura entre 0,47 centímetros até 47 centímetros, com película de



oxidação, indicando que pode haver percolação de água por vários trechos de diferentes profundidades deste furo.



**Figura 20:** diagrama de roseta para estruturas presentes no furo SR-633 entre as profundidades 22,8 e 58,64 metros (esquerda) e 58,64 e 62,4 metros (direita).

As **Tabelas 21 e 22** apresentam as classificações geomecânicas da sondagem SR-633, pertencente ao trecho sul da área em estudo. Conforme visto na **Tabela 21**, a classificação deste bloco rochoso é igual a 48, ou seja, **Classe III - Regular**. Isto se dá por conta de um RQD baixo, uma resistência baixa, além do espaçamento das discontinuidades ser um pouco maior, permitindo uma maior ação da água subterrânea, fazendo com que este bloco apresente um tempo médio de auto-sustentação próximo a 1 semana, formando vãos de até 5 metros, ângulo de atrito próximo a 30° e coesão próxima a 250 kPa.

**Tabela 21: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 800,0 e 790,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SR-633	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A3-C4	3
RQD (%)	22%	3
Espaçamento das descontinuidades	F3	8
Condição das descontinuidades	S1	30
Ação da água subterrânea	F3	4
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	48	
*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada		

Entretanto, como pode ser visto na **Tabela 22**, as condições melhoram um pouco com um aumento de 10 metros na profundidade de análise. A resistência aumenta, o RQD aumenta, mas o espaçamento e condição das descontinuidades diminuem, além da maior ação da água subterrânea, fazendo com que a classificação neste trecho seja igual a 50, muito próximo a classificação 10 metros acima (48), sendo também um maciço **Classe III**, apresentando um tempo médio de auto-sustentação igual a 1 semana, formando vãos de até 5 metros, ângulo de atrito e coesão próximos a 40° e 250 kPa, respectivamente.

**Tabela 22: classificação geomecânica da sondagem entre as cotas 790,0 e 780,0 metros**

FURO DE SONDAGEM	SR-633	
Parâmetro*	Classificação	Peso*
Resistência (Mpa)	A2-C2	7
RQD (%)	50-75%	13
Espaçamento das descontinuidades	F4-F5	5
Condição das descontinuidades	S1-S2	25
Ação da água subterrânea	F4-F5	0
Atitude da descontinuidade	Muito favorável	0
Classificação	50	

\*Classificação feita com base em Bieniawski (1989) simplificada

## 8.2 Modelo estrutural

Como já foi dito anteriormente, os testemunhos de sondagem foram localizados em mapa e separados por trecho de acordo com sua proximidade com os demais furos. Com isso, foi possível dividir os testemunhos que se encontravam mais a norte (SM-620, SM-621, SM-622, e SM630) dos que se encontravam mais a sul (SR-510, SM-512, SR-633 e SM-518).

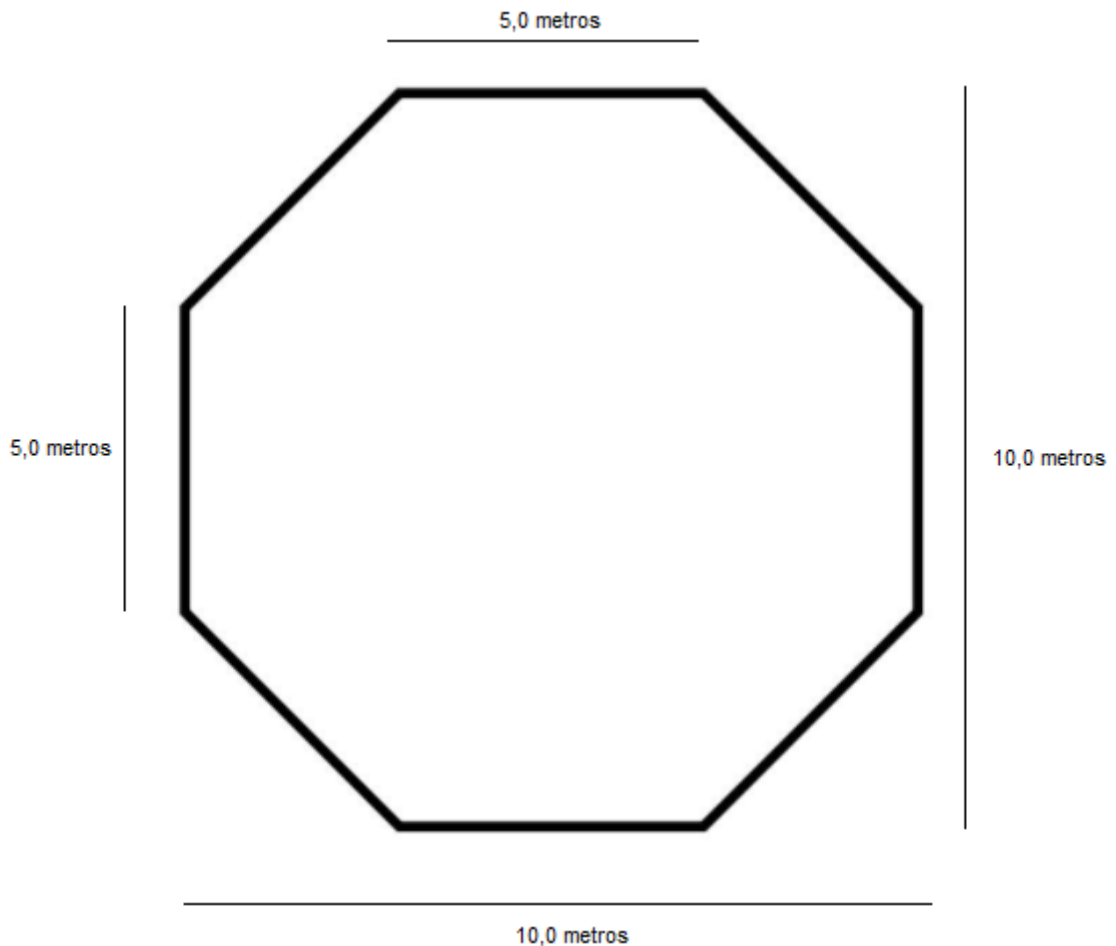
Com essa divisão, foram colocadas em estereogramas todas as atitudes das descontinuidades descritas por meio do televisionamento (fraturas, foliação, bandamento e veios) por trecho, para que pudessem ser distinguidas as principais famílias de descontinuidades tanto do trecho norte quanto do trecho sul.

Tendo estas principais famílias de estruturas conhecidas, foram traçados dois perfis (A-A' para o trecho norte e B-B' para o trecho sul) que simulam a direção do túnel escavado do metrô por onde passará a Linha 5 - Lilás.

Com todos os dados estruturais disponíveis, foi utilizado o *Software Unwedge*, da Rocscience, por meio do qual é possível representar as principais famílias de descontinuidades juntamente com a arquitetura do túnel escavado (altura e largura da escavação, levando em consideração a geometria da cava). Com isso é possível identificar graficamente os chamados "blocos-chave" e analisar a sua removibilidade. Por meio do programa é possível, ainda, calcular o fator de segurança quanto à deslizamento das cunhas removíveis.

Para esta obra do metrô, foi considerado (baseado em informações fornecidas pelo Metrô de São Paulo) que o túnel de escavação segue uma geometria semelhante a um círculo com diâmetro de 10,0 metros. Como esta versão do programa não aceita que a geometria da escavação seja circular, foi utilizado um octógono para representar a perfuração. As dimensões deste octógono foram escolhidas de forma a aproximar-se da geometria circular, valorizando um pouco as dimensões das paredes laterais, do teto e do chão. As dimensões das arestas do octógono podem ser vistas na **Figura 21** a seguir.

Os dados de entrada correspondentes aos parâmetros geomecânicos das descontinuidades (coesão e ângulo de atrito) foram admitidos como aqueles sugeridos por Bieniawski (1989), apresentados no Quadro 7, de acordo com a classificação do maciço.



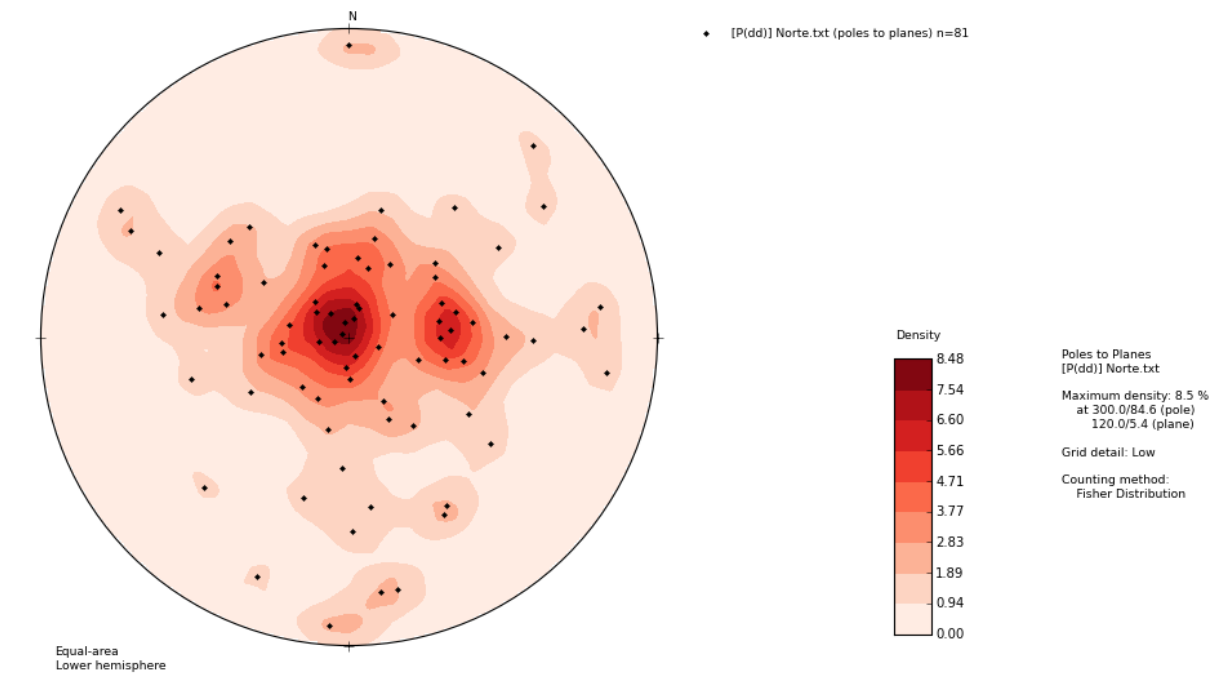
**Figura 21:** arquitetura da frente de escavação adotada para os trechos em estudo.

### **TRECHO NORTE**

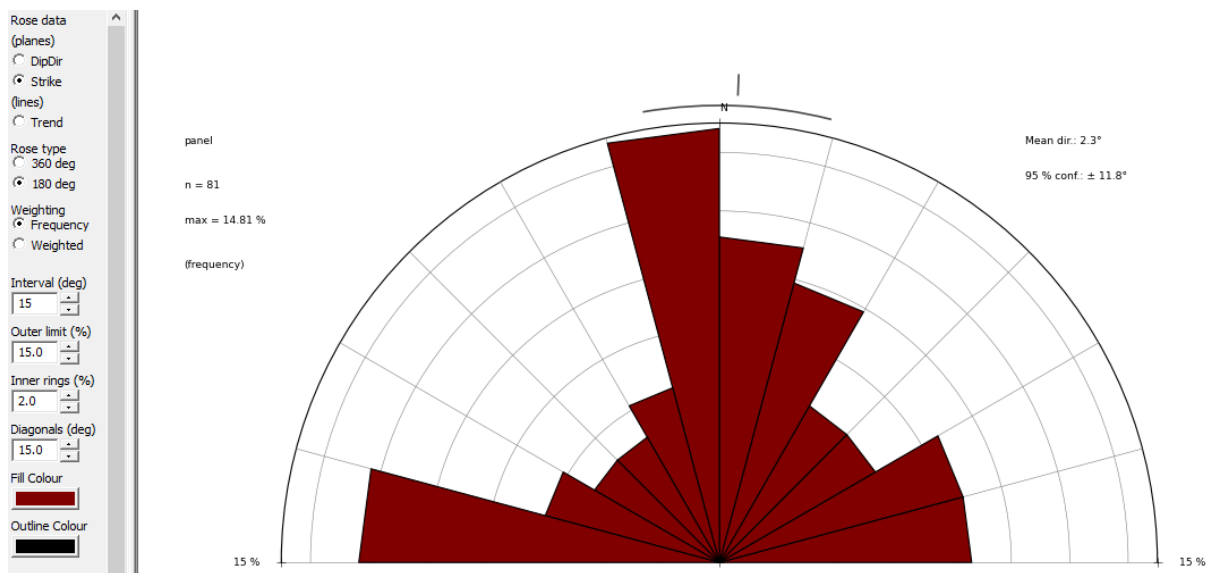
No trecho norte foram feitas 138 medidas de atitude das discontinuidades descritas a partir dos furos de sondagem televisionados. As figuras e diagramas a seguir apresentam as principais características estruturais das fraturas, veios e foliação observadas.

As **Figuras 22 e 23** apresentam as principais características das fraturas presentes no trecho norte em estudo da Linha 5 do Metrô. Como pode ser visto no estereograma, foram medidas atitudes de 81 fraturas. Estas se encontram em grande parte horizontalizadas, fazendo com que haja uma grande concentração de projeções polares na porção central do estereograma. A densidade máxima de medidas foi de 8,5% na direção  $120^\circ$  (sudeste) com um mergulho semi-horizontal de  $5^\circ$ , descrevendo a principal família de fraturas observada neste trecho. Outra família de fraturas pode ser vista com direção sudoeste e mergulho subhorizontal, com uma densidade de medidas em torno de 5-6%.

Já o diagrama de Roseta (**Figura 23**) revela que as principais famílias de fraturas apresentam direções quase ortogonais, sendo uma delas com direção norte/sul e outra leste/oeste.



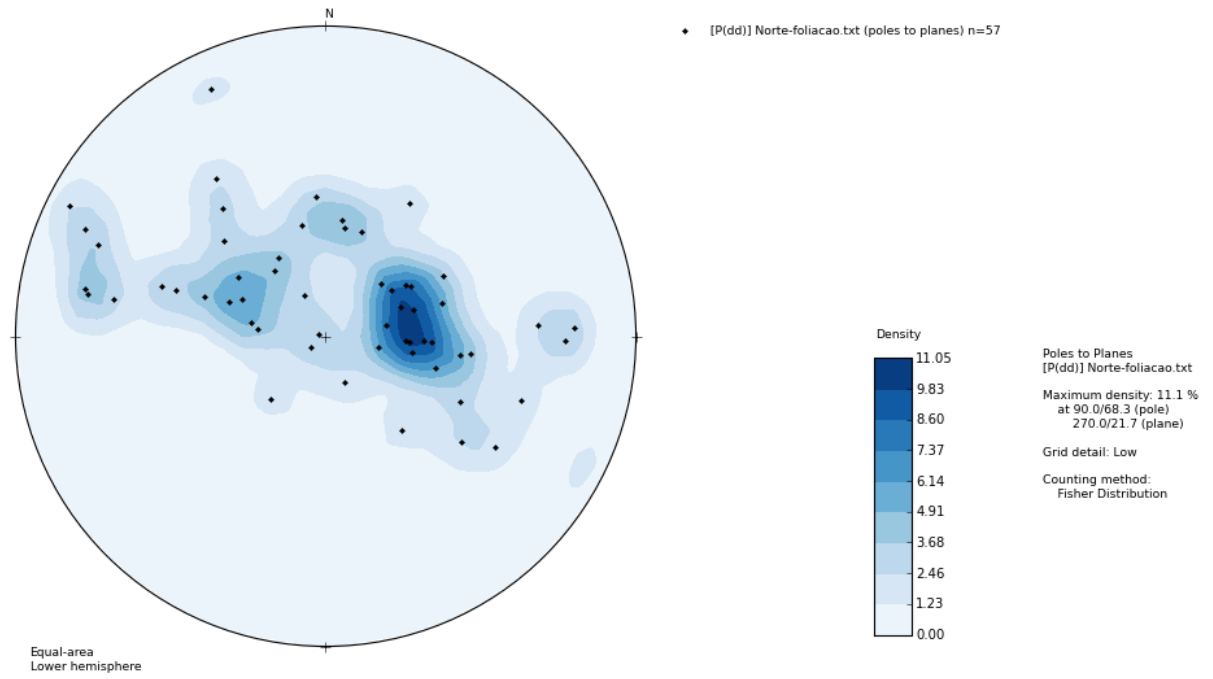
**Figura 22:** estereograma das fraturas presentes no trecho norte.



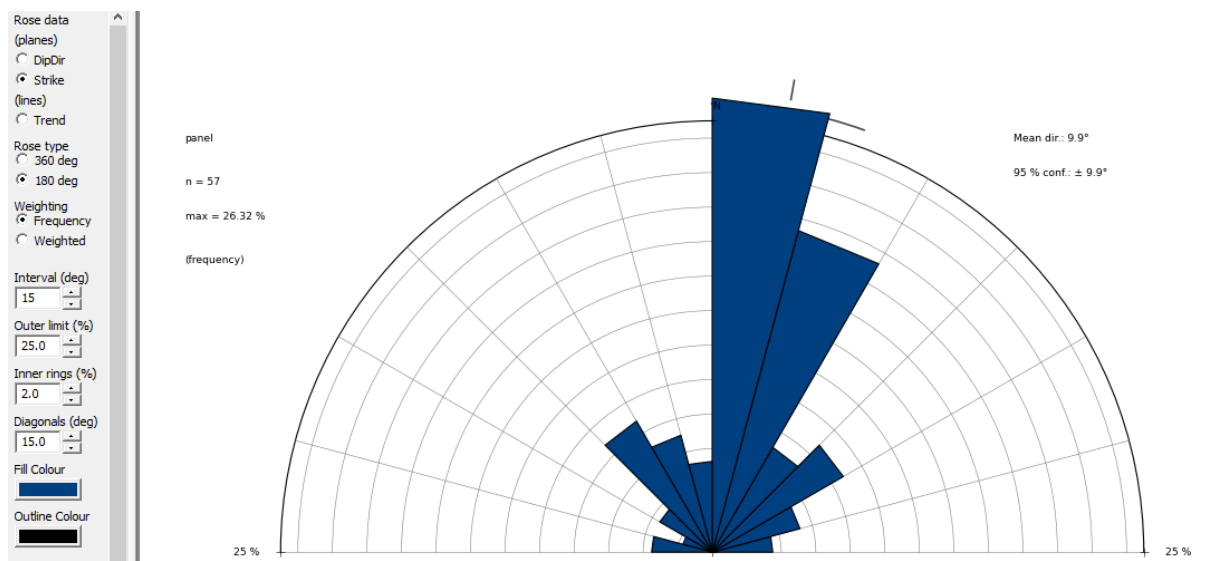
**Figura 23:** diagrama de roseta das fraturas do trecho norte.

As **Figuras 24 e 25** apresentam as atitudes da foliação e dos veios presentes no trecho norte. Como é possível observar pelo estereograma (**Figura**), foram medidas 57 atitudes de veios e foliação, distinguindo uma principal família de atitude  $270^{\circ}/21,7^{\circ}$  com uma densidade de 11,1%.

Já a **Figura 25** revela que há três principais direções de foliação e veios no trecho em análise, uma NNE-SSW com grande frequência, outra NW-SE e uma terceira NE-SW com menor frequência.



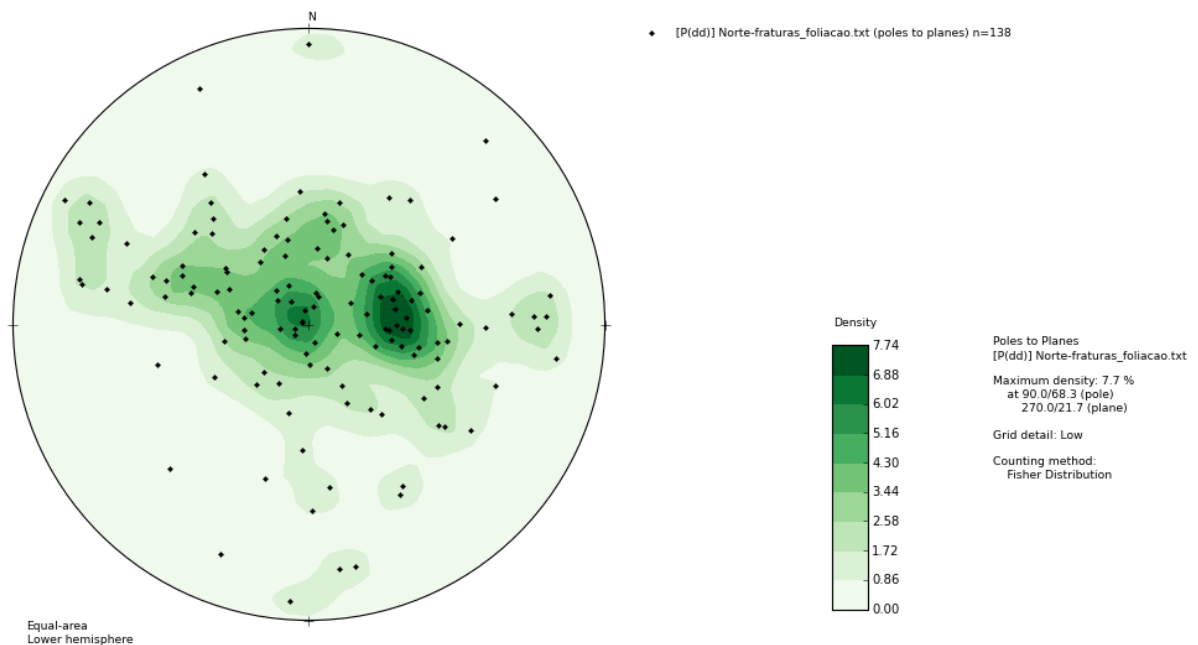
**Figura 24:** estereograma da foliação e de veios medidos no trecho norte



**Figura 25:** Diagrama de roseta da foliação e dos veios do trecho norte.

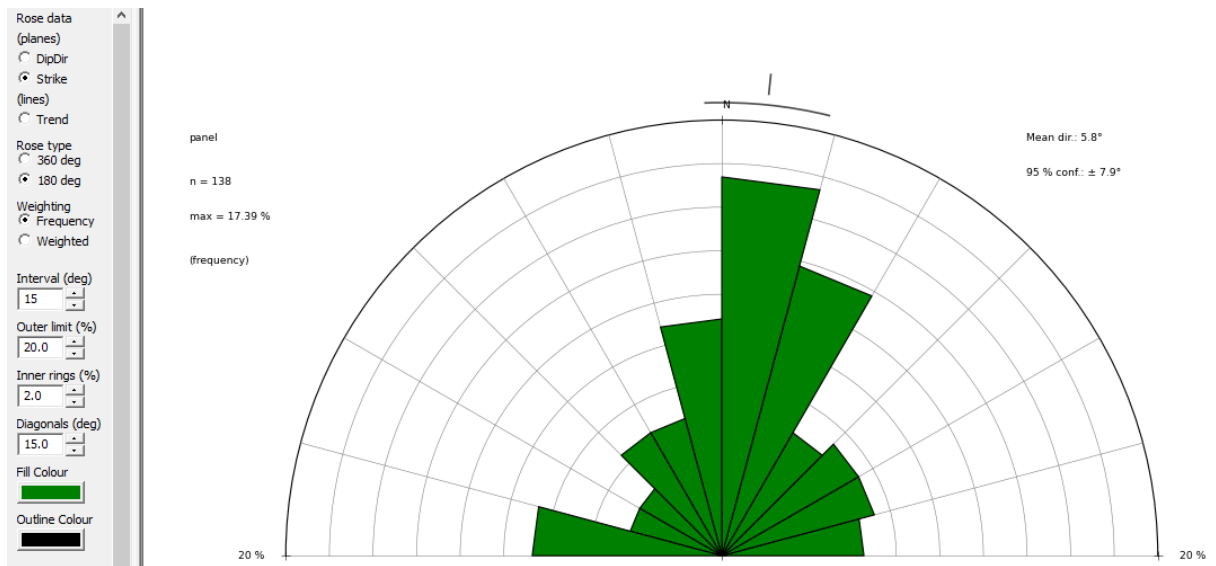
As **Figuras 26 e 27** apresentam as principais características de todas as descontinuidades mapeadas no trecho norte. O estereograma (**Figura 26**) revela que o mergulho das principais descontinuidades é de aproximadamente  $25^\circ$  para a direção leste/oeste, enquanto que as demais medidas estão dispostas de maneira mais dispersa, formando pequenas famílias com maiores densidades de medidas.

A **Figura 27** mostra que a principal direção das descontinuidades apresenta uma direção norte/sul, com uma frequência de medidas muito maior que as demais. Contudo, outras duas famílias de descontinuidades que se destacam são as de direção NE-SW e WNW-ESE. \_\_



**Figura 26:** estereograma das descontinuidades descritas no trecho norte.



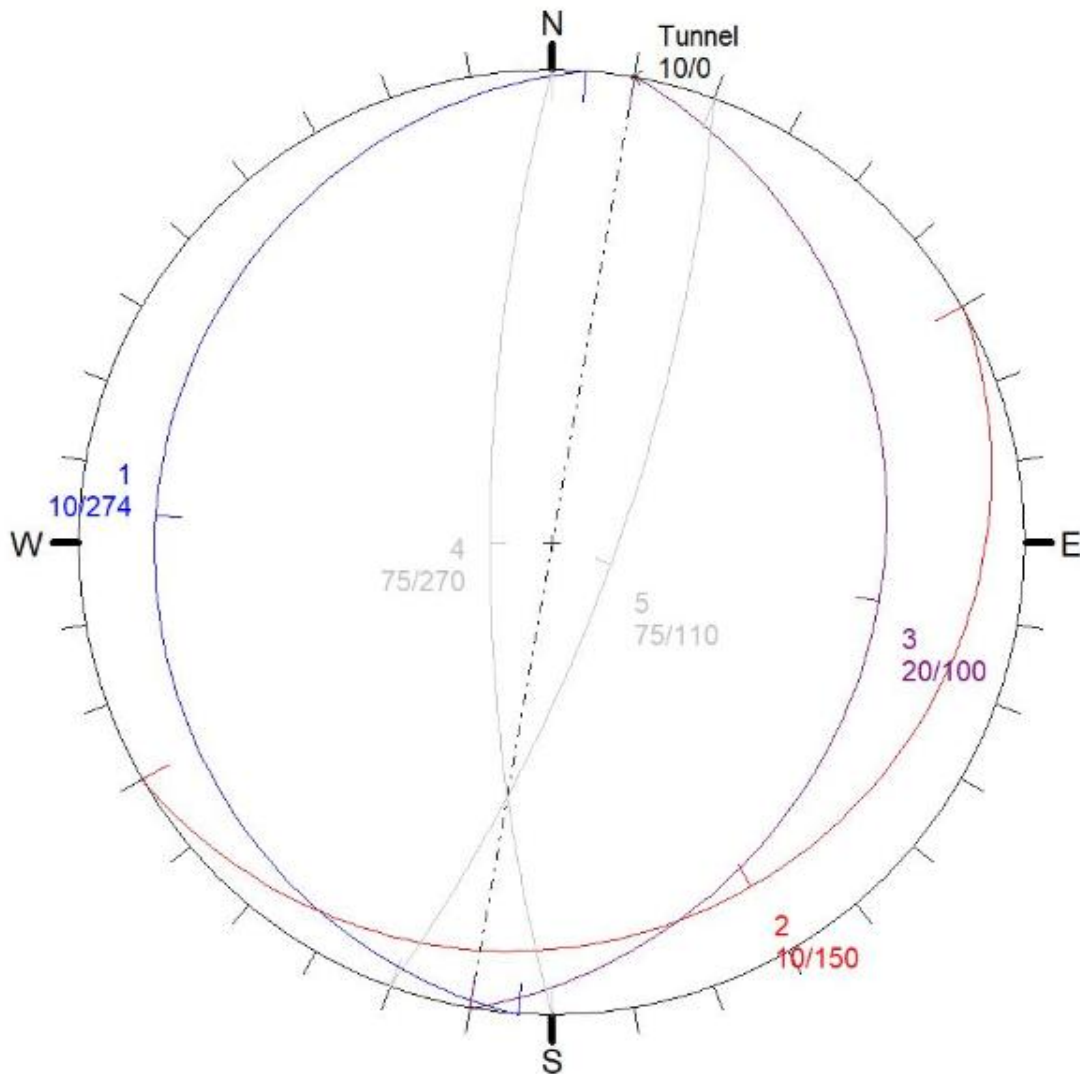


**Figura 27:** diagrama de roseta das descontinuidades do trecho norte.

A partir das figuras e diagramas acima descritos, pôde-se identificar três principais famílias de descontinuidades:

- Norte/sul, composta principalmente por foliação e veios, com uma direção média de  $005^{\circ}$  e  $10^{\circ}$  de mergulho (**Família 1: N05°E/10°NW**);
- NE-SW, composta tanto por fraturas como por foliação e veios, de direção  $060^{\circ}$  e mergulho de  $10^{\circ}$  (**Família 2: N60°E/10°SE**), e;
- WNW-ESE, composta principalmente por fraturas, com uma direção aproximada de  $280^{\circ}$  e um mergulho de  $20^{\circ}$  (**Família 3: N80°W/20°SW**).
- N-S, de menor frequência mas com um mergulho muito mais elevado do que as demais (**Família 4: NS/75°W**);
- NE-SW, com menor frequência do que as demais, mas também de alto mergulho (**Família 5: N20°E/75°SE**).

Fazendo uso do *Software Unwedge*, foram representados graficamente os principais blocos que são formados quando há interseção das principais famílias de descontinuidades com a arquitetura e direção do túnel. A **Figura 28** apresenta a representação em estereograma das principais famílias de descontinuidades e a direção do túnel no trecho norte.

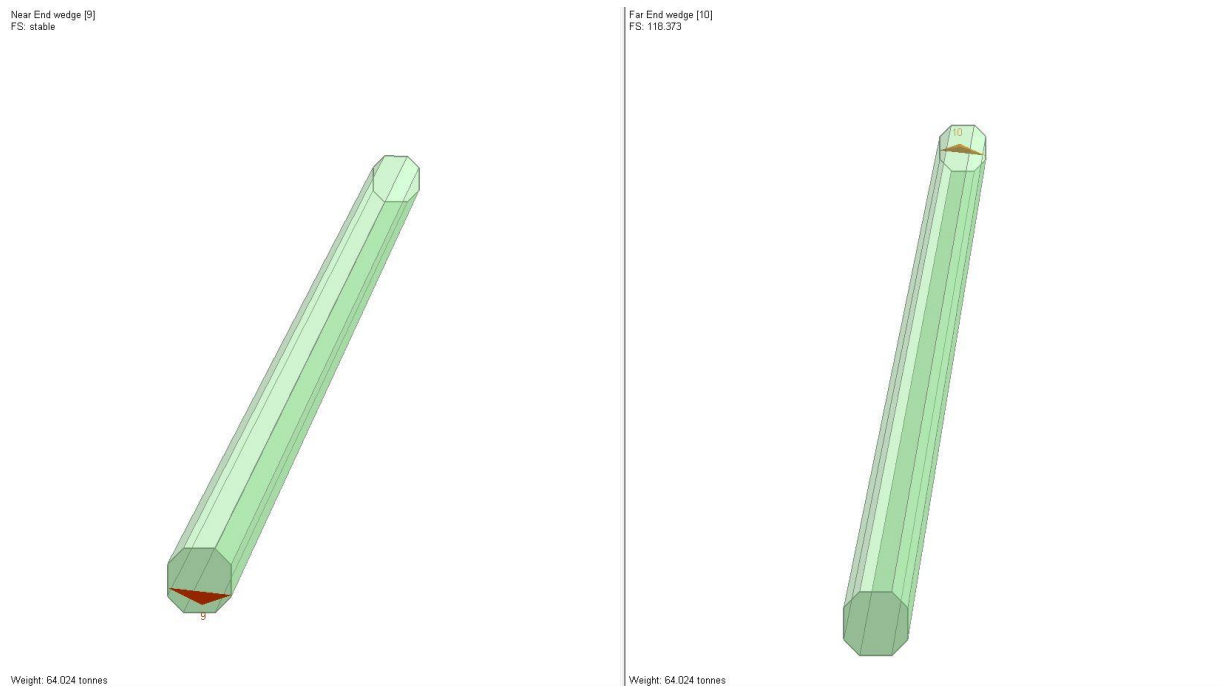


**Figura 28:** estereograma com a direção do túnel e a atitude das 5 principais famílias de descontinuidades do trecho norte.

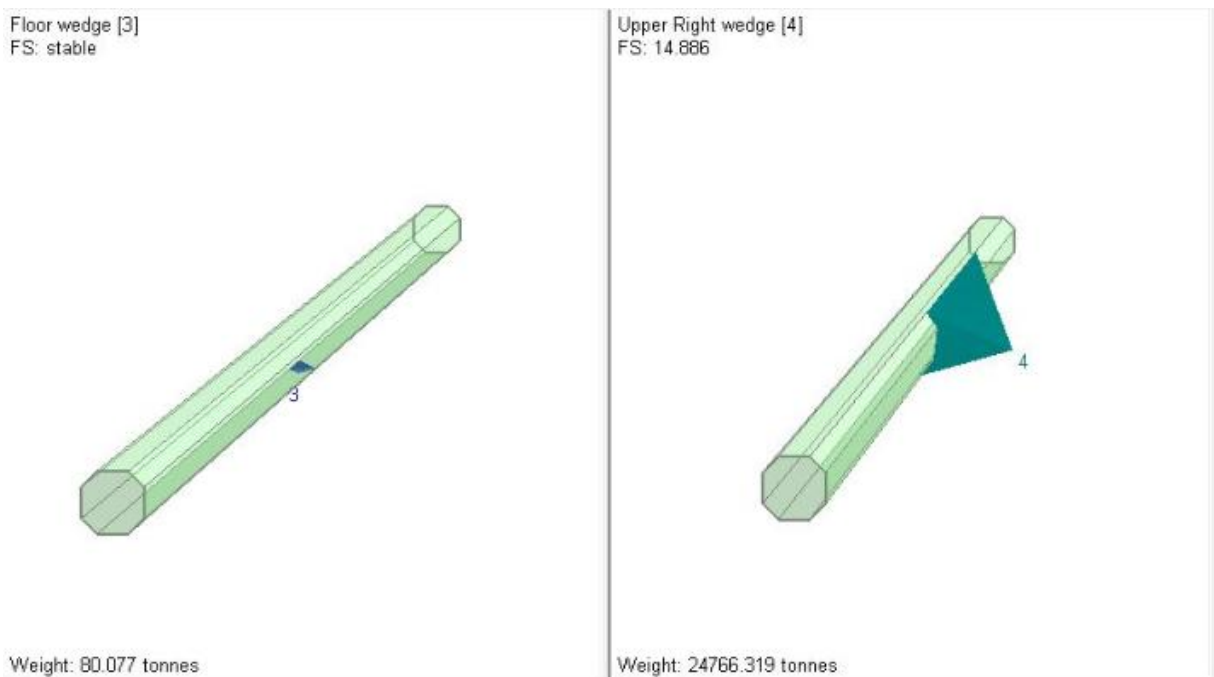
Para o cálculo dos blocos formados, foi levada em consideração a classificação geomecânica adaptada de Bieniawski (1989) e representada no **Perfil 1**, assim como as propriedades geomecânicas das descontinuidades baseadas no trabalho do mesmo autor, como ângulo de atrito e coesão, estimados de acordo com os dados do **Quadro 7**.

Vale mencionar que, para esta representação gráfica, os valores de coesão e ângulo de atrito utilizados para o cálculo dos blocos formados foram os da pior classificação geomecânica do trecho que contém rocha, simulando o pior cenário possível para a análise de estabilidade dos blocos. No caso do trecho norte, a pior classificação geomecânica entre as cotas 750 metros e 720 metros foi a do testemunho de sondagem SM-620, classificado como Classe IV - Ruim. Para esta classificação, portanto, o valor do ângulo de atrito considerado foi de  $20^\circ$  e valor de coesão do maciço considerado foi de 150 kPa.

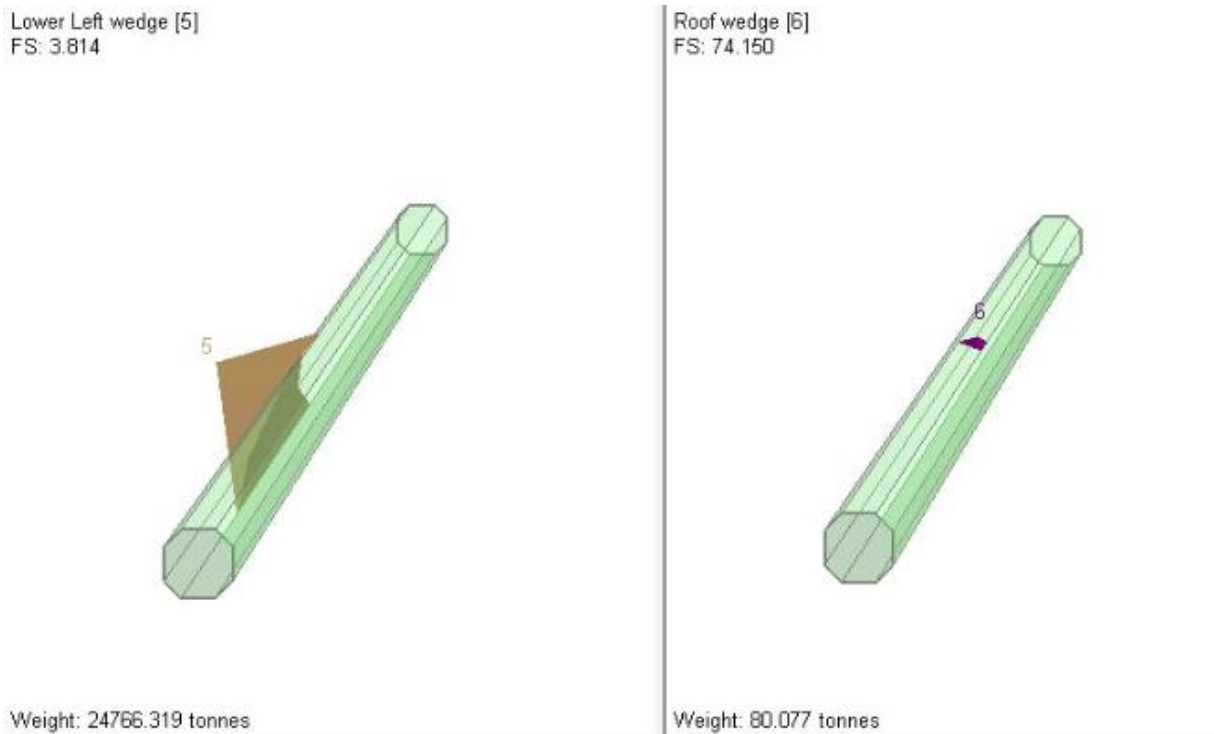
As **Figuras 29 a 33** a seguir mostram o comportamento dos blocos em relação a geometria do túnel, inclusive o fator de segurança e o peso do bloco formado (considerando uma densidade da rocha igual a 2,7 g/cm<sup>3</sup>).



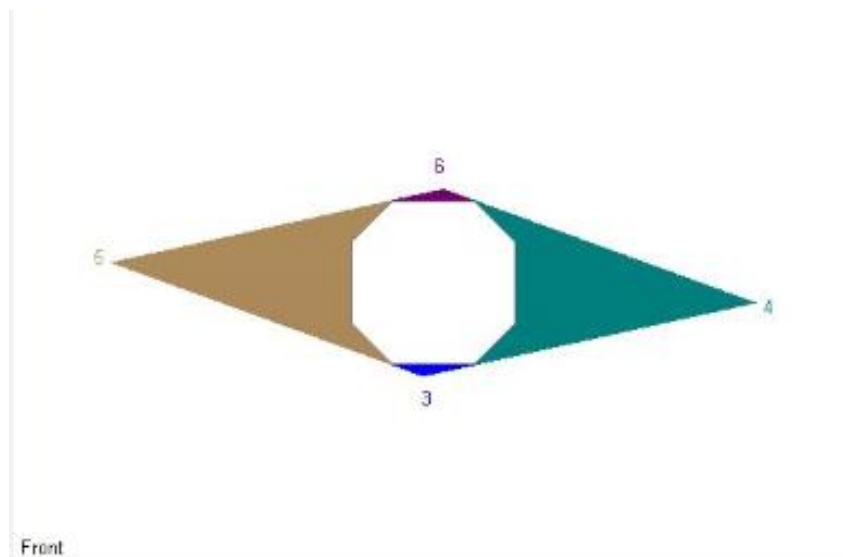
**Figura 29:** representação gráfica dos blocos rochosos formados no túnel do trecho norte. A imagem a esquerda representa a perspectiva do bloco estável formado em uma extremidade da escavação. A imagem a direita representa a perspectiva do bloco de fator de segurança 118 formado na outra extremidade da escavação.



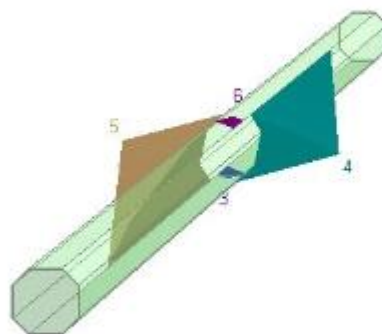
**Figura 30:** representação gráfica dos blocos rochosos formados no túnel do trecho norte. A imagem a esquerda representa o bloco estável formado no piso do túnel de escavação. A imagem a direita representa o bloco com fator de segurança 14,9 formado na parede direita da escavação.



**Figura 31:** representação gráfica dos blocos formados no túnel do trecho norte. A imagem a esquerda representa o bloco com fator de segurança 3,8 formado na parede esquerda do túnel de escavação. A imagem a direita representa o bloco com fator de segurança 74,2 formado no teto do túnel de escavação.



**Figura 32:** representação gráfica dos blocos formados nas paredes, no teto e no piso do túnel de escavação do trecho norte vistos de frente.



Perspective \*

**Figura 33:** representação gráfica dos blocos formados nas paredes, no teto e no piso do túnel de escavação do trecho norte vistos em perspectiva.

### **TRECHO SUL**

No trecho sul da área em estudo pertencente à Linha 5 do Metrô de São Paulo foram feitas 515 medidas de atitudes das discontinuidades observadas a partir do televisionamento das sondagens. As figuras e diagramas a seguir apresentam as principais características estruturais das fraturas, veios e foliação observadas.

As **Figuras 34 e 35** apresentam as principais características estruturais das fraturas descritas por meio das imagens de televisionamento óptico. Foram feitas 443 medidas de atitudes e, como se pode observar no estereograma (**Figura 34**), grande parte das fraturas deste trecho apresentam baixo grau de mergulho e muitas delas dispostas de maneira dispersa. É possível distinguir uma família com densidade maior do que 4% com um mergulho de  $7^\circ$ , aproximadamente. Contudo, é possível observar também uma família de fraturas subverticais, com mergulhos altos que chegam ao intervalo de  $70^\circ$ - $80^\circ$ .

A partir da **Figura 35**, observa-se que não há uma direção predominante em se tratando de fraturas. Há um maior destaque para a direção NNE-SSW que apresenta uma frequência de medidas maior, porém as demais apresentam um intervalo de frequência semelhante.

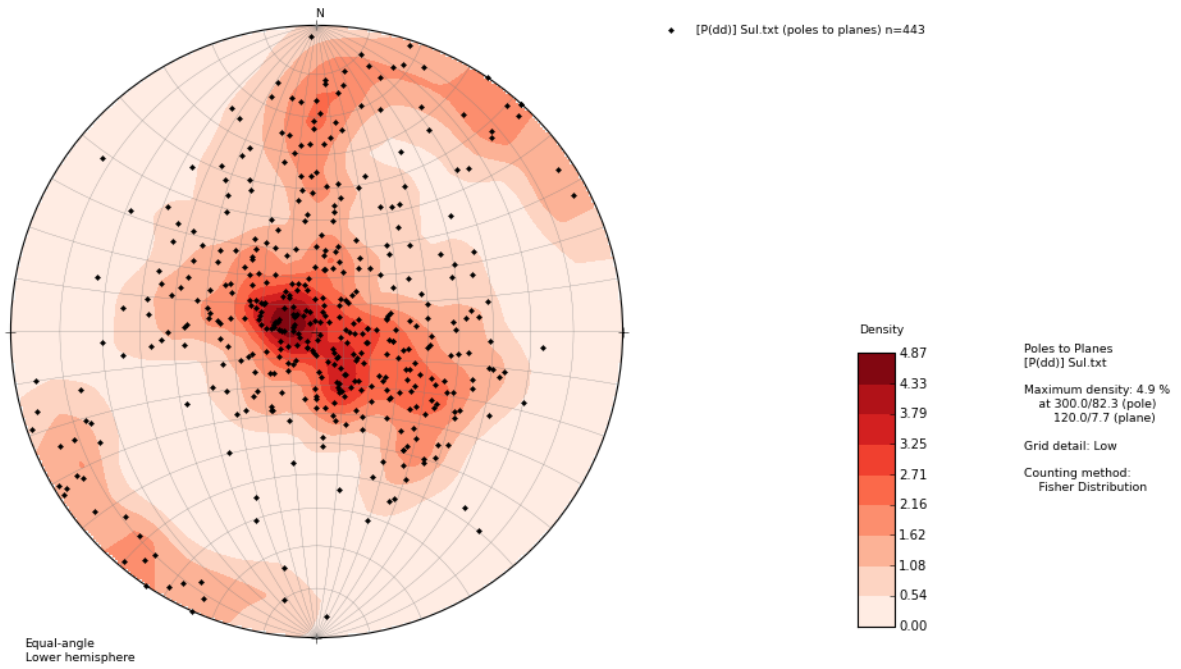


Figura 34: estereograma das fraturas observadas no trecho sul.

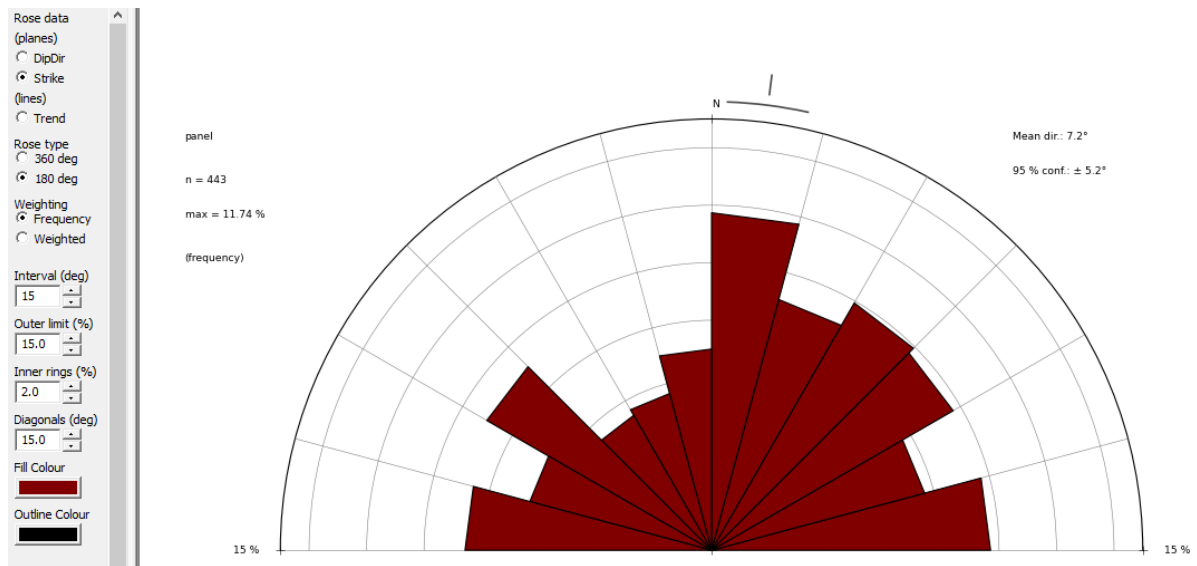
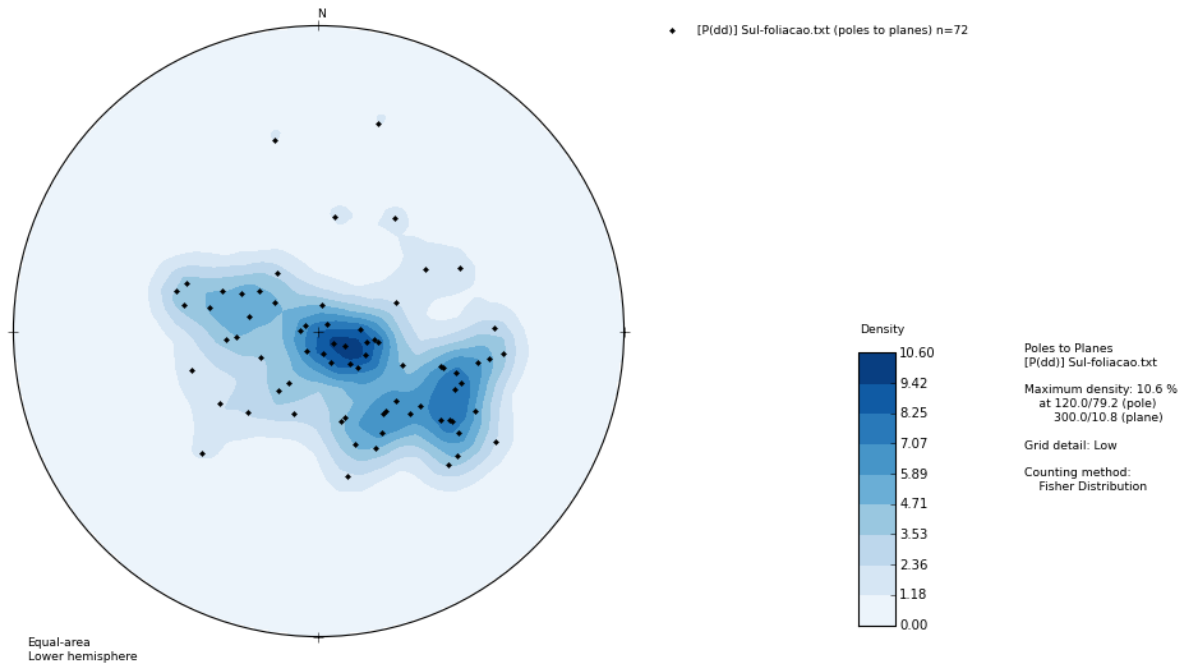


Figura 35: diagrama de roseta das fraturas do trecho sul.

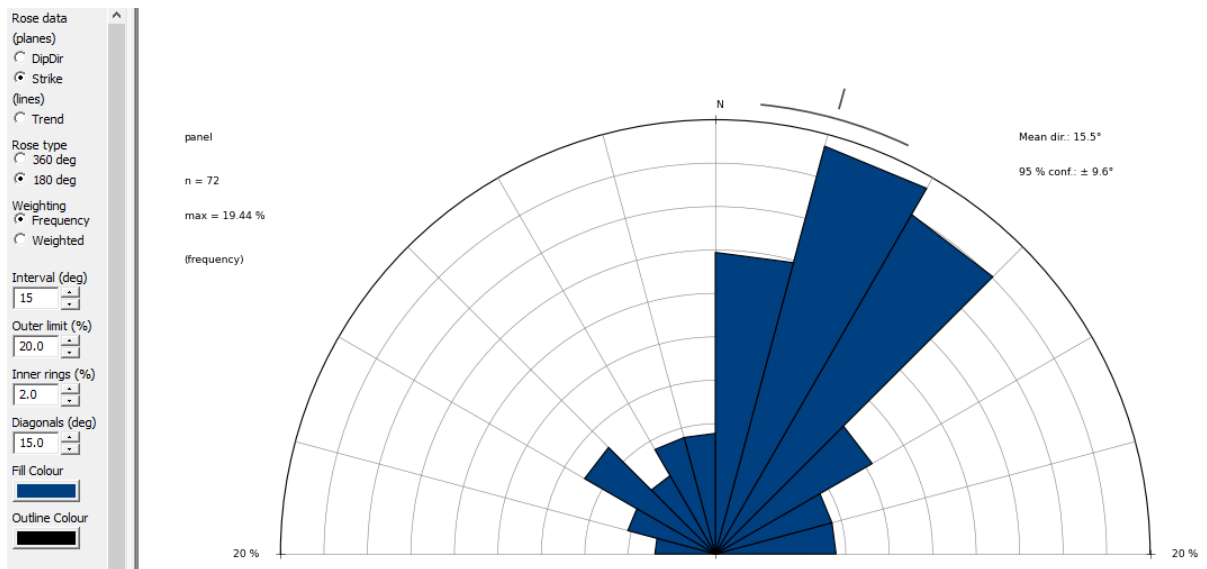
As Figuras 36 e 37 a seguir apresentam as características estruturais da foliação e dos veios analisados no trecho sul. A estereograma da Figura 36 revela que foram feitas 72 medidas, sendo que as que apresentaram maior frequência (10,6%) apresentam um baixo

mergulho, na cas de 10°, formando a principal família de veios e foliação deste trecho. Outra família que aparece com uma menor frequência apresenta direção NE-SW e um mergulho um pouco mais elevado, chegando ao intervalo de 30°-40° .

A **Figura 37** mostra que há uma família de foliação e veios de maior frequência na direção 015° (NE) e outra família de menor frequência na direção NW-SE, no intervalo de direção entre 310°-325°.



**Figura 36:** estereograma da foliação e dos veios no trecho sul.



**Figura 37:** diagrama de roseta da foliação e dos veios do trecho sul.

As **Figuras 38 e 39** revelam as principais características estruturais de todas as descontinuidades descritas e medidas do trecho sul da área em estudo. No estereograma da **Figura** é possível distinguir três famílias de descontinuidades que apresentam mergulhos e frequências semelhantes: uma com mergulho muito baixo, entre  $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ; outra com menor frequência com um mergulho um pouco mais elevado (aproximadamente  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$ ), e; uma família de maior frequência com  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  de mergulho.

A **Figura 39** assemelha-se à **Figura 35**, muito por conta da grande parte das medidas de descontinuidades serem de fraturas (443 de um total de 515 medidas). Nele pode-se observar as seguintes famílias de descontinuidades: uma de direção NE-SW, outra de direção leste/oeste e a última (de menor frequência) de direção NW-SE.



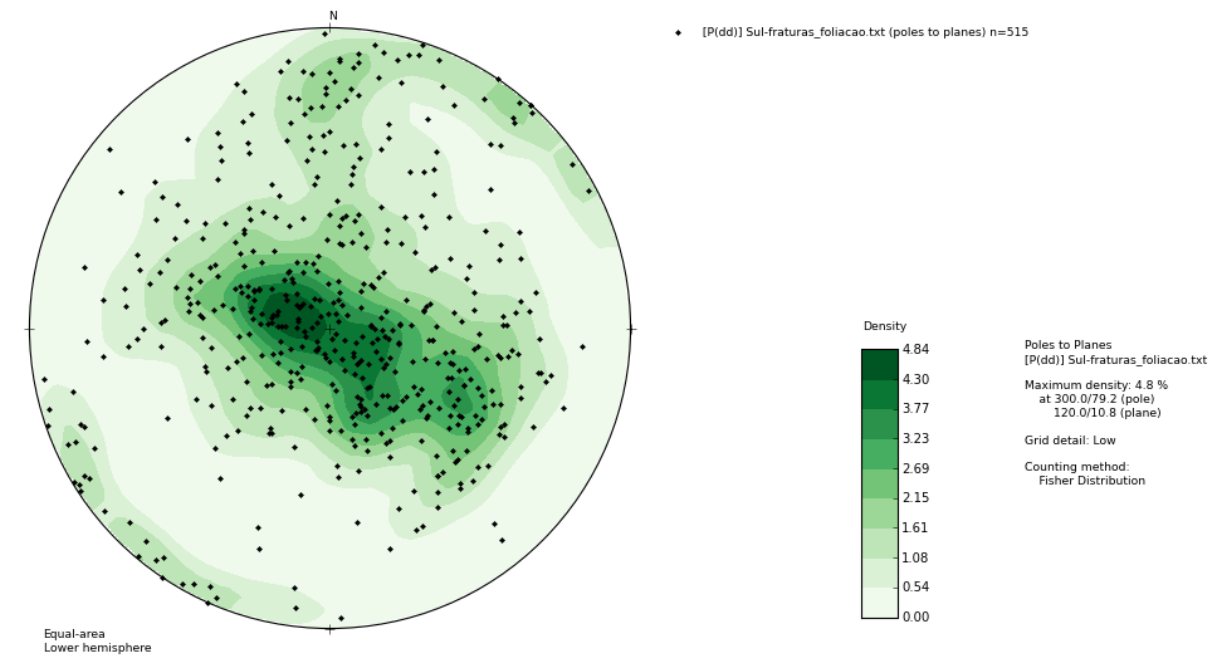


Figura 38: estereograma das descontinuidades no trecho sul.

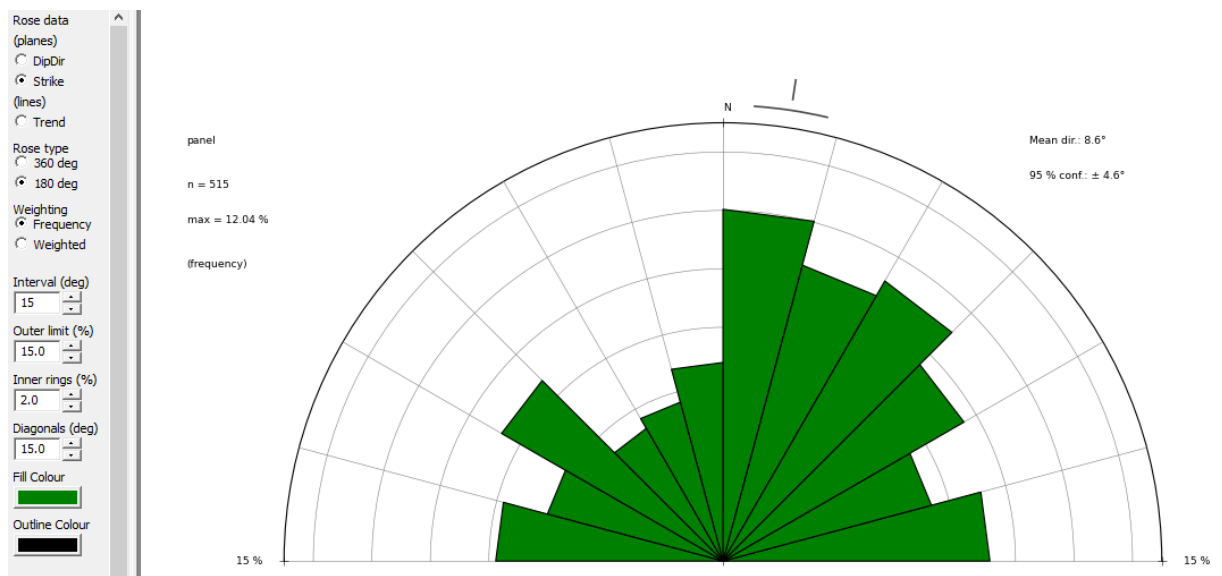
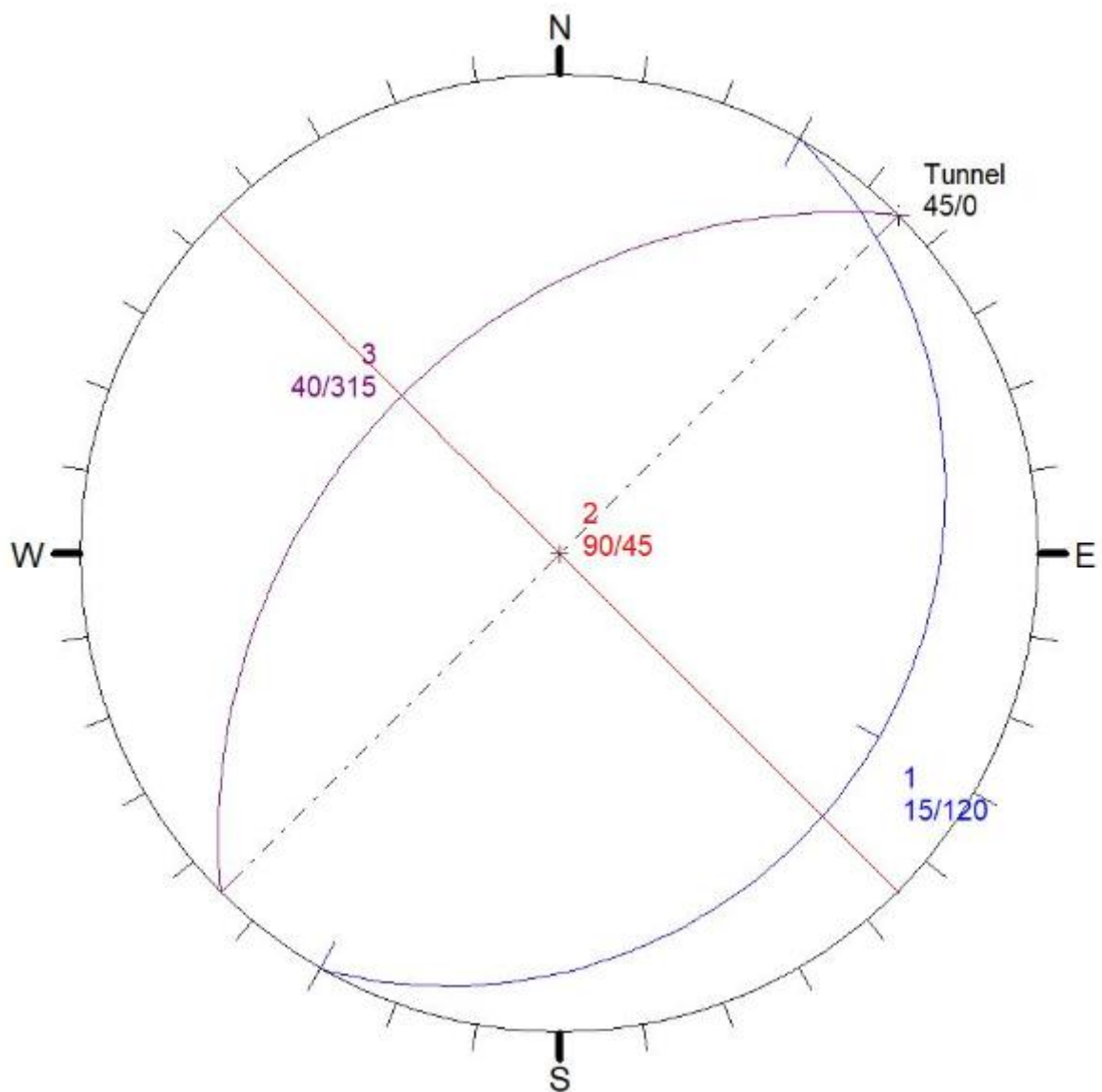


Figura 39: diagrama de roseta das descontinuidades do trecho sul.

A partir das figuras e diagramas acima descritos, pôde-se identificar três principais famílias de descontinuidades:

- NE-SW, composta tanto por fraturas como por foliação e veios, de direção aproximada  $030^\circ$  e mergulho em torno de  $07^\circ$  (**Família 1: N030°E/15°SE**);
- E-W, composta principalmente por fraturas, de direção  $90^\circ$  e mergulho em torno de  $15^\circ$  (**Família 2: N45°W/90°**), e;
- NE-SW, composta por veios, foliação e fraturas (**Família 3: N45°E/40°NW**).

Fazendo uso do *Software Unwedge*, foram representados graficamente os principais blocos que são formados quando há interseção das principais famílias de discontinuidades com a arquitetura e direção do túnel. A **Figura 40** apresenta a representação em estereograma das principais famílias de discontinuidades e a direção do túnel no trecho sul.

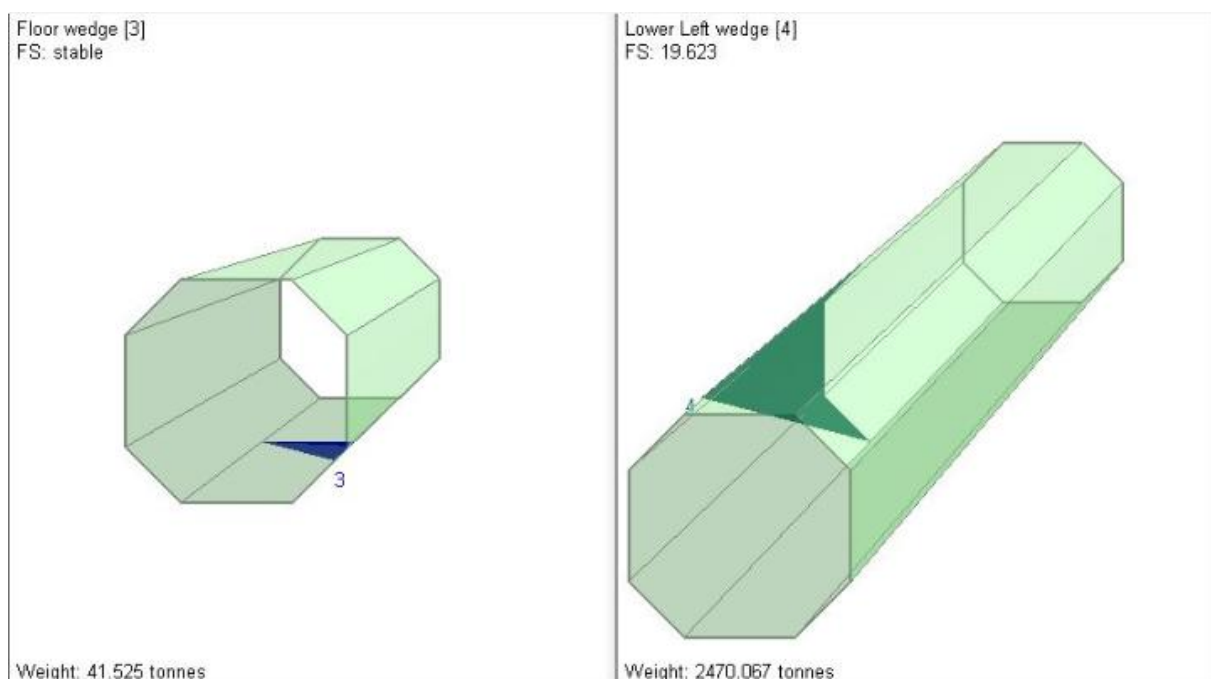


**Figura 40:** estereograma da direção do túnel e a atitude das 3 principais famílias de discontinuidades do trecho sul.

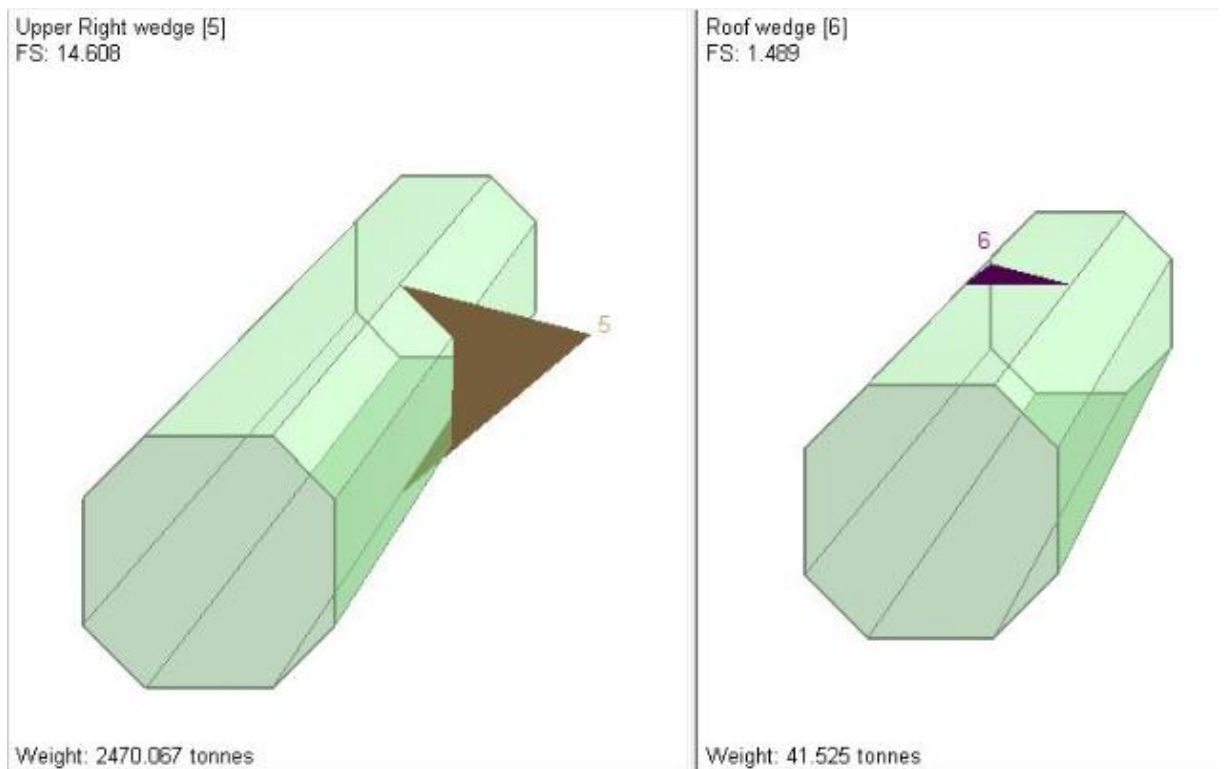
Para o cálculo dos blocos formados, foi levada em consideração a classificação geomecânica adaptada de Bieniawski (1989) e representada no **Perfil 2**, assim como as propriedades geomecânicas das discontinuidades baseadas no trabalho do mesmo autor, como ângulo de atrito e coesão, estimados de acordo com os dados do **Quadro 7**.

Vale mencionar que, para esta representação gráfica, os valores de coesão e ângulo de atrito utilizados para o cálculo dos blocos formados foram os da pior classificação geomecânica do trecho que contém rocha, simulando o pior cenário possível para a análise de estabilidade dos blocos. No caso do trecho sul, a pior classificação geomecânica entre as cotas 800 metros e 780 metros foi a do testemunho de sondagem SR-633, classificado como Classe III - Regular. Para esta classificação, portanto, o valor do ângulo de atrito considerado foi de  $30^\circ$  e valor de coesão do maciço considerado foi de 250 kPa.

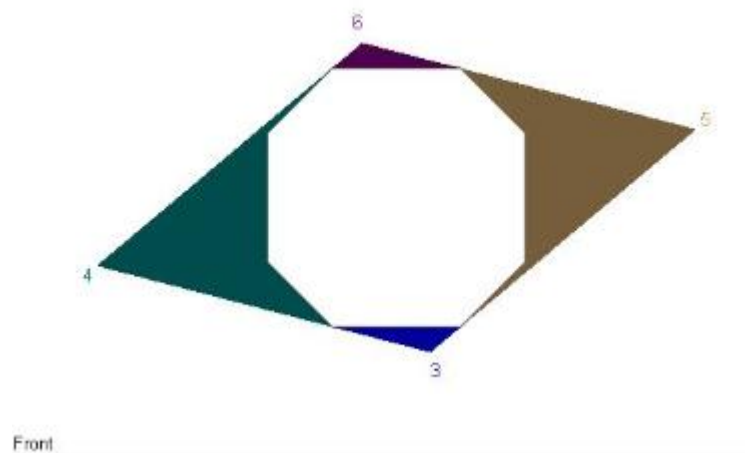
As **Figuras 41 a 44** a seguir mostram o comportamento dos blocos em relação a geometria do túnel, inclusive o fator de segurança e o peso do bloco formado (considerando uma densidade da rocha igual a  $2,7 \text{ g/cm}^3$ ).



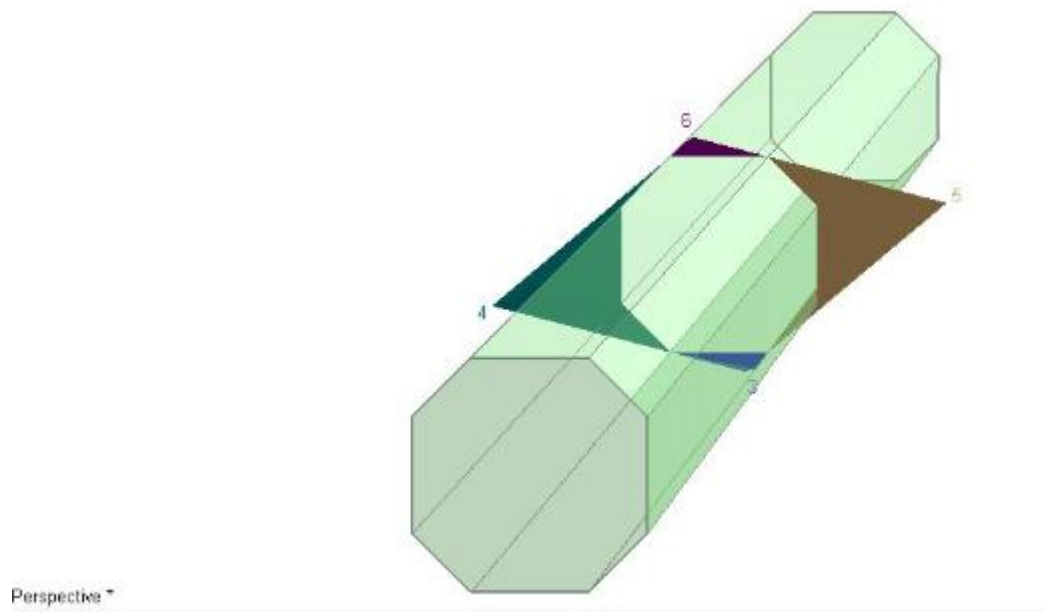
**Figura 41:** representação gráfica dos blocos rochosos formados no túnel do trecho sul. A imagem a esquerda representa o bloco estável formado no piso do túnel de escavação. A imagem a direita representa o bloco com fator de segurança 19,6 formado na parede esquerda da escavação.



**Figura 42:** representação gráfica dos blocos formados no túnel do trecho sul. A imagem a esquerda representa o bloco com fator de segurança 14,6 formado na parede direita do túnel de escavação. A imagem a direita representa o bloco com fator de segurança 1,49 formado no teto do túnel de escavação.



**Figura 43:** representação gráfica dos blocos formados nas paredes, no teto e no piso do túnel de escavação do trecho sul vistos de frente.



**Figura 44:** representação gráfica dos blocos formados nas paredes, no teto e no piso do túnel de escavação do trecho sul vistos em perspectiva.

## 9. CONCLUSÕES

O televisionamento óptico de furos de sondagem é uma ferramenta muito útil na caracterização estrutural do maciço rochoso. Por meio deste método é possível fazer além da descrição das características litológicas, a descrição da abertura e preenchimento de fraturas que, pelo método convencional de descrição de testemunhos de sondagem, não é possível devido à remoção do material não rochoso pela água de circulação utilizada no processo de perfuração.. Outra vantagem é a caracterização da atitude das discontinuidades, permitindo a elaboração de um modelo estrutural a partir das sondagens. Estas vantagens facilitam a análise das condições geomecânicas do maciço nas etapas de viabilidade e projeto básico para as obras de túneis.

A partir dos resultados obtidos a partir da análise geomecânica dos trechos norte e sul, conclui-se que:

- No trecho norte podem ser vistos dois diferentes cenários nas três diferentes cotas analisadas para a classificação geomecânica. Nas cotas mais rasas (superiores a 750 metros), os blocos se comportam como **Classe V - Péssima**, pois estão em grande parte imersos na capa sedimentar, apresentando um ângulo de atrito menor do que  $15^\circ$  e uma coesão menor do que 100 kPa. No principal trecho em análise, compreendido entre as cotas 750 e 730 metros, a classificação geomecânica é **Classe I - Excelente** (com exceção do testemunho SM-620, classificado como 37 - **Classe IV - Ruim** - localizado mais a sul do trecho norte), sendo que o mesmo acontece a cotas inferiores a 730 metros, todos classificados como **Classe I - Excelente**, estimando-se um ângulo de atrito superior a  $45^\circ$  e uma coesão superior a 400 kPa;
- No trecho sul não é evidente um padrão de qualidade nos diferentes cenários analisados. Nos testemunhos de sondagem SR-510 e SM-512, há uma piora nas condições do maciço a medida que se aumenta a profundidade de análise (passando do intervalo entre as cotas 800-790 metros para 790-780 metros), enquanto que no testemunho SM-518 há uma grande melhora (de 0 passa a ser 85) e no testemunho SR-633 há uma manutenção na classificação nos mesmos intervalos de cotas (de 48 entre 800 e 790 metros para 50 entre 790 e 780 metros). Diferentemente do trecho norte, neste não há como estabelecer um padrão de ângulo de atrito e coesão para as diferentes profundidades de análise;

- No geral, há uma piora na qualidade do maciço rochoso a sul da área em estudo. Os testemunhos de sondagem SM-630, SM-622 e SM-621, localizados mais a norte apresentam uma classificação geomecânica excelente, enquanto que os testemunhos SM-620, SR-633, SM-518, SM-512 e SR-510 apresentam uma classificação geomecânica pior.

Já com os resultados obtidos a partir do modelo estrutural dos trechos da Linha 5 - Lilás do Metrô, conclui-se que:

- Para uma análise mais conservadora dos tipos de blocos que são formados nos trechos norte e sul, foi utilizada a pior classificação geomecânica (com base no trabalho de Bieniawski de 1989, adaptado) de cada trecho, atribuindo menores valores de coesão e ângulo de atrito dos blocos rochosos;
- No trecho norte, a pior classificação geomecânica do embasamento ocorreu no furo de sondagem SM-620, sendo classificado como um maciço Classe IV - Ruim. Para esta classificação, os valores de ângulo de atrito e coesão considerados foram 20° e 150 kPa respectivamente. Apesar da estimativa conservadora para a qualidade do maciço, os fatores de segurança calculados foram altos, sendo que o menor foi igual a 3,81 formado na parede esquerda do túnel de perfuração;
- No trecho sul, a pior classificação geomecânica do embasamento ocorreu no furo de sondagem SR-633, sendo classificado como Classe III - Regular. Para esta classificação, os valores de ângulo de atrito e coesão considerados foram 30° e 250 kPa respectivamente. Apesar da estimativa conservadora, os fatores de segurança calculados foram altos, sendo o menor igual a 1,49, formado no teto do túnel de perfuração;

Ressalta-se que estas análises constituem uma abordagem com vistas às fases de viabilidade e projeto básico.

Para o projeto executivo, principalmente quanto às análises de estabilidade, deverão ser utilizados parâmetros geomecânicos mais confiáveis, obtidos a partir de ensaios específicos de mecânica de rochas, como ensaios de resistência à compressão simples e de cisalhamento direto.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. D., Hasui, Y., Brito Neves, B. D., & Fuck, R. A. (1977). Províncias estruturais brasileiras. *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8(1977),p. 363-391.
- Almeida, F. D., & Hasui, Y. (1984). O embasamento da plataforma Sul Americana. *O Precambriano do Brasil*,p. 378.
- de Assis Janasi, V., & Ulbrich, H. H. (1991). Late Proterozoic granitoid magmatism in the state of São Paulo, southeastern Brazil. *Precambrian Research*, 51(1-4),p. 351-374.
- Baillot, R. T., Colas, R., Barton, N., Abrahão, R., & Júnior, A. R. (2004). Comparing 360 televising of drill hole walls with core logging. In *Proc. International Site Investigation Conf. Portugal*.
- Barton, N.; Choubey, V. (1997). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, vol. 10, nº 1, pp. 1-54.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: s Complete Manual*. New York: John Wiley and Sons, 251p.
- Bieniawski, Z. T. (1993). Principles and methodology of design for excavations in geologic media. *Research in Engineering Design*, 5(1), 49-58.
- Deere, D.U. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years*. U.S. Department of commerce - NTIS - National Technical Information Service, Springfield, 67p.
- Fiori, Alberto Pio; Carmignani, Luigi. (2009). *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações da estabilidade de taludes*. Ed. UFPR. Curitiba – 2ª Ed. 604 p.
- Goodman, R.E. & Shi, G.H., 1985. *Block Theory and its Application to Rock Engineering*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 338p.
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 562p.
- Grohmann C.H. & Campanha, G.A. da C. (2010). *OpenStereo: Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis*. Presented at the AGU 2010 Fall Meeting, American Geophysical Union (AGU), San Francisco (CA).
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., & Coimbra, A. M. (1975). The Ribeira folded belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(4),p. 257-266.



Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., & Bistrichi, C. A. (1978). Os granitos e granitóides da região de dobramentos sudeste nos Estados de São Paulo e Paraná. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 30, pp. 2594-2608). SBG.

Hasui, Y., Carneiro, C. D. R. (1980). Origem e evolução da bacia sedimentar de São Paulo. In: Mesa Redonda: aspectos geológicos e geotécnicos da Bacia Sedimentar de São Paulo. São Paulo, 1980. *Publicação Especial*. São Paulo, ABGE/SBG, p.47-52.

Hasui, Y. (1993). *Geologia Estrutural das Rochas na Linha 4 do Metrô—Avaliação e Síntese dos Conhecimentos*. Departamento de Projeto Civil—PCI. RT-4.00. 00.00/3C3-001. Relatório Interno da Companhia do Metropolitano de São Paulo—Metrô-SP. São Paulo, p. 27.

Hasui, Y. (2010). A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. *Geociências*, p. 141-169.

Hudson, J. A. (1969, January). Tensile strength and the ring test. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 6, No. 1, pp. 91-97). Pergamon.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1984). Estudos Geológico-Geotécnicos para Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos para Projetos de Engenharia (Túneis, Lavra a Céu Aberto e Barragens). São Paulo. (IPT - Relatório, 10342).

International Society of Rock Mechanics – ISRM. (1981). Rock characterization. Testing and monitoring. ISRM Suggested Methods. Ed. Brown, E. T. Commission on testing and monitoring. Pergamon Press.

Juliani, C. (1992). O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. *Seminário Problemas Geológicos e Geotécnicos na região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, ABAS/ABGE/SBG-SP, p. 3-20.

Juliani, C. (1993). *Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo), p. 803.

Juliani, C., & Beljavskis, P. (1995). Revisão da litoestratigrafia da faixa São Roque/Serra do Itaberaba-SP. *Revista do Instituto Geológico*, 16(1-2), p. 33-58.

Monteiro, M.D., Gurgueira, M.D & Rocha, H.C (2012). Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. *In: Twin Cities - Solos da Cidade de São Paulo e Curitiba*. ABMS, São Paulo, p. 15-44.

Monteiro, M. D. (2016). *Contribuição à caracterização hidrogeológica de maciços fraturados e solos residuais em projetos de obras subterrâneas na região metropolitana de São Paulo* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Oliveira, D. G. G., França, D. D., Monteiro, M. D., Massoni, F., Taioli, F., Lemos Filho, M. X., & Rocha, H. C. (2013). Evolução da proposta metodológica para execução e análise de televisionamento de sondagens: A especificação técnica do Metrô de São Paulo. *In Anais do 14 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro*.

de Oliveira, D. G. G. (2015). *Televisionamento óptico de sondagens—proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas* (Doctoral dissertation, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS).

Riccomini, C. (1989). *O rift continental do sudeste do Brasil* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Riccomini, C., & Coimbra, A. M. (1992). Geologia da bacia sedimentar. *Solos da cidade de São Paulo*.

Riccomini, C., Sant'Anna, L. G., & Ferrari, A. L. (2004). Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 383-405.

Rocscience Inc., 2004. *Unwedhe Software*. RocScience Inc. Toronto, Canada.

Schobbenhaus, C., & Campos, D. D. A. (1984). Geologia do Brasil. *In Geologia do Brasil*. DNPM.

Williams, J. H., & Johnson, C. D. (2004). Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, 55(1), p. 151-159.

# ANEXO I - Figuras de localização da área em estudo

# Figura 1:

Localização da área em estudo

(Fonte: Google Maps)

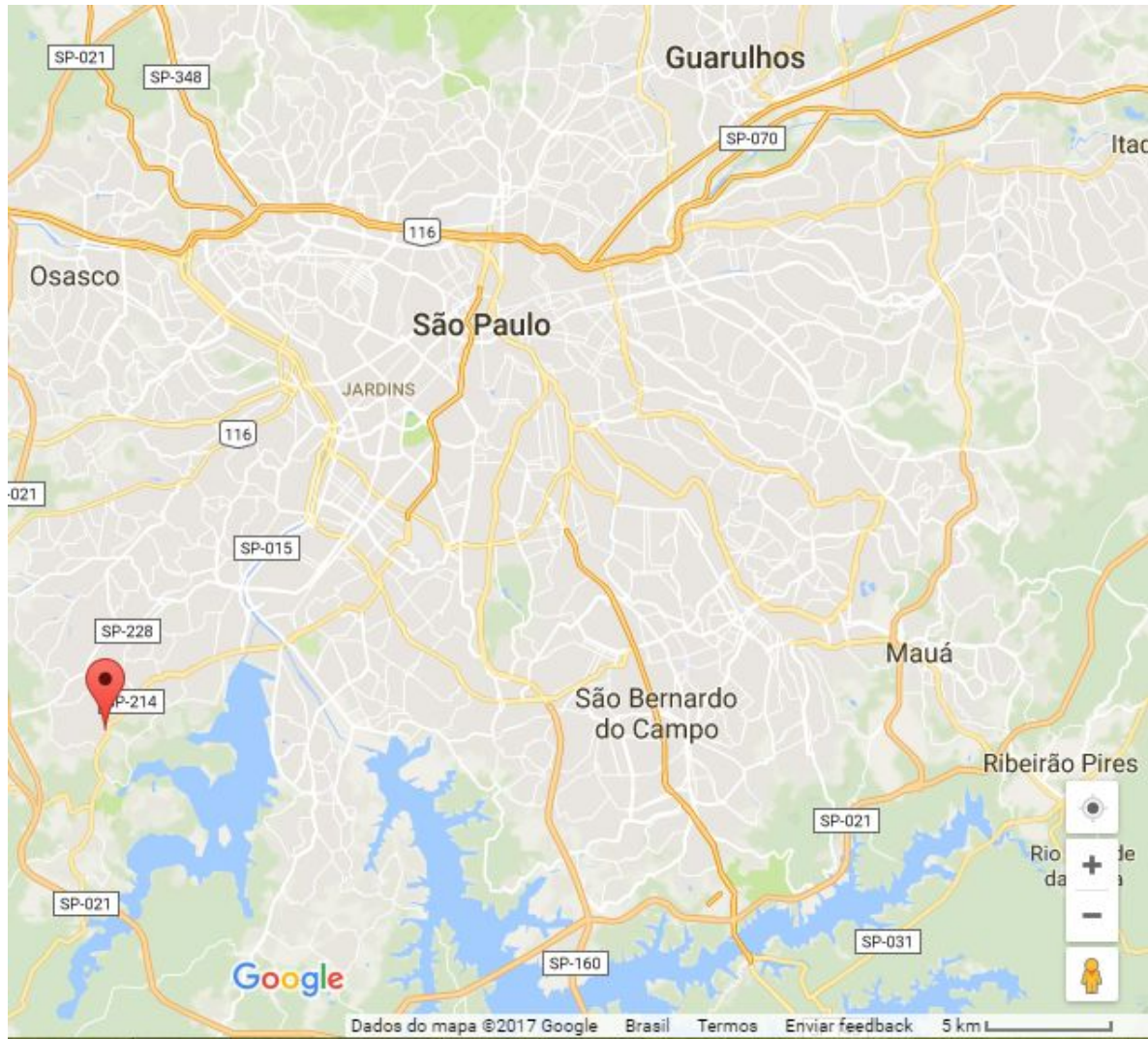




Figura 2:

Subdivisão da  
área em Trecho  
Norte e Trecho Sul

(Fonte: Google Earth)





# Figura 3:

Trecho Norte  
com perfil A-A'.

(Fonte: Google Earth)

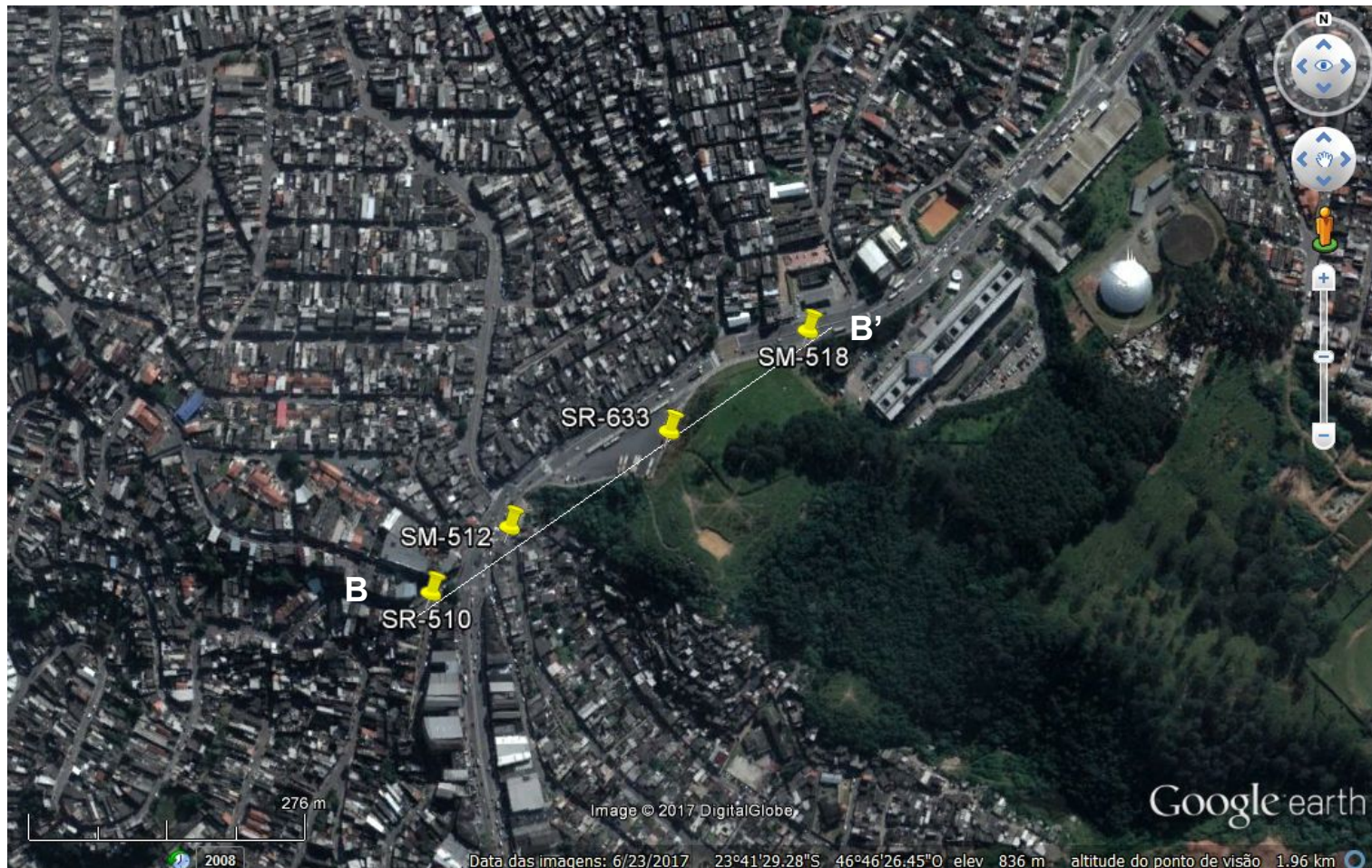




Figura 4:

Trecho Sul com perfil B-B'.

(Fonte: Google Earth)

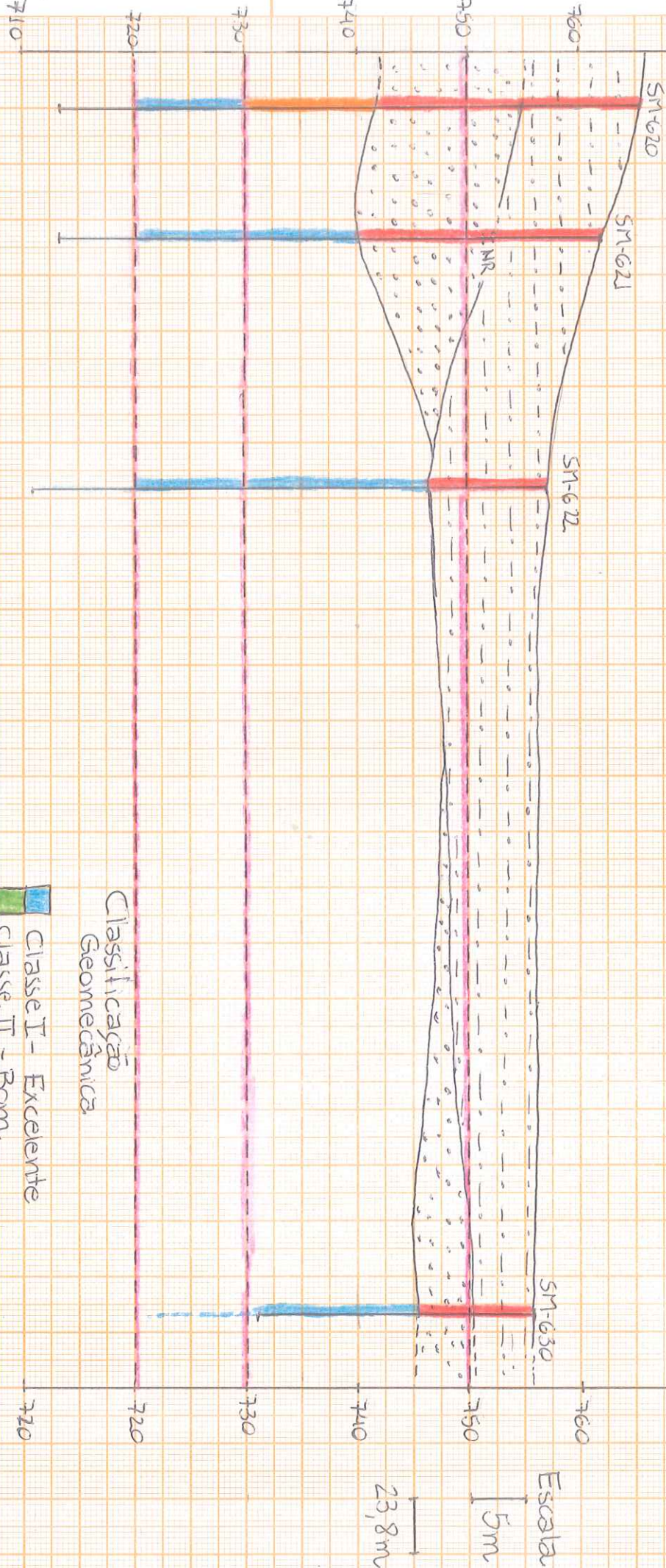


# ANEXO II - Perfis geológico-geotécnicos



A cotam 5  
770

N cotam  
770



- Legenda
- Silte argiloso, mole a moderadamente compactado
  - Areia silteosa, média, muito compactada
  - Brita gnaíse granodiorítica

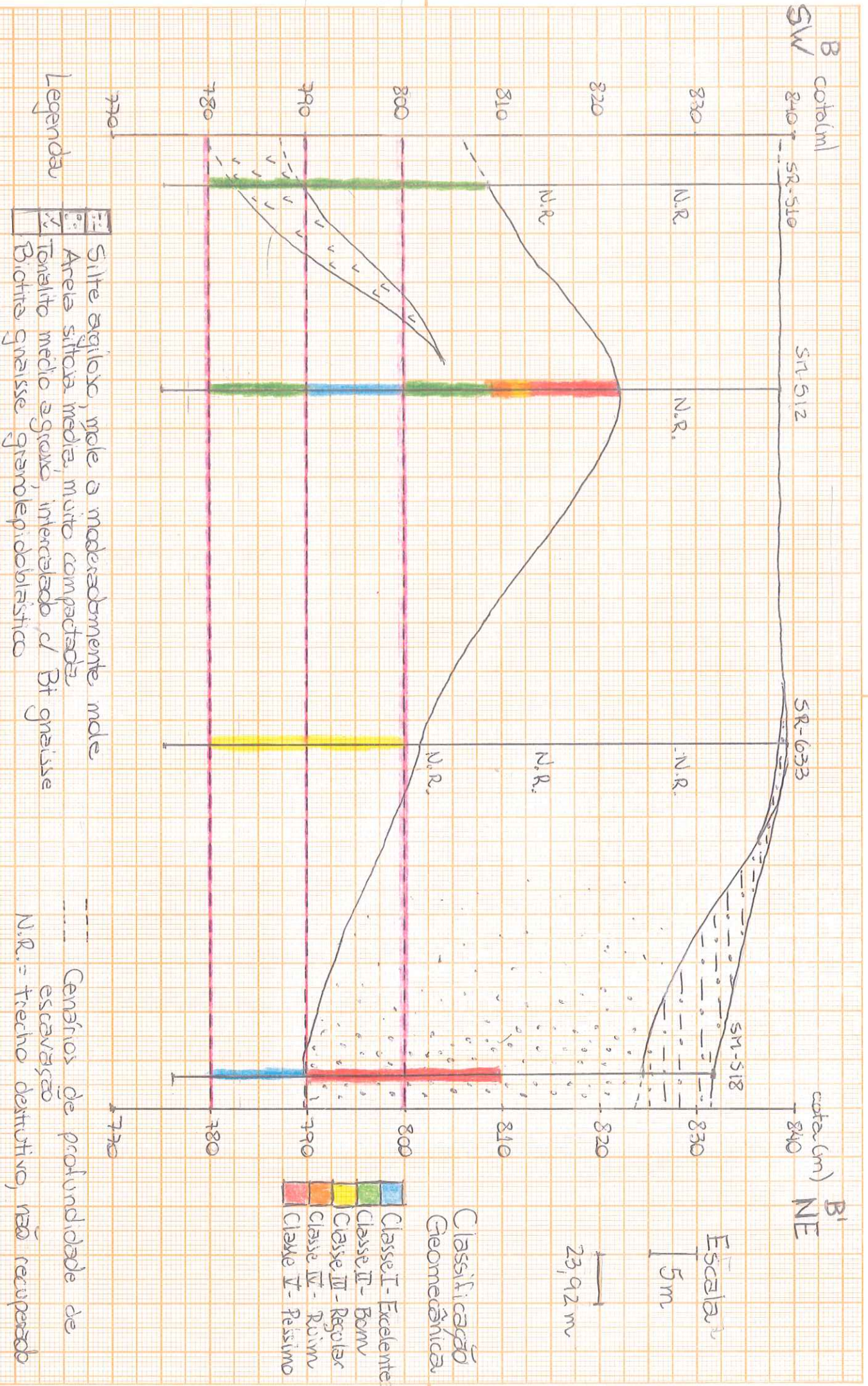
- Classificação Geomecânica
- Classe I - Excelente
  - Classe II - Bom
  - Classe III - Regular
  - Classe IV - Ruim
  - Classe V - Pésimo

Cenários de profundidade de escavação  
 NR. = trecho destrutivo, não recuperado

# Perfil I: Trecho Norte

Projeto: Classificação Geomecânica e Modelo Estrutural de um trecho da Linha 5 - Lilás / SP





Projeto: Classificação Geomecânica e Modelo Estrutural de um trecho da linha 5 - Lilas / SP