



**CONTRIBUIÇÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO TRECHO QUE  
COMPREENDE A LINHA DOIS DO METRÔ DE PORTO ALEGRE E ESTIMATIVA  
DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS LITOLOGIAS.**

Porto Alegre, 2016

**LUIS FELIPE RADAELLI**

**CONTRIBUIÇÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO TRECHO QUE  
COMPREENDE A LINHA DOIS DO METRÔ DE PORTO ALEGRE E ESTIMATIVA  
DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS LITOLOGIAS.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Professor Dr. Ruy Paulo Philipp

Supervisor: Rogério Dutra Soares

Porto Alegre, 2016

## CIP - Catalogação na Publicação

Radaelli, Luis Felipe  
CONTRIBUIÇÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO  
TRECHO QUE COMPREENDE A LINHA DOIS DO METRÔ DE PORTO  
ALEGRE E ESTIMATIVA DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS  
LITOLOGIAS / Luis Felipe Radaelli. -- 2016.  
82 f.

Orientador: Ruy Paulo Philipp.  
Coorientador: Rogério Dutra Soares.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre, BR-  
RS, 2016.

1. Classificação Geomecânica. 2. Batólito Pelotas.  
3. Geologia de Engenharia. 4. Linha Dois do Metrô. 5.  
Porto Alegre. I. Philipp, Ruy Paulo, orient. II.  
Soares, Rogério Dutra, coorient. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “CONTRIBUIÇÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO TRECHO QUE COMPREENDE A LINHA DOIS DO METRÔ DE PORTO ALEGRE E ESTIMATIVA DA ABRASIVIDADE CERCHAR DAS LITOLOGIAS”, elaborado por “Luis Felipe Radaelli”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Dr. Luis A. Bressani

---

Dra. Carla Cristine Porcher

---

Dr. Norberto Dani

## AGRADECIMENTOS

Com a conclusão do curso de Graduação em Geologia vem à lembrança de todos os acontecimentos e convivências que vivi ao longo desses cinco anos.

Se hoje chego onde estou é graças à educação, amor e apoio que meus pais Luiz e Marilene e meu irmão Eduardo me deram durante toda a vida e continuam dando até hoje, estando fielmente ao meu lado. É a eles que devo o meu mais importante muito obrigado.

Os meus amigos da vida e os que fiz durante minha trajetória dentro da UFRGS merecem também meu obrigado. Pelo apoio e companheirismo, sempre estando prontos tanto para estender a mão quando necessário e me ajudar nessa caminhada como também para os momentos de diversão e alegria.

Agradeço a todos os professores do Instituto de Geociências da UFRGS pelos ensinamentos ministrados, mas um agradecimento em especial aos que nunca se limitaram a ensinamentos para a vida acadêmica e enxergam que é preciso preparar os alunos para as situações que enfrentarão quando no mercado de trabalho.

Um agradecimento especial a todos os funcionários do Departamento de Geologia da Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC com os quais pude conviver durante um ano e meio de estágio. Todos sempre muito prestativos e gentis me possibilitaram não só aplicar os conhecimentos adquiridos na universidade como também adquirir muitos outros. Aos pesquisadores Rogério e Fiorentini e aos laboratoristas Andrade e Vladimir pelo apoio que me deram na realização do presente trabalho.

Aos professores Clovis Gonzatti e Ruy Paulo Philipp, também meu orientador, profissionais de atitudes nobres que são, dedicados e empenhados em transmitir seus conhecimentos adiante.

## RESUMO

Este projeto tem como linha temática a Geologia de Engenharia e seu principal objetivo foi fazer uma contribuição à classificação geomecânica para as diferentes litologias que compõem o trecho em que será construída a Linha Dois do Metrô da cidade de Porto Alegre (MetrôPoa). Ao longo do trecho ocorrem três unidades litoestratigráficas distintas: os granitos Independência e Viamão e os Gnaisses Porto Alegre, as quais pertencem ao Batólito Pelotas. Essas litologias foram caracterizadas através da descrição de testemunhos de sondagem (alteração, coerência e descontinuidades) e caracterização mineralógica através de análise petrográfica macroscópica. Realizou-se ensaios de determinação dos índices físicos (absorção da água, densidade real e aparente e porosidade) e de velocidade sônica, ensaios para verificar a resistência mecânica da rocha (carga pontual) que permitiram estimar a resistência a compressão uniaxial e ensaios para determinar a abrasividade das litologias (CERCHAR). Os dados da caracterização foram compilados e utilizados para classificar o maciço rochoso através dos sistemas de classificação RQD e sistema RMR de Bieniawski. Com os resultados obtidos se construiu seções geotécnicas nas quais foram indicadas as características geológicas e as classes geomecânicas. Com os índices de abrasividade CERCHAR se estimou consumo de ferramenta e vida útil de disco de corte. Por fim se comparou os resultados obtidos em menor escala de trabalho, em que predominam maciços rochosos de classe II, III e IV na classificação de Bieniawski, com dados os pré-existentes e se identificou concordâncias entre esses.

**Palavras-Chave:** Classificação geomecânica, Batólito Pelotas, Geologia de engenharia, Linha Dois do Metrô, Porto Alegre.

## ABSTRACT

The theme of this project is Engineering Geology and its main objective is to contribute to the geomechanical classification of the different lithologies found in the segment where the line two of the Porto Alegre Subway will be built. There are three different lithologies in the area, which belong to Pelotas Batholith. These lithologies were characterized through drill-cores descriptions (alteration, coherence and discontinuities) and its mineralogical characterization through macroscopic petrographic analysis. Tests were performed for the determination of physical indexes (water absorption, real and apparent density and porosity) and ultrasonic pulse velocity, to verify the mechanical resistance (point load test), which allows estimating the uniaxial compression, and to determine the abrasiveness of the lithologies (CERCHAR). The acquired data were compiled and used to classify the rock masses through the RQD classification and RMR system of Bieniawski. With the results, geotechnical sections with the geological characteristics and geomechanical classes were built. Furthermore, the tool consumption and the cutting disk life were esteemed through the determination of abrasiveness CERCHAR. As a final conclusion, the results obtained for the rock masses predominantly in classes II, III and IV of Bieniawski classification were compared with prior results and concordances have been identified.

**Keywords:** Geomechanical classification, Pelotas Batholith, Engineering geology, Line II of Metro, Porto Alegre

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Cidade de Porto Alegre. ....	3
Figura 2 - Contexto geológico do Batólito Pelotas. (Philipp et al., 2007) .....	4
Figura 3 - Mapa geológico da cidade de Porto Alegre com área de estudo marcada em tracejado (Mod. de Schneider <i>et al.</i> , 1974; Philipp <i>et al.</i> , 2002) .....	6
Figura 4 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	7
Figura 5 - Perfis de Rugosidade (Barton et al. 1974 retirado de Serra Junior & Ojima, 1998). .....	11
Figura 6 - Relação entre expansão da escavação e tempo de auto-sustentação (modificado de Bieniawski, 1989).....	16
Figura 7 – Mapa de localização dos furos de sondagem selecionados para o trabalho (modificado a partir do software Google Earth). .....	18
Figura 8 - Relação entre vida útil de disco de corte, compressão uniaxial e índice de abrasividade CERCHAR (Maidl et al. 2001).....	25
Figura 9 – Localização dos furos de sondagem estudados em mapa geológico da cidade de Porto Alegre (modificado de Philipp <i>et al.</i> , 2002).....	27
Figura 10 – Seção Geológica primeiro subtrecho, furos SM 04, 05, 06 e 07. ....	29
Figura 11 - Seção Geológica segundo subtrecho, furos SM 34, 35, 36 e 37. ....	30
Figura 12 - Seção Geológica terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67. ....	31
Figura 13 – Perfil Geotécnico SM 05 (Granito Independência) .....	33
Figura 14 – Perfil Geotécnico SM 06 (Granito Independência) .....	34
Figura 15 – Perfil Geotécnico SM 35 (Granito Independência) .....	35
Figura 16 – Perfil Geotécnico SM 36 (Granito Independência) .....	36
Figura 17 – Perfil Geotécnico SM 66 (Gnaiss Granodiorítico).....	37
Figura 18 – Perfil Geotécnico SM 67 (Granito Independência, Gnaiss Granodiorítico).....	38
Figura 19 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no primeiro subtrecho, furos SM 04, 05, 06 e 07.....	43
Figura 20 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no segundo subtrecho, furos SM 34, 35, 36 e 37.....	44
Figura 21 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67. ....	45

Figura 22 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RMR aplicado no primeiro subtrecho, furos SM 04, 05, 06 e 07.....	49
Figura 23 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RMR aplicado no segundo subtrecho, furos SM 34, 35, 36 e 37.....	50
Figura 24 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67. ....	51
Figura 25 – Estimativa do tempo de autossustentação para um túnel de 6 metros de diâmetro (modificado de Bieniawski, 1989).....	52
Figura 26 – Resultados para os três subtrechos analisados da relação de vida útil de disco de corte, resistência a compressão uniaxial e índice de abrasividade CERCHAR (Maidl et al. 2001). ....	54

## LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem e seleção de amostras para ensaios mecânicos e tecnológico .....	19
Imagem 2 – Diferentes etapas do ensaio de determinação de índices físicos .....	20
Imagem 3 – Realização do ensaio com equipamento de Ultrassom.....	21
Imagem 4 - Prensa hidráulica utilizada para realizar o ensaio. Em detalhe corpo de prova sendo submetido a tensão. ....	22
Imagem 5 – Corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de carga pontual. 23	
Imagem 6 – Ponteiras utilizadas e amostra sendo ensaiada. ....	24

**LISTA DE TABELAS E QUADROS**

Tabela 1 - Grau de Alteração (IPT, 1984) .....	9
Tabela 2 - Grau de Coerência (Guidicini et al., 1972) .....	9
Tabela 3 - Classificação de persistência (ISRM, 1978).....	10
Tabela 4 - Classificação de abertura de descontinuidades (ISRM, 1978).....	12
Tabela 5 - Classificação de espaçamento (ISRM, 1978) .....	12
Tabela 6 - RQD (Deere et al., 1967) .....	14
Tabela 7 - Critérios para avaliação do RMR (modificado de Bieniawski, 1989). .....	15
Tabela 8 - Classe do Maciço Rochoso determinada pela soma total dos pesos (modificado de Bieniawski, 1989).....	15
Tabela 9 - Significado das Classes (modificado de Bieniawski, 1989).....	16
Tabela 10 – Compilação dos valores médios e desvio padrão (DP) do resultado dos ensaios físicos, mecânicos e tecnológicos realizados com os furos de sondagem selecionados. ....	40
Tabela 11 – Valores de Resistência à Compressão Uniaxial para os furos de sondagem selecionados.....	40
Tabela 12 – Resumo das características geomecânicas de cada subtrechos estudado.....	55
Quadro 1 – Sistema de suporte e escavação para túneis com vão de 10 m (modificado de Bieniawski, 1989). ....	52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. JUSTIFICATIVA .....	1
1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	1
1.3. PREMISSAS .....	1
1.4. HIPÓTESE .....	2
1.5. OBJETIVOS E METAS .....	2
<b>2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	2
<b>3. CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	3
3.1. BATÓLITO PELOTAS .....	3
3.2. GEOLOGIA DE PORTO ALEGRE .....	5
<b>4. METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO</b> .....	7
<b>5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
5.1. CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	8
5.1.1. LITOLOGIA .....	8
5.1.2. ALTERAÇÃO .....	8
5.1.3. COERÊNCIA .....	9
5.1.4. DESCONTINUIDADES .....	10
5.2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	13
5.2.1. ROCK QUALITY DESIGNATION – RQD .....	13
5.2.2. CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSKY – SISTEMA RMR .....	14
<b>6. ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E TECNOLÓGICOS</b> .....	17
6.1. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO .....	17
6.2. ÍNDICES FÍSICOS .....	19
6.3. VELOCIDADE SÔNICA .....	20
6.4. CARGA PONTUAL .....	22
6.5. ABRASIVIDADE CERCHAR .....	24
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	25
7.1. PERFIS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS DE ESTUDO .....	26
7.2. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DOS TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO .....	32
7.3. ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E TECNOLÓGICOS .....	39
7.4. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS .....	41

7.4.1. <i>ROCK QUALITY DESIGNATION</i> – Sistema RQD .....	42
7.4.2. <i>Rock Mass Rating</i> – Sistema RMR .....	46
7.5. ABRASIVIDADE CERCHAR .....	53
<b>8. CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A – ÍNDICES FÍSICOS, RESULTADOS DETALHADOS</b> .....	<b>58</b>
<b>APÊNDICE B – VELOCIDADE SÔNICA, RESULTADOS DETALHADOS</b> .....	<b>61</b>
<b>APÊNDICE C – CARGA PONTUAL, RESULTADOS DETALHADOS</b> .....	<b>64</b>
<b>APÊNDICE D – ABRASIVIDADE CERCHAR, RESULTADOS DETALHADOS</b> .....	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Geologia de Engenharia é a ciência dedicada à investigação, estudo e solução dos problemas de engenharia e meio ambiente decorrentes da interação entre as obras e atividades do homem e o meio físico geológico, assim como ao prognóstico e ao desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de riscos geológicos.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Além de participar da fase de pesquisa do projeto da construção de um túnel, as investigações geológico-geotécnicas são necessárias com o intuito de se verificar o comportamento das rochas que podem vir a comprometer a estrutura da obra de engenharia, bem como para se realizar a correta manutenção preventiva dos túneis que irão compor a Linha 2 do Metrô de Porto Alegre. Faz-se necessário o estudo no local para trazer informações geomecânicas detalhadas, além das existentes em grande escala, para a correta avaliação do maciço rochoso.

### 1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A cidade de Porto Alegre está em fase de avaliação e elaboração do projeto que visa à construção do Metrô. A obra beneficiará a capital e a região metropolitana do Estado do Rio Grande do Sul.

No trecho que compreende a Linha 2 do Metrô de Porto Alegre há a ocorrência de pelo menos três litologias diferentes, das quais conhece-se muito superficialmente as características geomecânicas, necessitando estudos para detalhar e diminuir a extrapolação de dados no momento de se realizar a classificação desses maciços rochosos. Os estudos serão feitos através da descrição dos furos de sondagem e de ensaios físicos e mecânicos para a caracterização de maciços rochosos.

### 1.3. PREMISSAS

- (1) A área de estudo é composta por diferentes litologias e
- (2) As diferentes litologias possuem diferentes características geomecânicas.

#### 1.4. HIPÓTESE

Após a realização dos estudos espera-se detalhar a ocorrência das classes geomecânicas existentes ao longo do trecho, uma vez que os estudos existentes na área são limitados, não avaliam todo o trecho e por muitas vezes são extrapolados por longas distâncias. Por isso, nos trechos classificados ao longo deste trabalho e em áreas ligeiramente adjacentes, será possível estimar de forma mais precisa as condições de escavação. As classes geomecânicas encontradas ao final deste trabalho serão discutidas entre elas, vide que será realizada a classificação geomecânica por dois diferentes métodos, e com os resultados já existentes na Proposta de Manifestação de Interesse – Metrô de Porto Alegre.

#### 1.5. OBJETIVOS E METAS

O objetivo geral do trabalho é detalhar a Classificação Geomecânica de alguns dos trechos que compreende a construção da Linha 2 do Metrô de Porto Alegre.

Os objetivos específicos incluem:

- (1) Caracterização física e mecânica das litologias
- (2) Classificação Petrográfica Macroscópica
- (3) Determinação da abrasividade das litologias
- (4) Construção de Seções Geológicas
- (5) Construção de Seções Geomecânicas

## 2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Porto Alegre situa-se na região centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul, extremo sul do Brasil (Figura 1 - Localização da Cidade de Porto Alegre.Figura 1). É limitada a norte pela várzea do rio Gravataí, a sul e leste por morros e a oeste é margeada pelo lago Guaíba e está inserida na porção nordeste do Batólito Pelotas.

O trecho que compreende a Linha 2 do Metrô de Porto Alegre, no seu projeto preliminar prevê, na primeira fase, 14,88 km de extensão, que se estenderá do bairro Azenha, passando pelo Mercado Publico, Ramiro Barcelos, Terminal Triângulo até a FIERGS.

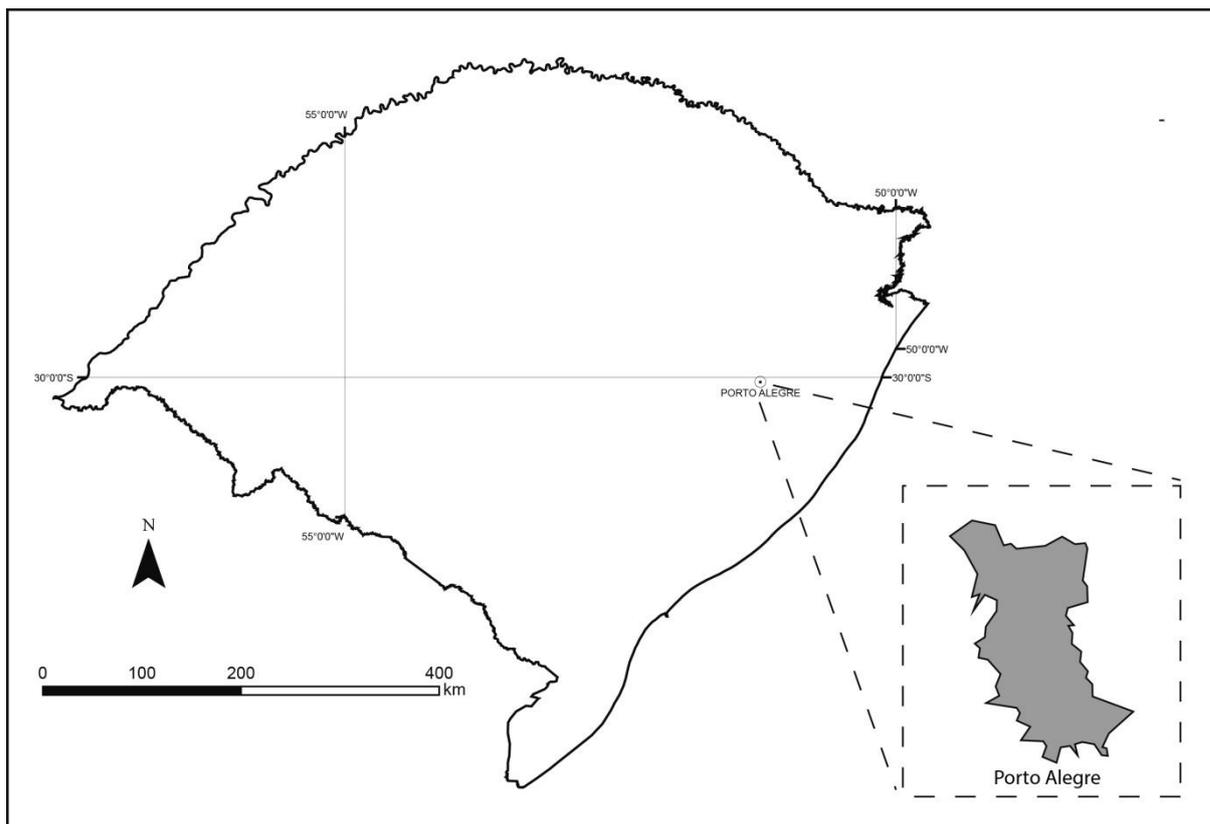


Figura 1 - Localização da Cidade de Porto Alegre.

### 3. CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 3.1. BATÓLITO PELOTAS

A geologia da cidade de Porto Alegre está inserida na porção nordeste do Batólito Pelotas (Figura 2). O batólito é um complexo plutônico composto de várias suítes, cujo magmatismo teve duração de cerca de 70 Ma (Philipp *et al.* 2002). Os granitoides da região de Porto Alegre podem ser subdivididos em três suítes principais: Viamão, Dom Feliciano e Itapuã (Oliveira *et al.* 2001), reconhecidas através de cinco unidades graníticas: granitos Viamão (Philipp *et al.* 1998), Independência, Canta Galo, Ponta Grossa e Santana (Schneider *et al.*, 1974). Entre os granitos ocorre uma exposição quase que continua de ortognaisses, definidos como Gnaiss Porto Alegre (Philipp *et al.*, 1998).

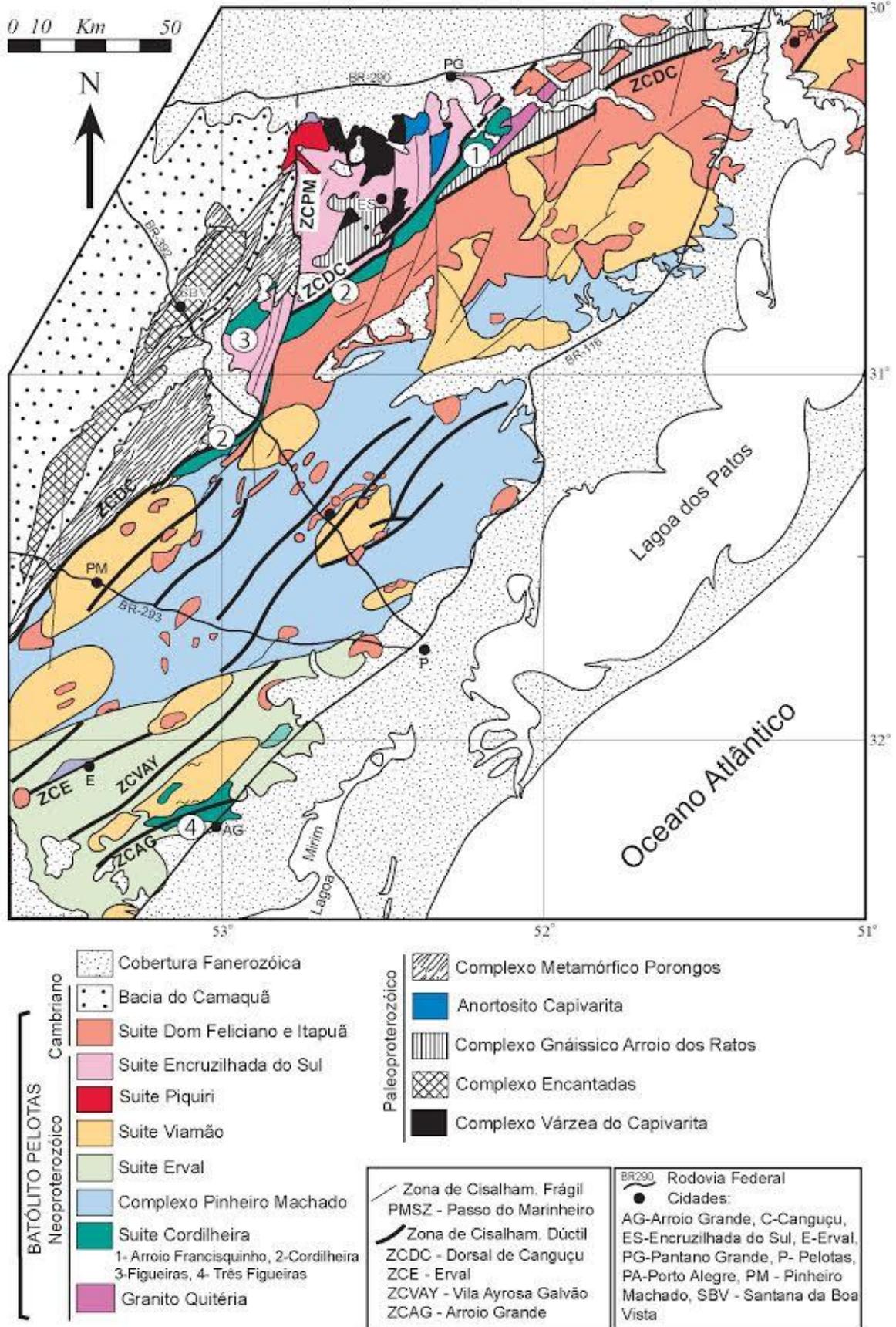


Figura 2 - Contexto geológico do Batólito Pelotas. (Philipp et al., 2007)

### 3.2. GEOLOGIA DE PORTO ALEGRE

O Gnaiss Porto Alegre é representado por gnaisses granodioríticos a monzograníticos e de forma subordinada gnaisses de composição diorítica. Encontram-se recobertos pela civilização, sedimentos Paleozóicos da Bacia do Paraná e da Bacia do Rio Gravataí. Possui cor cinza escura a preta e um bandamento fino pouco contínuo a contínuo, com boa regularidade, marcado pela alternância de bandas félsicas (2 – 15 mm) compostas por quartzo e feldspatos e bandas máficas (5 – 40 mm) compostas predominantemente por biotita. Nos Gnaisses de composição diorítica o máfico predominante passa a ser anfibólio e não biotita. Por vezes, em regiões muito deformadas, a espessura das bandas diminui e perdem a continuidade, resultando em um aspecto maciço, associado a um arranjo granoblástico muito fino (< 0.1 mm) e uma cor notadamente preta.

A unidade predominante é o granito Viamão, de cor cinzenta, composição monzogranítica e textura porfirítica a heterogranular, é constituído por cerca de 20% a 40% de megacristais tabulares, variando de 1 a 5 cm, de K-Feldspato, imersos em uma matriz inequigranular grossa com plagioclásio, quartzo, biotita e localmente anfibólio. Apresenta estrutura magmática definida pela orientação dimensional de K-feldspato e biotita. Xenólitos angulosos do Gnaiss Porto Alegre são encontrados dentro do Granito Viamão.

Predominante na área da escavação, o Granito Independência, de cor esbranquiçada, de composição sienogranítica a monzogranítica e textura equigranular média a grossa, é composto por plagioclásio, K-feldspato (ortoclásio e microclínio) e biotita. Possui comumente uma estrutura maciça, mas desenvolve foliação milonítica próximo ao contato com os Gnaisses Porto Alegre. Xenólitos angulosos do Gnaiss Porto Alegre são encontrados dentro do Granito Independência.

O Granito Canta Galo, de cor avermelhada a rosada, composição sienogranítica e textura equigranular a heterogranular média a grossa. Possui estrutura maciça.

O Granito Ponta Grossa, de cor rosada, composição sienogranítica, com textura equigranular. Possui estrutura maciça.

O mais jovem dos granitos é o Granito Santana apresenta textura equigranular grossa e comumente uma marcada orientação de cristais prismáticos

de K-feldspato e alongamento do quartzo. Associado ocorrem diques riolíticos, de espessura entre 5 e 20 m e extensões de centenas de metros. Apresentam estrutura isotrópica e textura porfírica, com cerca de 5 a 15% de quartzo e K-Feldspato imersos e uma matriz quartzo-feldspática afanítica.

A geologia da cidade de Porto Alegre pode ser conferida no mapa geológico abaixo (Figura 3).

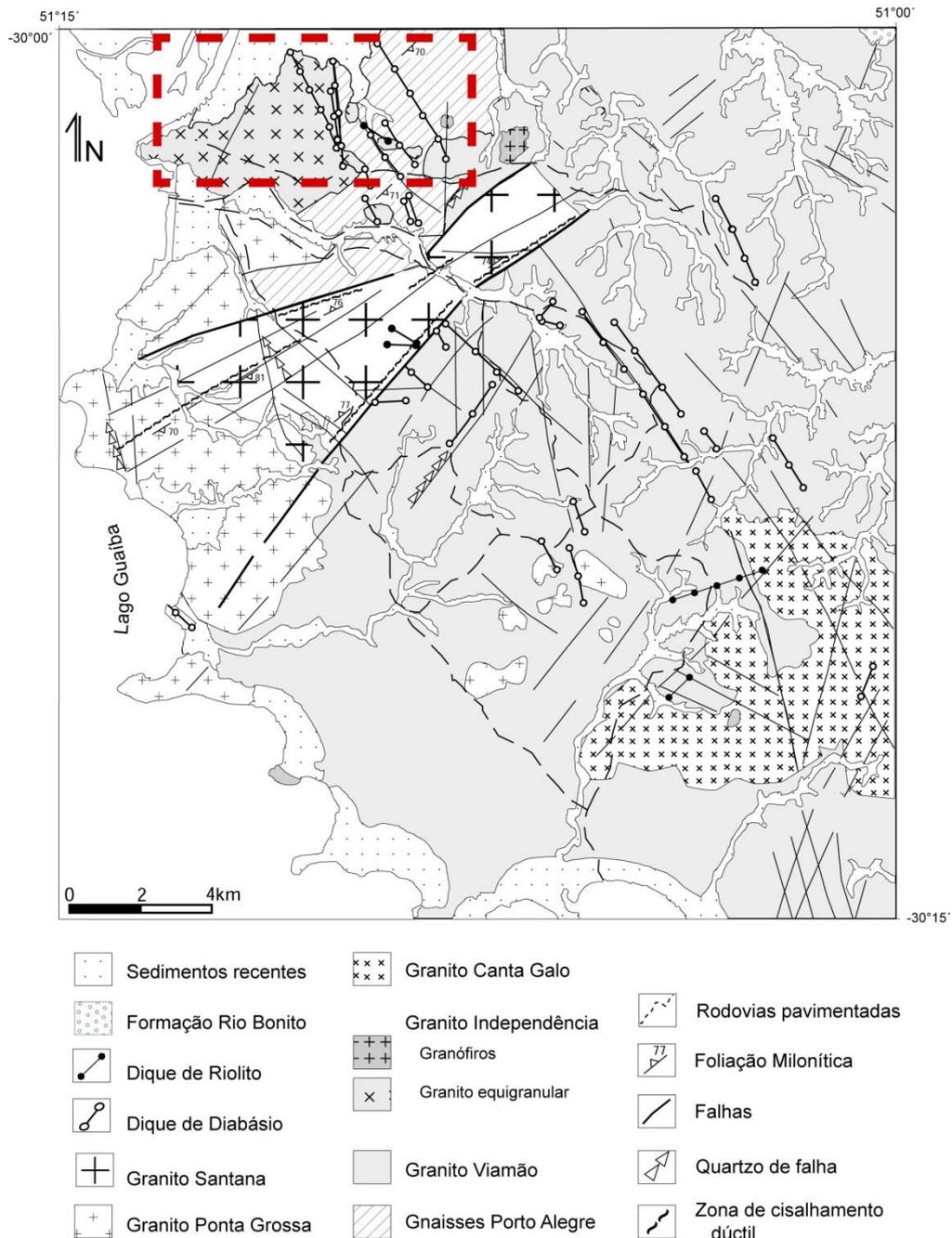


Figura 3 - Mapa geológico da cidade de Porto Alegre com área de estudo marcada em tracejado (Mod. de Schneider *et al.*, 1974; Philipp *et al.*, 2002)

#### 4. METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

A pesquisa será dividida em três etapas (Figura 4): revisão bibliográfica, etapa de laboratório e integração dos resultados.

- (1) A revisão bibliográfica será realizada durante todo o projeto e incluirá o levantamento bibliográfico atualizado a cerca da geologia da área de estudo e dos sistemas de classificação geomecânica a serem utilizados.
- (2) A etapa de laboratório servirá para a aquisição de dados através da descrição dos testemunhos de sondagem, ensaios físicos, mecânicos e tecnológicos com as litologias.
- (3) A etapa de integração dos resultados servirá para a elaboração de seções geológicas e geotécnicas com os resultados obtidos em laboratório.

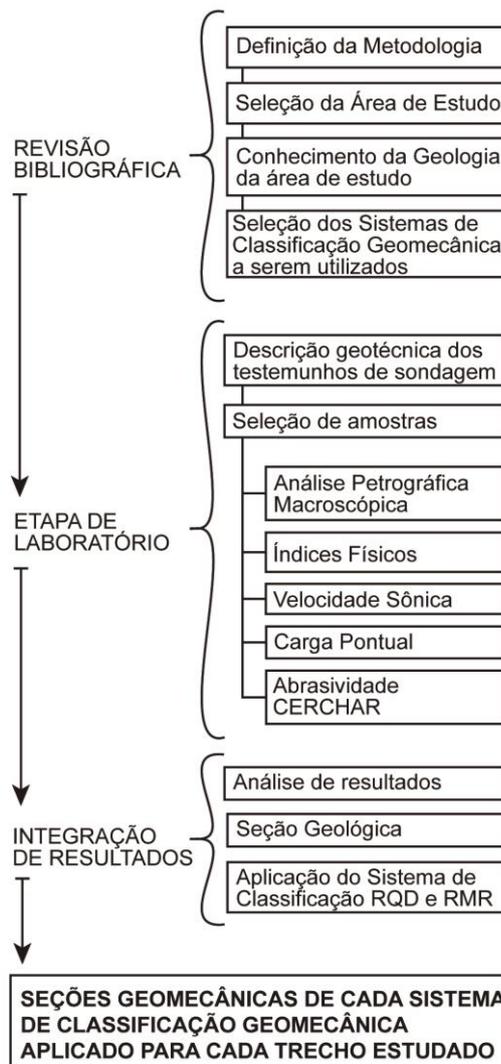


Figura 4 - Fluxograma das atividades desenvolvidas

## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa de revisão bibliográfica foi realizada durante todo o projeto visando tomar conhecimento a cerca de bibliográfica já existente sobre a área de estudo e o tema do projeto. Fez-se uso de livros, artigos, dissertações, normas técnicas e mapas geológicos.

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Um maciço rochoso é um conjunto de blocos justapostos, separados por descontinuidades. As suas características podem diferir de local para local, uma vez que são função da história geológica da região em que se encontram. Um mesmo maciço rochoso pode responder as solicitações impostas de diferentes maneiras. Por isso é necessário evidenciar os atributos do meio rochoso que isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento ante as solicitações impostas pela obra em questão (Serra Junior & Ojima, 1998).

As características que traduzem a qualidade dos maciços rochosos referem-se fundamentalmente à litologia, ao estado de alteração, à coerência e às descontinuidades.

#### 5.1.1. LITOLOGIA

A classificação petrográfica para uso na Engenharia, segundo Serra Junior & Ojima 1998, deve apoiar-se nos conceitos petrográficos de uso corrente na Geologia, sendo simplificada e objetiva, evitando-se nomenclaturas complexas, cujo emprego não proporcione resultados práticos. Havendo necessidade, realiza-se um maior detalhamento litológico. No caso deste trabalho será realizada apenas a descrição petrográfica macroscópica, uma vez que para o objetivo final não se faz necessária a descrição microscópica.

#### 5.1.2. ALTERAÇÃO

Alteração (Tabela 1 - Grau de Alteração (IPT, 1984)Tabela 1) é o conjunto de modificações físico-químicas a que as rochas encontram-se submetidas, e que conduz a degradação de suas características mecânicas (Serra Junior & Ojima, 1998). É feita tátil-visualmente, com base em variações do brilho e cor dos minerais da rocha, além da friabilidade.

Tabela 1 - Grau de Alteração (IPT, 1984)

SIGLA	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
A1	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso, a rocha é ligeiramente descolorida.
A2	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

### 5.1.3. COERÊNCIA

A coerência (Tabela 2) toma como base propriedades como tenacidade, dureza e friabilidade das rochas, é caracterizada tátil-visualmente, através da apreciação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (Guidicini et al., 1972).

Tabela 2 - Grau de Coerência (Guidicini et al., 1972)

SIGLA	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
C1	Rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lamina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	Rocha medianamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
C3	Rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfícies facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
C4	Rocha incoerente	Quebra com a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

Segundo Serra Junior e Ojima (1998) os parâmetros alteração e coerência permitem verificar a ação intempérica sobre o maciço rochoso e as possíveis alterações nas propriedades mecânicas da rocha, principalmente da resistência da rocha.

#### 5.1.4. DESCONTINUIDADES

Descontinuidades englobam qualquer feição geológica que interrompa a continuidade física do meio rochoso, como superfícies de foliação, acamamento, falhas, fraturas e contatos. As descontinuidades do maciço rochoso condicionam de maneira muito forte seu comportamento, uma vez que sem elas o maciço se comportaria como uma rocha intacta.

##### 5.1.4.1. ORIENTAÇÃO

É a atitude do plano da descontinuidade. É dada por sua direção e mergulho. A direção é o sentido do traço da descontinuidade e o mergulho é a inclinação do plano com a horizontal. Um conjunto de descontinuidades com a mesma orientação é considerada uma família. Num mesmo maciço rochoso pode-se encontrar um número ilimitado de famílias.

##### 5.1.4.2. PERSISTÊNCIA

A persistência (Tabela 3) refere-se a extensão em área de uma descontinuidade. Pode ser quantificada observando o traço da descontinuidade em uma superfície exposta. Pode terminar em outra descontinuidade ou no próximo maciço rochoso.

Tabela 3 - Classificação de persistência (ISRM, 1978)

PERSISTENCIA (m)	DESCRIÇÃO
< 1 m	Persistência muito baixa
1 – 3 m	Persistência baixa
3 – 10 m	Persistência média
10 – 20 m	Persistência alta
> 20 m	Persistência muito alta

#### 5.1.4.3. ALTERAÇÃO DAS PAREDES

A descrição da alteração das paredes é dada pelo grau de alteração e pela espessura que a alteração apresenta. Para quantificar faz-se uso do Martelo de Schmidt, cujos resultados podem se relacionar a resistência à compressão uniaxial.

#### 5.1.4.4. RUGOSIDADE

A rugosidade das discontinuidades corresponde às ondulações e sulcos nos planos. Segundo Serra Junior & Ojima (1998), a rugosidade influencia especialmente a resistência ao cisalhamento, sobretudo quando se trata de discontinuidades não-preenchidas, conferindo um incremento ao ângulo de atrito. É quantificada de acordo com sua geometria (Figura 5).

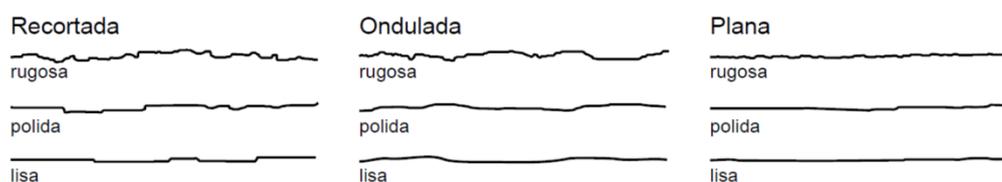


Figura 5 - Perfis de Rugosidade (Barton et al. 1974 retirado de Serra Junior & Ojima, 1998).

#### 5.1.4.5. ABERTURA

A abertura (Tabela 4) corresponde a distância perpendicular entre as paredes de uma discontinuidade. O espaço entre as paredes pode ser preenchido por água, ar ou outro material de preenchimento.

Tabela 4 - Classificação de abertura de descontinuidades (ISRM, 1978)

ABERTURA	DESCRIÇÃO	
< 0,1 mm	Totalmente selada	Fechadas
0,1 – 0,25 mm	Fechada	
0,25 – 0,5 mm	Parcialmente aberta	
0,5 – 2,5 mm	Aberta	Abertas
2,5 – 10 mm	Moderadamente aberta	
> 10 mm	Muito aberta	
1 – 10 cm	Muito larga	Afastadas
10 – 100 cm	Extremamente larga	
> 1 m	Caverna	

#### 5.1.4.6. PREENCHIMENTO

Usa-se o termo preenchimento para designar o material presente entre as paredes de uma descontinuidade. Deve-se analisar espessura e a origem do material que está preenchendo a descontinuidade.

#### 5.1.4.7. ESPAÇAMENTO

O espaçamento (Tabela 5) corresponde à distância entre descontinuidades de uma mesma família. Pode ser expresso por meio da adoção de intervalos de variação numérica.

Tabela 5 - Classificação de espaçamento (ISRM, 1978)

SIGLA	ESPAÇAMENTO (mm)	DESCRIÇÃO
E1	< 20	Espaçamento extremamente fechado
E2	20 – 60	Espaçamento muito fechado
E3	60 – 200	Espaçamento fechado
E4	200 – 600	Espaçamento moderado
E5	600 – 2000	Espaçamento aberto
E6	2000 – 6000	Espaçamento muito aberto
E7	> 6000	Espaçamento extremamente aberto

É comum a diminuição do espaçamento entre as descontinuidades a medida que se aproxima da superfície do terreno.

## 5.2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A Classificação de Maciços Rochosos busca prever o comportamento dos maciços rochosos em escavações, estimando o tempo de auto-sustentação da rocha, o tipo de suporte necessário e a geometria das seções de escavação. Baseia-se em determinadas características geológico-geotécnicas previamente selecionadas, através das quais se busca identificar e individualizar diferentes zonas dentro de um maciço rochoso. Cada zona definida caracteriza-se por um comportamento particular dos parâmetros classificatórios e é capaz de ser identificada no todo.

Ao se estabelecer diferentes classes, para diferentes comportamentos dos maciços rochosos, facilita-se a comparação de desempenho entre obras que utilizaram maciços rochosos semelhantes.

### 5.2.1. ROCK QUALITY DESIGNATION – RQD

Essa classificação foi introduzida por Deere et al. (1967) e é baseada somente no grau de fraturamento dos testemunhos de sondagem, cujo diâmetro mínimo deve ser de 54 mm e a sondagem realizada com barrilete duplo móvel.

Baseia-se na equação:

$$RQD = \left( \sum \frac{p}{n} \right) \times 100 \quad (1) \text{ onde,}$$

p = o comprimento dos fragmentos > 10 cm;

n = o comprimento da manobra de avanço da perfuração.

Estabelece cinco classes de maciços rochosos (Tabela 6).

Tabela 6 - RQD (Deere et al., 1967)

RQD (%)	Qualidade da Rocha
< 25	Muito Ruim
25 – 50	Ruim
50 – 75	Razoável
75 – 90	Boa
90 - 100	Excelente

Não há sugestão de sistema de suporte. A classificação é limitada, uma vez que não leva em conta as características das descontinuidades. Acabou tornando-se então um dos parâmetro utilizados por outras classificações.

### 5.2.2. CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSKY – SISTEMA RMR

Em 1973, Bieniawsky apresenta a classificação denominada de “Rock Mass Rating”, ou apenas RMR. Foi sendo aprimorada ao longo dos anos com a inclusão de novos parâmetros e hoje utiliza-se a versão publicada em 1989.

Baseia-se em 5 parâmetros e pondera a importância de cada parâmetro para a classificação final (Tabela 7).

1. Resistência a compressão uniaxial – peso: 0 – 15
2. RQD – peso 3 – 20
3. Espaçamento entre descontinuidades – peso: 5 – 20
4. Características das descontinuidades – peso: 0 – 30
5. Presença de água – peso: 0 – 15

Tabela 7 - Critérios para avaliação do RMR (modificado de Bieniawski, 1989).

Parâmetro de Classificação									
1	Resistência do material rochoso intacto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	<1
		Valores Ponderais	15	12	7	4	3	1	0
2	RQD (%)	Valores Ponderais	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	<25		
			20	17	13	8	3		
3	Descontinuidades (m)	Valores Ponderais	>2	0,6 – 2	0,2 – 0,6	0,06 – 0,2	<0,06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Comprimento descontinuidade (m)	<1	1 – 3	3 – 10	10 – 20	>20		
		Valores Ponderais	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nenhuma	<0,1	0,1 – 1	1 – 5	>5		
		Valores Ponderais	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Lig. Rugosa	Ondulada	Suave		
		Valores Ponderais	6	5	3	1	0		
		Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro <5	Duro >5	Mole<5	Mole>5		
		Valores Ponderais	6	4	2	2	0		
		Alterabilidade	Inalterada	Lig. Alterada	Mod. Alterada	Muito Alterada	Decomposta		
		Valores Ponderais	6	5	3	1	0		
5	Presença de água	Condições gerais do maciço rochoso	Seco	Lig. Úmido	Úmido	Escorrimentos	Fluxo Abundante		
		Valores Ponderais	15	10	7	4	0		

$$RMR = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + ajustes \quad (3), \text{ onde:}$$

P = parâmetros

A soma dos pesos permite compartimentar o maciço em cinco classes geomecânicas (Tabela 8).

Tabela 8 - Classe do Maciço Rochoso determinada pela soma total dos pesos (modificado de Bieniawski, 1989).

Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Muito Ruim
Soma dos Pesos	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	> 20

Cada uma dessas classes apresenta características particulares (Tabela 9).

Tabela 9 - Significado das Classes (modificado de Bieniawski, 1989).

Classe	I	II	III	IV	V
Tempo médio de auto sustentação	10 anos	6 meses	1 semana	5 horas	10 minutos
Vão da seção	15 m	10 m	5 m	2,5 m	1 m
Coesão (kPa)	> 400	400 a 300	300 a 200	200 a 100	< 100
Ângulo de Atrito	> 45°	35 a 45°	25 a 35°	15 a 25°	< 15°

Definindo-se um vão livre de túnel e sabendo-se o valor de RMR, consegue-se estimar o tempo de auto sustentação, se ocorrerá o colapso imediato, ou se se faz necessário ou não sistema de suporte (Figura 6).

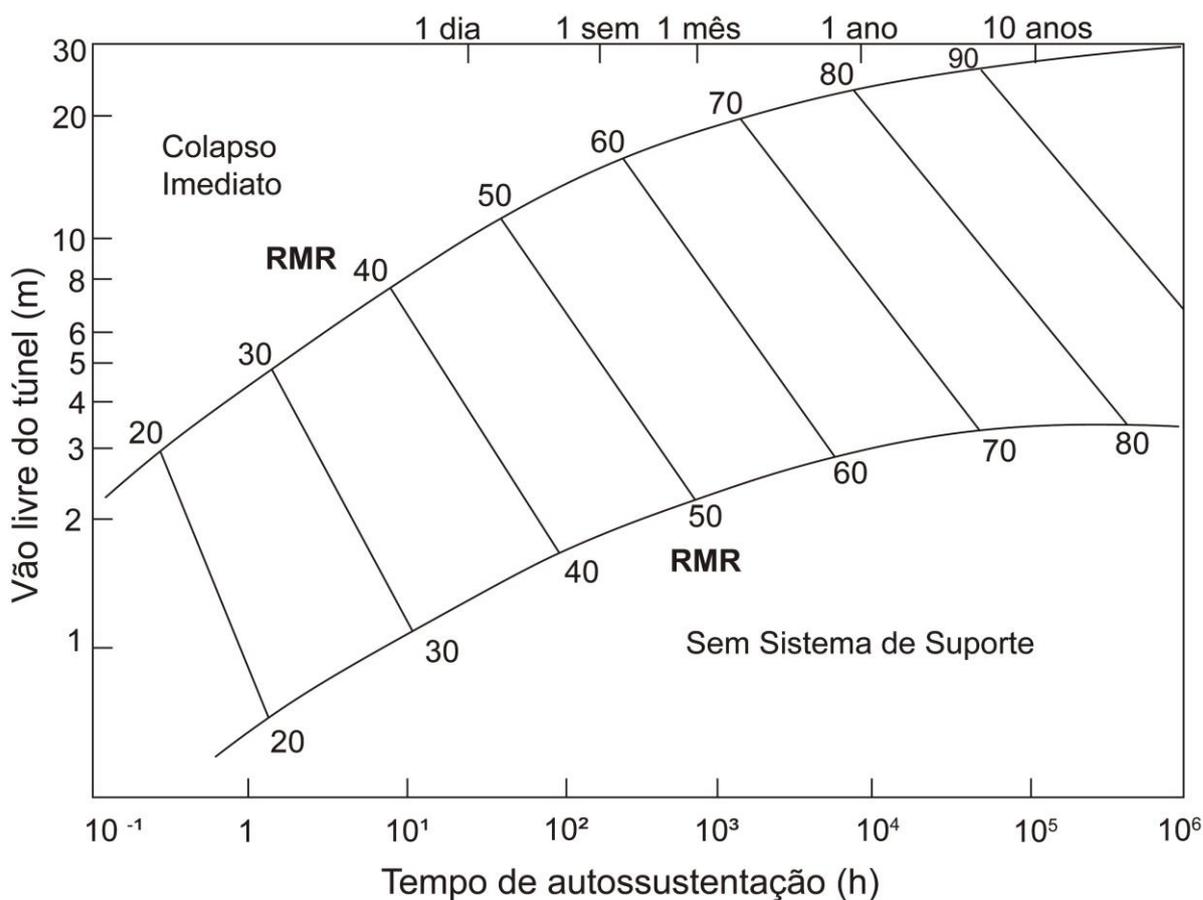


Figura 6 - Relação entre expansão da escavação e tempo de auto-sustentação (modificado de Bieniawski, 1989).

Segundo Bieniawski o RMR é um sistema de fácil aplicação, uma vez que as informações necessárias são obtidas facilmente em furos de sondagem ou mapeamentos geológicos. O autor não recomenda utilizar a classificação caso não se tenha todos os dados e sugere utilizar o método sempre acompanhado de outro sistema de classificação para checar resultados.

## **6. ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E TECNOLÓGICOS**

Os principais ensaios de caracterização mecânica e tecnológica requeridos para rochas e que foram realizados neste trabalho tiveram como objetivo detalhar o comportamento da rocha quando colocadas aos mais diversos tipos de solicitações físicas e mecânicas. Os ensaios são normatizados por entidades reconhecidas internacionalmente, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, etc.

A descrição dos testemunhos de sondagem e seleção de amostras para ensaios foram realizados pelo autor do trabalho nas dependências do Instituto de Geociências da UFRGS. Os ensaios de velocidade sônica, índices físicos, carga pontual e abrasividade CERCHAR foram realizados pelo autor do trabalho na Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul, CIENTEC. A compilação dos resultados dos ensaios e cálculo dos parâmetros se realizou com o auxílio do software Excel, as seções geológicas e geotécnicas foram elaboradas com o auxílio do software AutoCAD e Adobe Illustrator.

### **6.1. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DOS TESTEMUNHOS DE SONDAJEM**

Para a realização do presente trabalho, tomou-se conhecimento e posse de uma campanha de sondagens que totalizou 120 furos, dos quais 53 foram de sondagens do tipo à percussão e 67 furos do tipo mista. Após análise do *log* de sondagem de todos os 67 furos de sondagem mista, foram escolhidas três duplas de furos, totalizando seis testemunhos de sondagem, com os quais se realizou todos os trabalhos aqui descritos. Uma dupla de furos localiza-se mais no início, outra no meio e uma no final do trecho que compreende a linha dois do metrô de Porto Alegre (Figura 7).

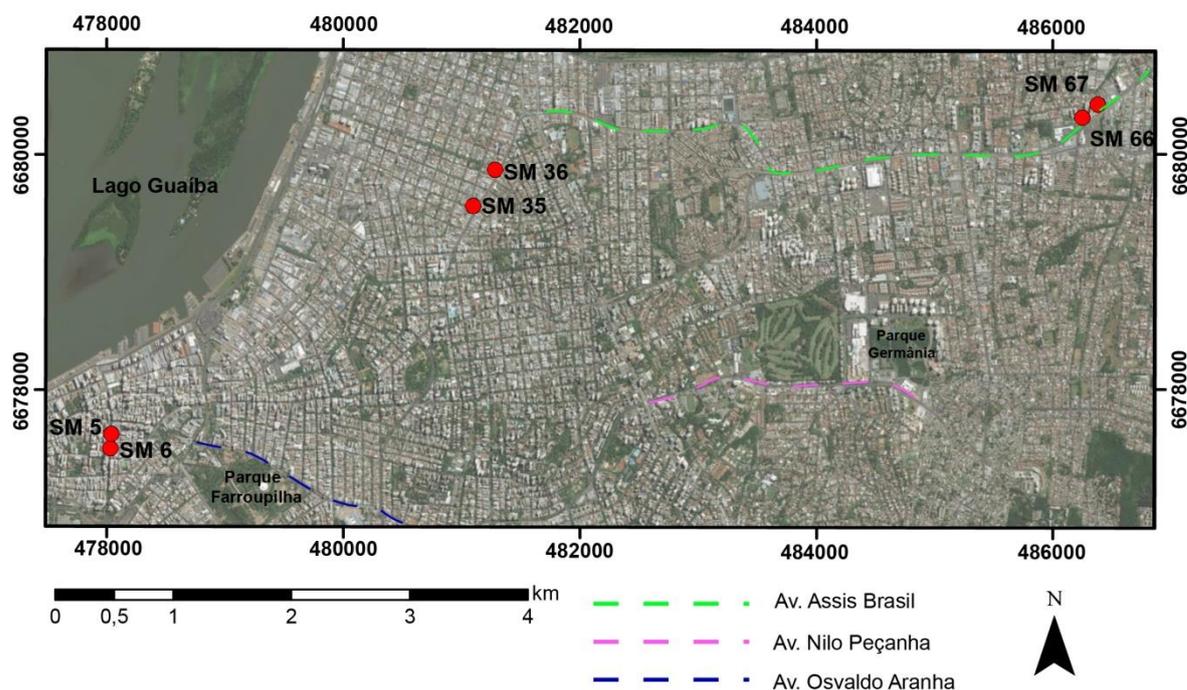


Figura 7 – Mapa de localização dos furos de sondagem selecionados para o trabalho (modificado a partir do software Google Earth).

A escolha de tais furos de sondagem deu-se pela intenção de se trabalhar em diferentes áreas da cidade e com diferentes litologias. Definiu-se trabalhar com seis furos de sondagem, por acreditar que com o tempo e mão de obra disponível seria a quantidade correta para que os trabalhos fossem realizados com qualidade e dentro do prazo. Fica em aberto o futuro detalhamento geomecânico de outras áreas não abordadas nesse trabalho.

A descrição dos furos de sondagem previamente selecionados (Imagem 1) foi feita observando as características necessárias para caracterizar geotecnicamente o maciço rochoso, tais como a litologia, alteração, coerência e descontinuidades dos maciços rochosos conforme método sugerido da ISRM de 1981.



Imagem 1 - Descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem e seleção de amostras para ensaios mecânicos e tecnológico

## 6.2. ÍNDICES FÍSICOS

Foram determinadas propriedades como densidade aparente (massa específica aparente), porosidade aparente e absorção d'água. A densidade aparente permitiu calcular o peso da rocha, importante parâmetro para o cálculo de cargas em edificações. A porosidade aparente é a relação entre o volume de vazios e o volume total. A absorção d'água é a capacidade de assimilação ou incorporação de água pela rocha. Sendo maior o volume de espaços vazios, maior será a porosidade aparente e, conseqüentemente, maior será a absorção d'água esperada para a rocha e, provavelmente, menor a sua resistência físico-mecânica. A absorção d'água é a capacidade de assimilação ou incorporação de água pela rocha, expressa em percentual. A avaliação deste índice é fundamental para se inferir a penetração de fluidos que podem acelerar a deterioração do material. A elevada absorção d'água pode ainda ser um indicador da suscetibilidade da rocha a problemas, como desmoronamento ou subsidência.

A realização dos ensaios (Imagem 2) se baseou na Norma ABNT 15845/2015 – Anexo B. Em laboratório determinou-se o volume das amostras ensaiadas, a sua

massa saturada em água e a sua massa seca em estufa (aproximadamente 104 °C até obtenção de massa constante). A inundação das amostras ocorre submetendo as amostras a recipientes cobertos com água durante 48 horas em temperatura ambiente. Para a obtenção dos parâmetros os dados coletados passaram por diversos cálculos.



Imagem 2 – Diferentes etapas do ensaio de determinação de índices físicos

### 6.3. VELOCIDADE SÔNICA

Foram realizados estudos de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais através de método sugerido pela ISRM em 2014. Esses

estudos permitiram avaliar, de forma indireta, o grau de alteração e de coesão das rochas. É um dos raros ensaios não destrutivos para verificação de propriedades rochosas. A velocidade de propagação de ondas em uma rocha é influenciada por diversos fatores, tais como: composição mineralógica, granulação, textura, tamanho, porosidade, anisotropia, temperatura ambiente etc.

Em um conjunto de corpos de prova de uma mesma amostra ou entre amostras de rochas semelhantes, valores relativamente mais altos indicam um menor grau de alteração e uma maior coesão dos minerais, geralmente interpretados como indicadores de boa resistência mecânica.

Os ensaios foram realizados com base nos métodos sugeridos pela ISRM. Para isso determinou-se o comprimento dos corpos de prova, para que depois de obtido o tempo, pudesse ser calculada a velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais. Abaixo o equipamento, PUNDIT, utilizado para o ensaio e sua execução (Imagem 3).



Imagem 3 – Realização do ensaio com equipamento de Ultrassom

#### 6.4. CARGA PONTUAL

Foram realizados ensaios de resistência a carga pontual, que é um método indireto e mais barato para calcular a resistência a compressão uniaxial. O ensaio tem um procedimento sugerido pela ISRM em 1985 e consiste em provocar a ruptura de amostras de rochas, obtidas a partir de testemunhos de sondagens com diâmetros variando entre 25 e 100 mm, aplicando uma força pontual crescente com o auxílio de uma prensa hidráulica. A amostra de rocha é comprimida entre duas ponteiros cônicas de metal duro, que provocam a ruptura por desenvolvimento de fissuras de tração paralelas ao eixo da carga, sendo registrado o valor da carga  $P$  que provoca a ruptura. Abaixo a prensa utilizada e um corpo de prova sendo submetido ao ensaio (Imagem 4).



Imagem 4 - Prensa hidráulica utilizada para realizar o ensaio. Em detalhe corpo de prova sendo submetido a tensão.

Após uma série de cálculos, levando em consideração a medida do diâmetro dos corpos de prova e o valor da carga  $P$ , determina-se o índice médio ( $I_{s50}$ ), que é então multiplicado por uma constante que pode variar de 20 a 25 vezes para se obter o valor aproximado da resistência a compressão uniaxial, neste trabalho utilizou-se o valor de 20 vezes para a constante.

Em rochas isotrópicas, em geral são necessários 10 ensaios válidos por cada tipo de rocha que se pretende caracterizar, mas um número inferior poderá ser suficiente se a dispersão de resultados for pequena.

O ensaio foi realizado pelo método sugerido pela ISRM. Foi necessário obter a altura do corpo de prova, para que associada com a carga necessária para a ruptura e uma série de cálculos, conseguisse se obter a resistência a compressão uniaxial das amostras, objetivo pelo qual esse ensaio foi realizado neste trabalho. Abaixo corpos de prova após a realização do ensaio (Imagem 5).



Imagem 5 – Corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de carga pontual.

## 6.5. ABRASIVIDADE CERCHAR

Foram realizados ensaios de determinação da abrasividade CERCHAR, que fornece o desgaste da ponteira (aço especial), ao risco na superfície do material. O ensaio consiste na fixação de uma amostra de rocha sobre a qual é deslizada uma ponteira de material com dureza conhecida. A ponteira está submetida a um peso de 7 kg, o qual fornece uma carga de 70 N. A superfície da amostra onde é aplicado o atrito da ponteira é obtida naturalmente por meio de fraturas frescas planas.

O atrito da ponteira com a superfície de ensaio proporciona um sulco de 10 mm na amostra de rocha. Com o atrito há o desgaste da ponteira, que representa o Índice de Abrasividade CERCHAR. As ponteiros utilizadas, bem como uma amostra sendo ensaiada são mostradas abaixo (Imagem 6).



Imagem 6 – Ponteiros utilizados e amostra sendo ensaiada.

ASTM (2012) é o documento normativo para este ensaio, ele apresenta as diretrizes e rotinas necessárias, indicando a velocidade de execução, orientação do sulco, quantidade de sulcos, etc.

Estudos realizados apontam correlação direta entre o CERCHAR e o conteúdo de quartzo-equivalente (eQc), indicando que a maior concentração de minerais de dureza elevada (principalmente quartzo, piroxênio, feldspatos e opacos) seria o fator preponderante para a abrasividade de uma rocha. Pode-se ainda correlacionar o CERCHAR com a taxa de desgaste de ferramentas em escavações de tuneis em rocha (Figura 8).

É importante observar que fatores geológicos, tais como orientação de planos de fraqueza a partir da foliação, espaçamento entre descontinuidades e aspectos texturais, fatores operacionais tal como a precisão da leitura do desgaste da ponteira, podem provocar variabilidade nos resultados obtidos com o método.

A leitura do desgaste das ponteiras é feito com o auxílio de um microscópio acoplado com câmera fotográfica e do software AutoCAD.

A realização deste ensaio visa implementar um dado novo, não presente na Proposta de Manifestação de Interesse – Metrô Porto Alegre.

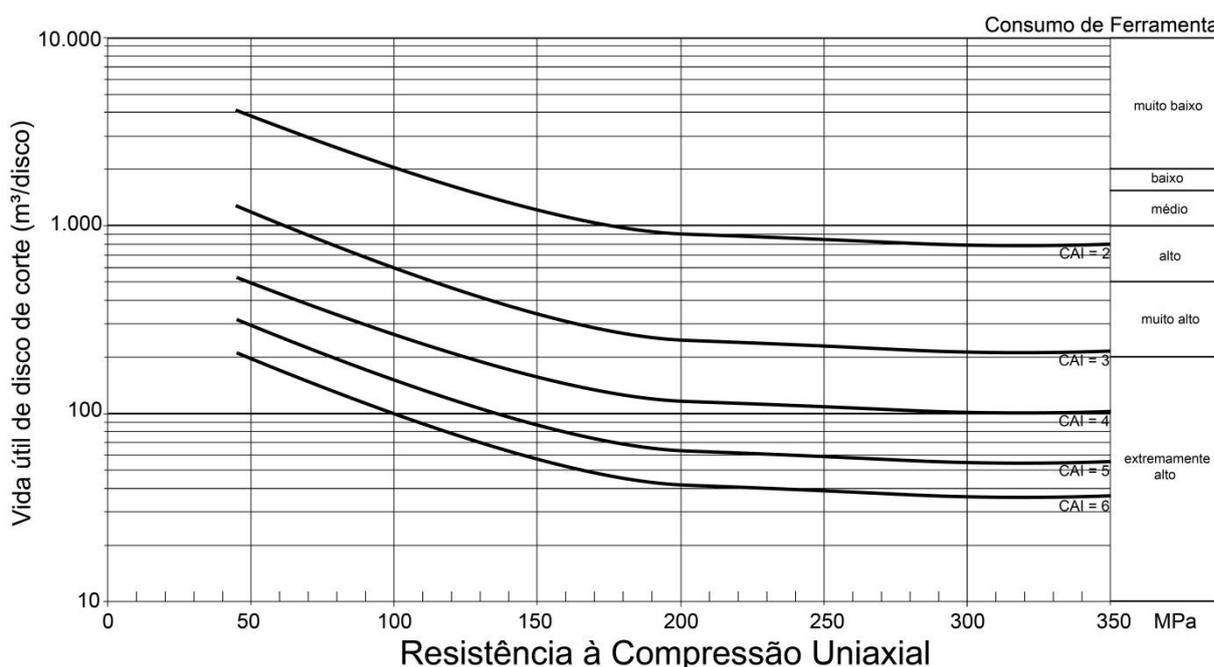


Figura 8 - Relação entre vida útil de disco de corte, compressão uniaxial e índice de abrasividade CERCHAR (Maidl et al. 2001).

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo mostra os resultados obtidos durante o trabalho que visou classificar geotecnicaamente trechos da Linha Dois do Metrô de Porto Alegre e estimar a abrasividade das litologias. Os resultados são expostos através de gráficos, tabelas e seções geológicas e geotécnicas.

## 7.1. PERFIS GEOLÓGICOS DAS ÁREAS DE ESTUDO

As descrições petrográficas macroscópica dos furos de sondagem realizadas no presente trabalho apresentaram os seguintes resultados:

O furo de sondagem **SM 05** é composto por uma rocha plutônica com textura média, de coloração cinza clara a amarelada, fraturamento moderado e orientação das fraturas ora sub-horizontal e ora subvertical. A ocorrência de fraturas vai se alterando ao longo do furo. É composta por plagioclásio, quartzo, k-feldspato, muscovita e biotita. Apresenta orientação subvertical dos minerais máficos. Até 1,45 metros a rocha encontra-se alterada e a partir de então, menos decomposta. O furo de sondagem **SM 06** é composto por uma rocha plutônica com textura média, de coloração cinza clara a amarelada, com fraturamento moderado e orientação das fraturas ora sub-horizontal e ora subvertical. Possui nível de fraturamento muito intenso. Há níveis pegmatíticos. É composta por plagioclásio, quartzo, k-feldspato, biotita e muscovita. Classificação provável é de um Monzogranito para esse conjunto.

O furo de sondagem **SM 35** é composto por uma rocha plutônica com textura média, de coloração cinza clara, com fraturamento intenso e orientação das fraturas variando de sub-horizontal e subvertical. O espaçamento entre fraturas se altera ao longo do furo. Encontra-se fraturas com óxido de ferro e argilização. O furo de sondagem **SM 36** também é composto por uma rocha plutônica com textura média, de coloração cinza clara, com fraturamento intenso e orientação das fraturas que varia de sub-horizontal a subvertical. A composição da rocha de ambos os furos é por k-feldspato, quartzo, plagioclásio, biotita e muscovita. Classificação modal de um Sienogranito.

O furo de sondagem **SM 66** é composto por uma rocha de coloração cinza escuro. Até 7,8 metros a rocha é de textura grosseira e composta por plagioclásio, biotita e quartzo subordinado e então começa um enriquecimento em biotita e a rocha passa para um biotita gnaisse com textura porfiroblástica, com pórfiros de plagioclásio imersos em matriz de biotita e plagioclásio. As fraturas variam de sub-horizontais e subverticais. Classificação modal aproximada de um Granodiorito gradando para um Biotita Gnaisse. A mesma situação ocorre no furo de sondagem **SM 67**, em que uma rocha de coloração cinza, textura grosseira, provável

Granodiorito migra para um Biotita Gnaiss no final do intervalo. Em ambos os furos a recuperação é mais expressiva para o Biotita Gnaiss do que para o Granodiorito.

Quando analisadas as descrições petrográficas com a localização dos pontos em mapa geológico da região, as amostras SM 05, SM 06, SM 35 e SM 36 são definidas como Granito Independência. Já as amostras SM 66 e SM 67 são definidas como Gnaiss Porto Alegre (Figura 9).

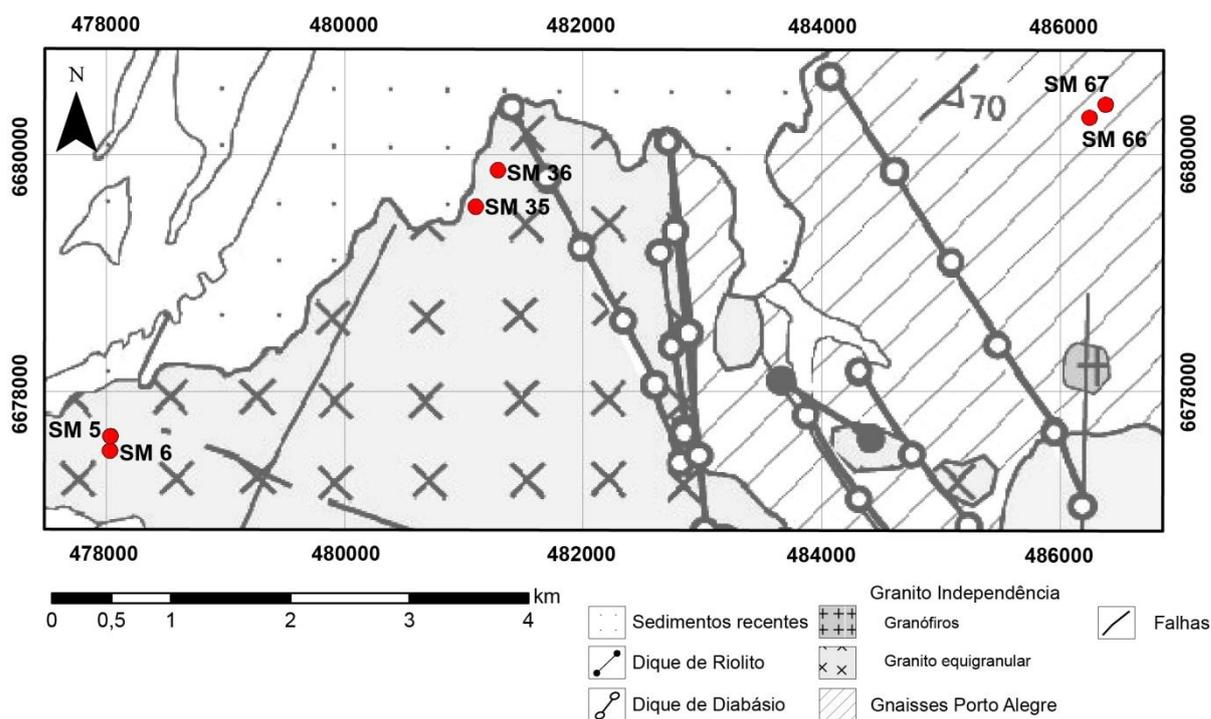


Figura 9 – Localização dos furos de sondagem estudados em mapa geológico da cidade de Porto Alegre (modificado de Philipp *et al.*, 2002).

Com a análise petrográfica macroscópica se construiu três seções geológicas, nas quais se buscou representar de forma gráfica o descrito e individualizar as litologias. A elaboração das seções geológicas permitiu conhecer a distribuição lateral das litologias e seu comportamento. Para uma melhor representatividade utilizou-se furos próximos não descritos durante o período de estudo, mas sim descritos na época da realização das sondagens. Confiou-se nesses dados uma vez que, apesar de incompletos, as informações constantes se mostraram coerentes com os adquiridos durante a elaboração desse trabalho.

Para a primeira Seção Geológica (Figura 10) utilizou-se os furos SM 04, SM 05, SM 06 e SM 07. Para a segunda Seção Geológica (Figura 11) utilizou-se os furos SM 34, SM 35, SM 36 e SM 37. Para a última Seção Geológica (Figura 12)

utilizou-se somente os furos SM 66 e SM 67 devido a ausência de outros furos nas proximidades.

É importante se ter em mente que a geologia pode mudar entre um furo e outro das seções geológicas, principalmente em regiões de relevo acidentado.

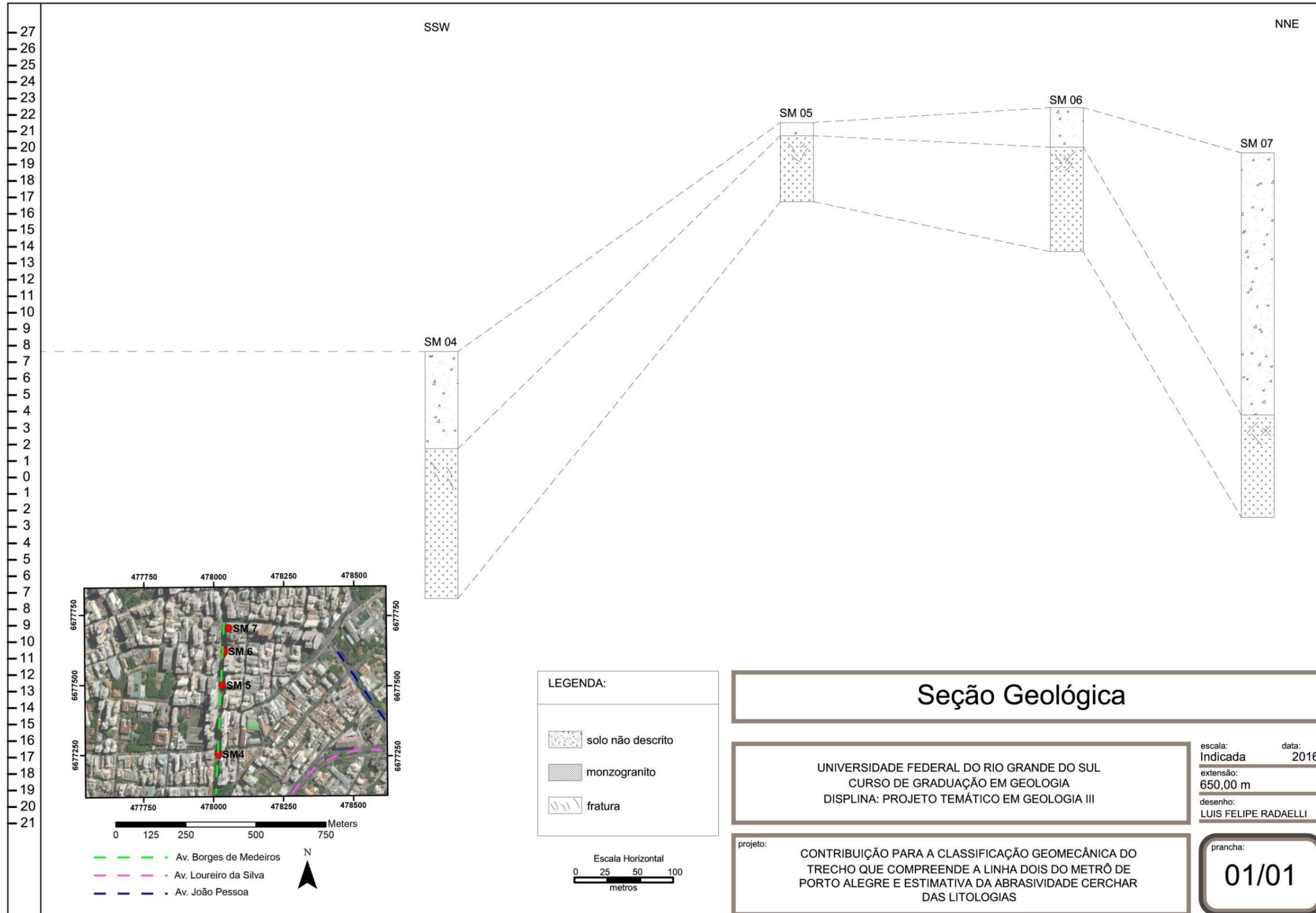


Figura 10 – Seção Geológica primeiro subtrecho, furos SM 04, 05, 06 e 07.

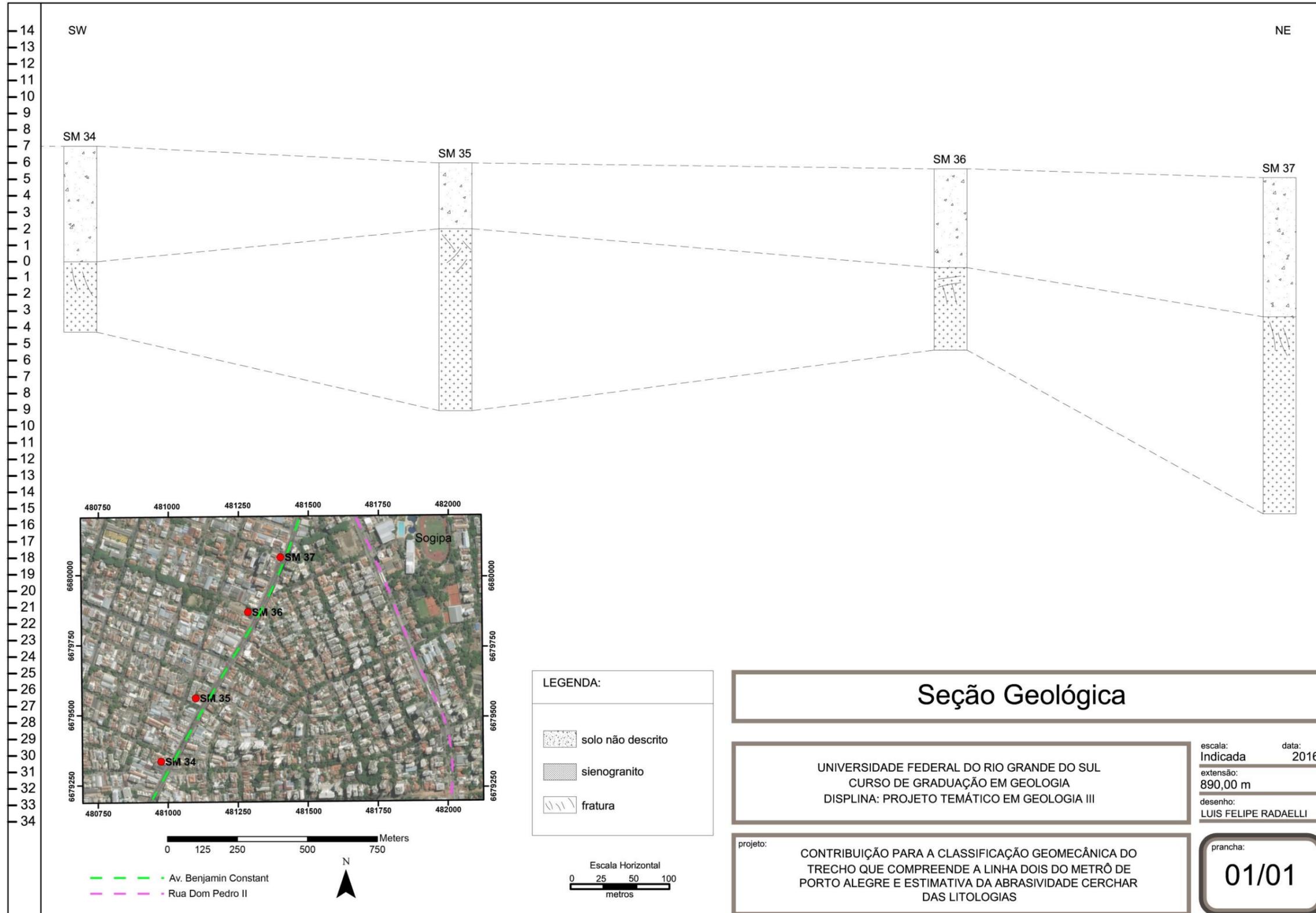


Figura 11 - Seção Geológica segundo subtrecho, furos SM 34, 35, 36 e 37.

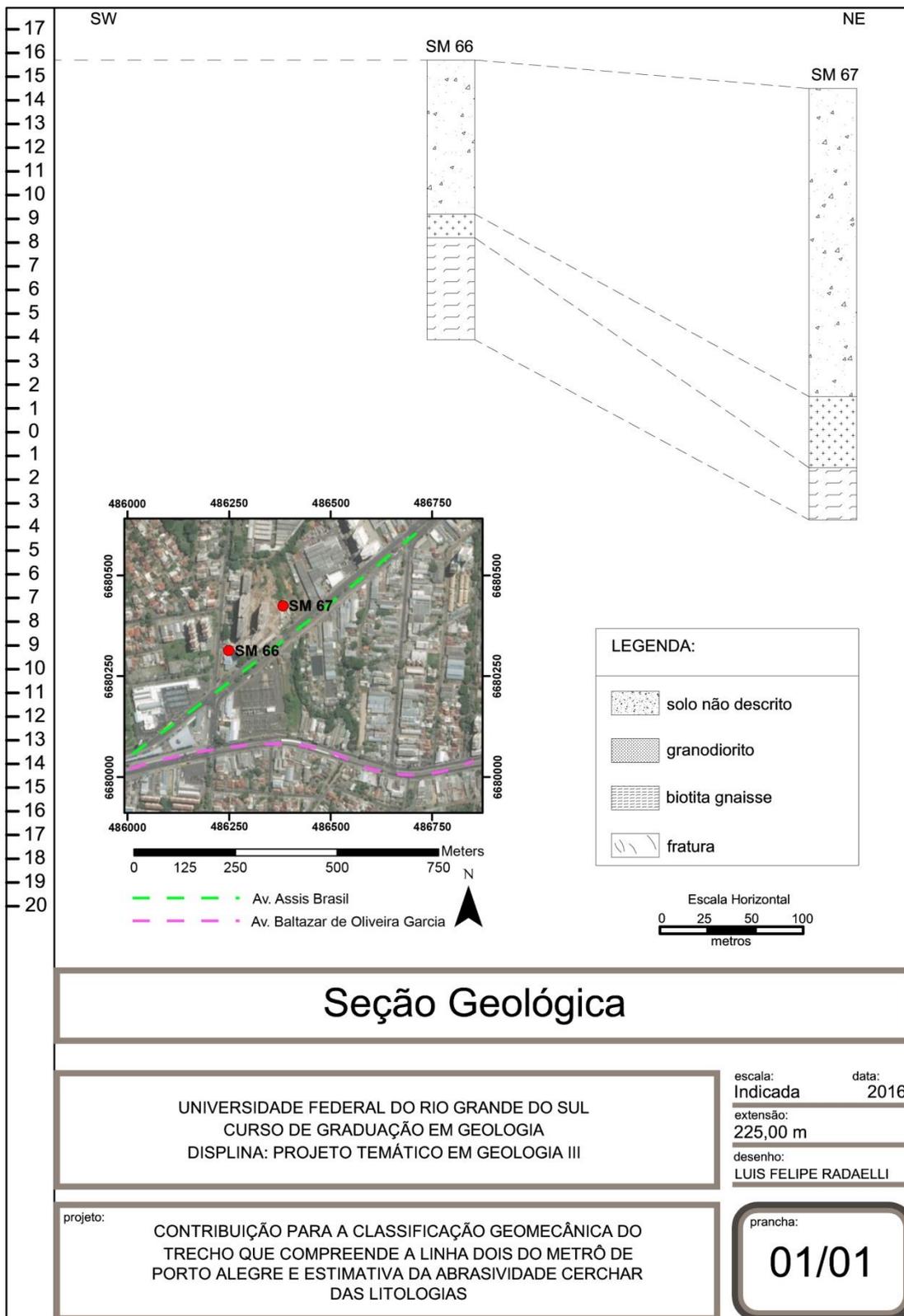


Figura 12 - Seção Geológica terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67.

## 7.2. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

Durante esta etapa de trabalho, foram coletadas informações a respeito da coerência, grau de alteração, grau de fraturamento, rugosidade das descontinuidades e inclinação das fraturas diretamente dos testemunhos de sondagem que juntamente com informações de recuperação e RQD foram esquematizadas para melhor apresentação em perfis geotécnicos. Ao que tudo indica, as sondagens foram realizadas com barrilete simples, o que acarreta numa pior qualidade do material recuperado, uma vez que o material de alteração é lavado durante a realização da sondagem. É importante lembrar essa condição no momento em que se realiza a descrição geotécnica de fatores como grau de alteração e preenchimento de fraturas, uma vez que, por o material de pior qualidade não ter sido recuperado, pode-se erroneamente atribuir valores superestimados para essas características.

Essa etapa se demonstrou importante uma vez que os dados pré-existentes eram incompletos e em alguns casos considerados incoerentes com o material apresentado pelas sondagens. Tomou-se o cuidado necessário para que, com o material e as condições disponíveis, as descrições representassem da melhor forma as condições do maciço rochoso.

A descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem foi realizada antes de se obter o resultado dos ensaios físicos, mecânicos e tecnológicos do material, que quando obtidos mostraram-se coerentes com o que observado durante a descrição.

A seguir, nas figuras Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18, são apresentados os perfis geológicos juntamente com todas informações adquiridas nessa etapa de descrição dos testemunhos de sondagem com enfoque geotécnico.

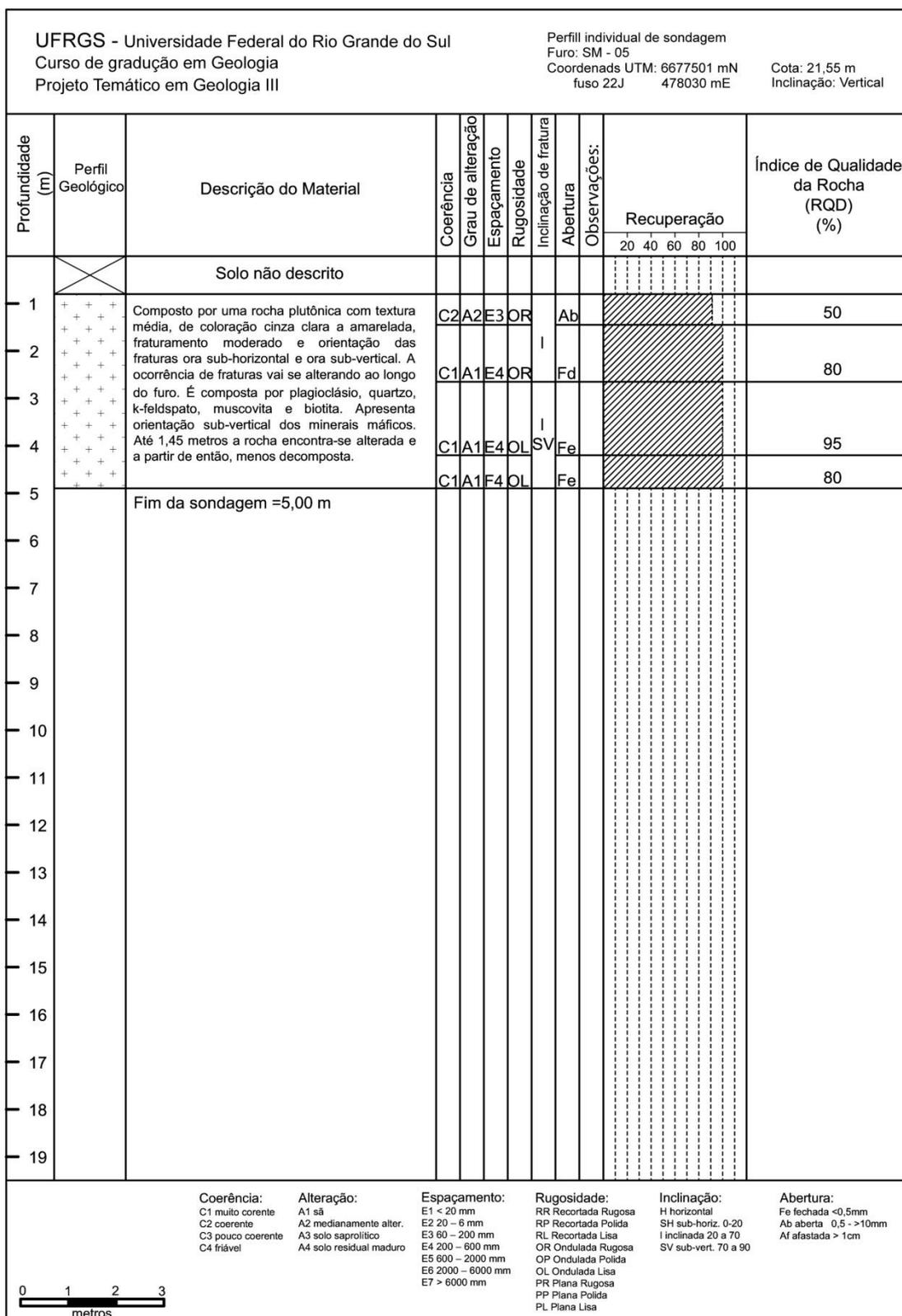


Figura 13 – Perfil Geotécnico SM 05 (Granito Independência)

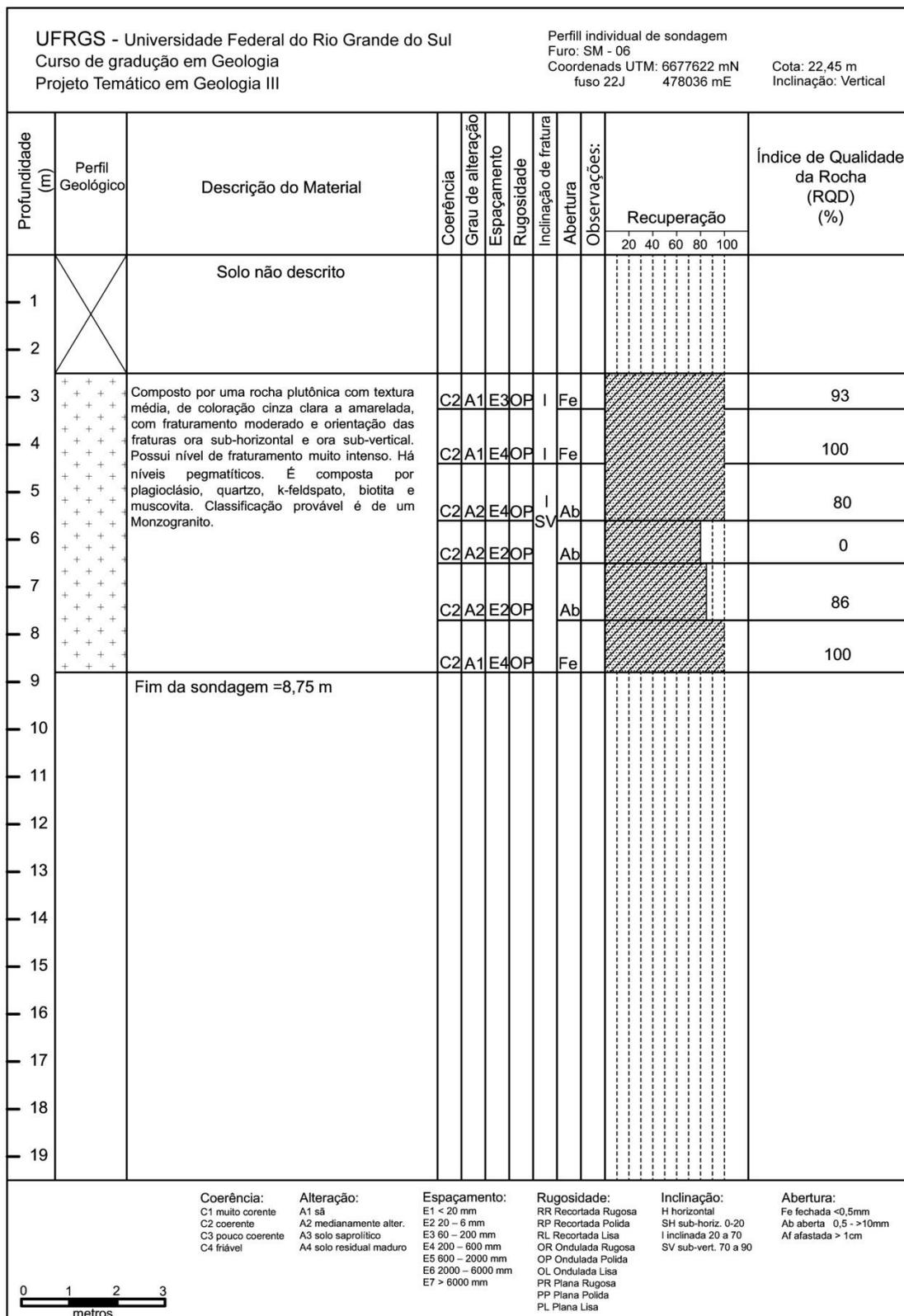


Figura 14 – Perfil Geotécnico SM 06 (Granito Independência)

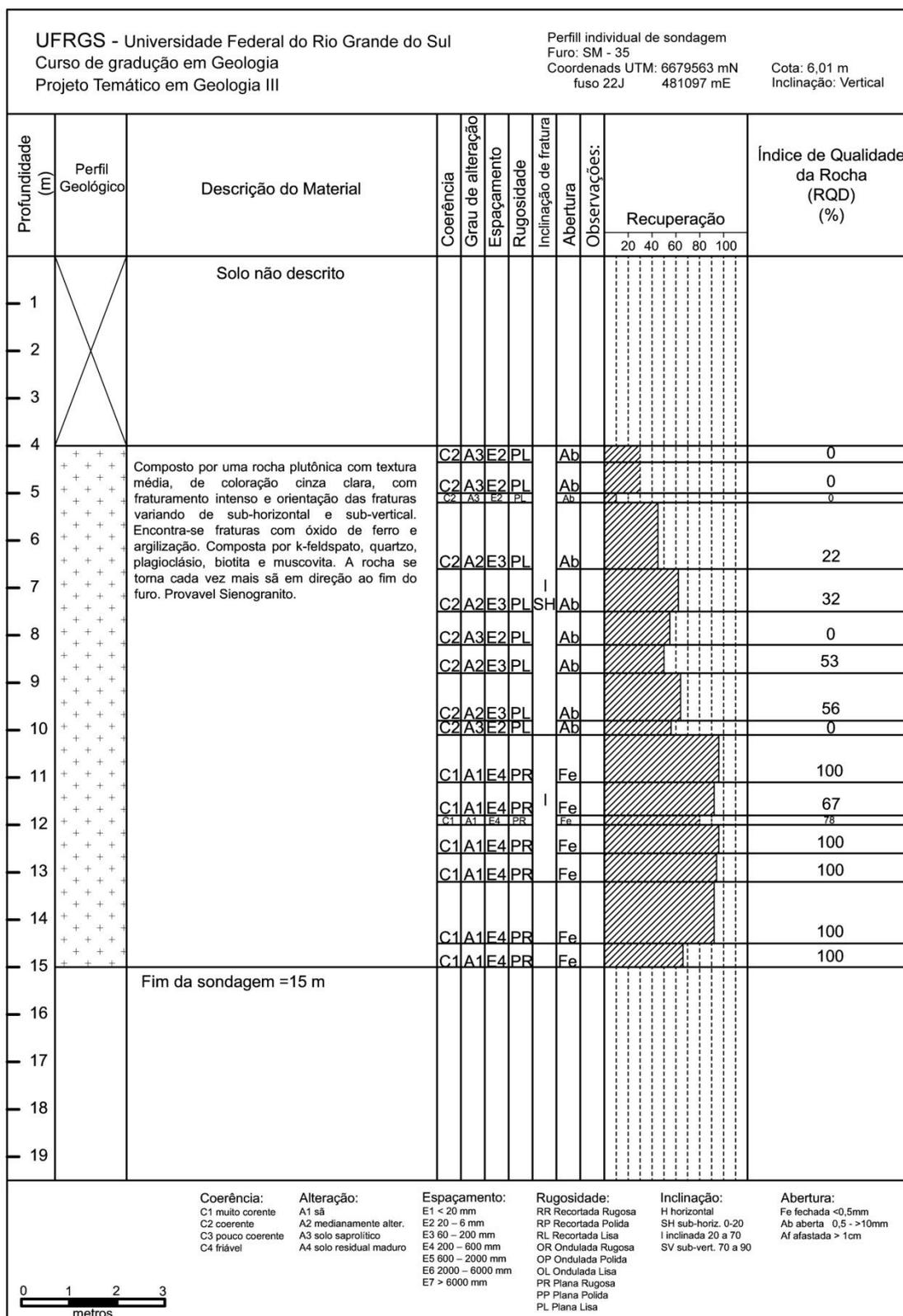


Figura 15 – Perfil Geotécnico SM 35 (Granito Independência)

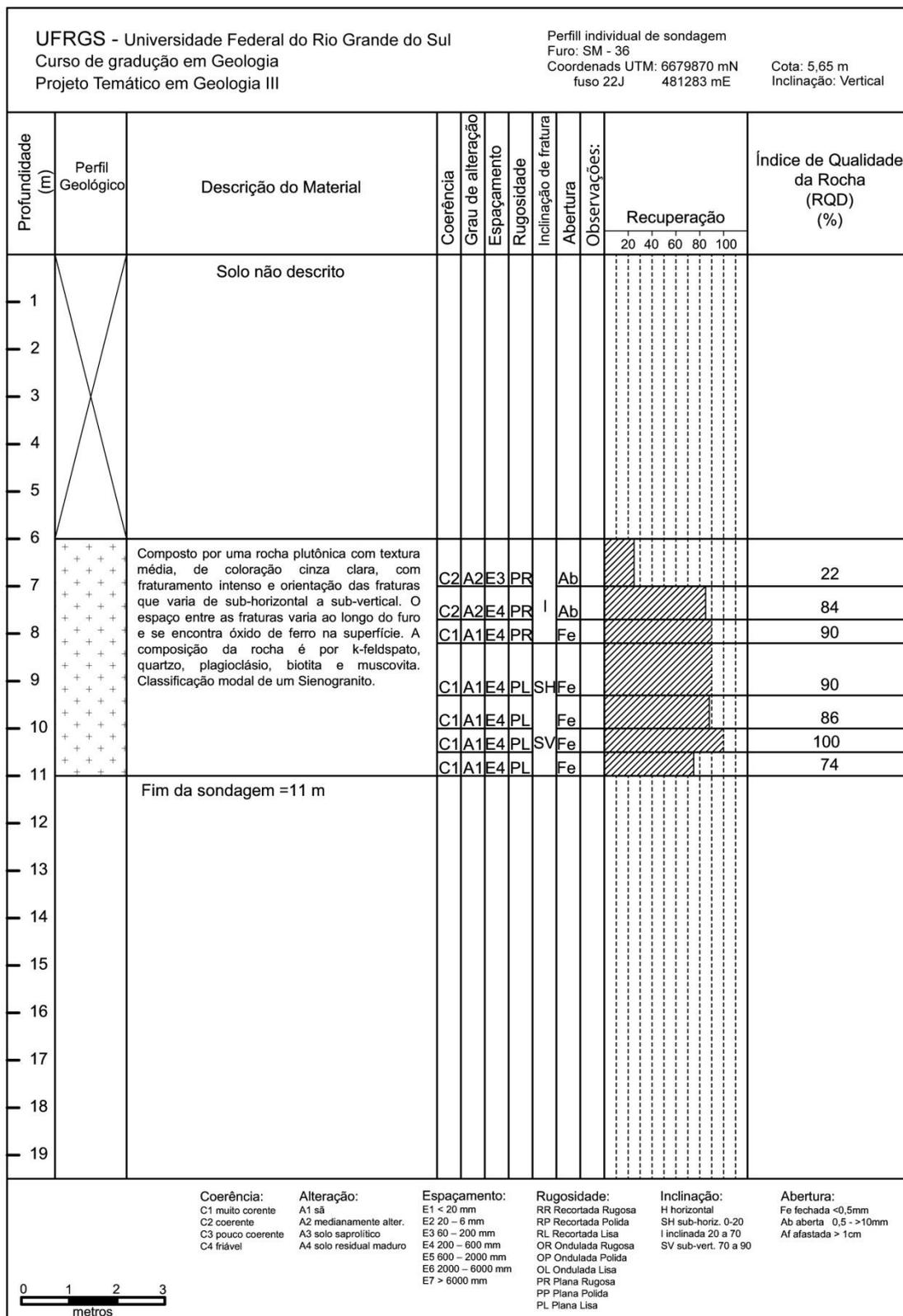


Figura 16 – Perfil Geotécnico SM 36 (Granito Independência)

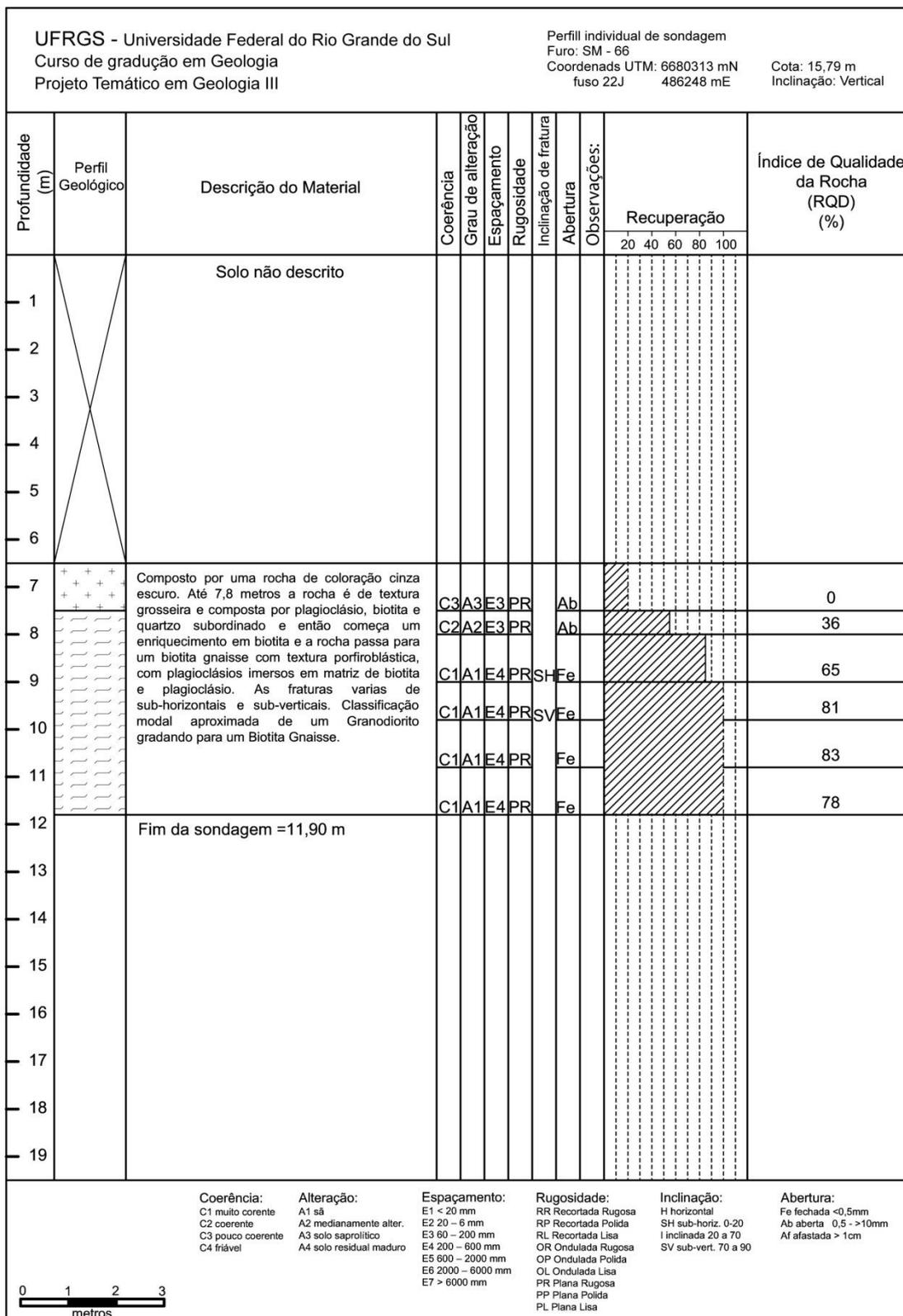


Figura 17 – Perfil Geotécnico SM 66 (Gnaissé Granodiorítico)

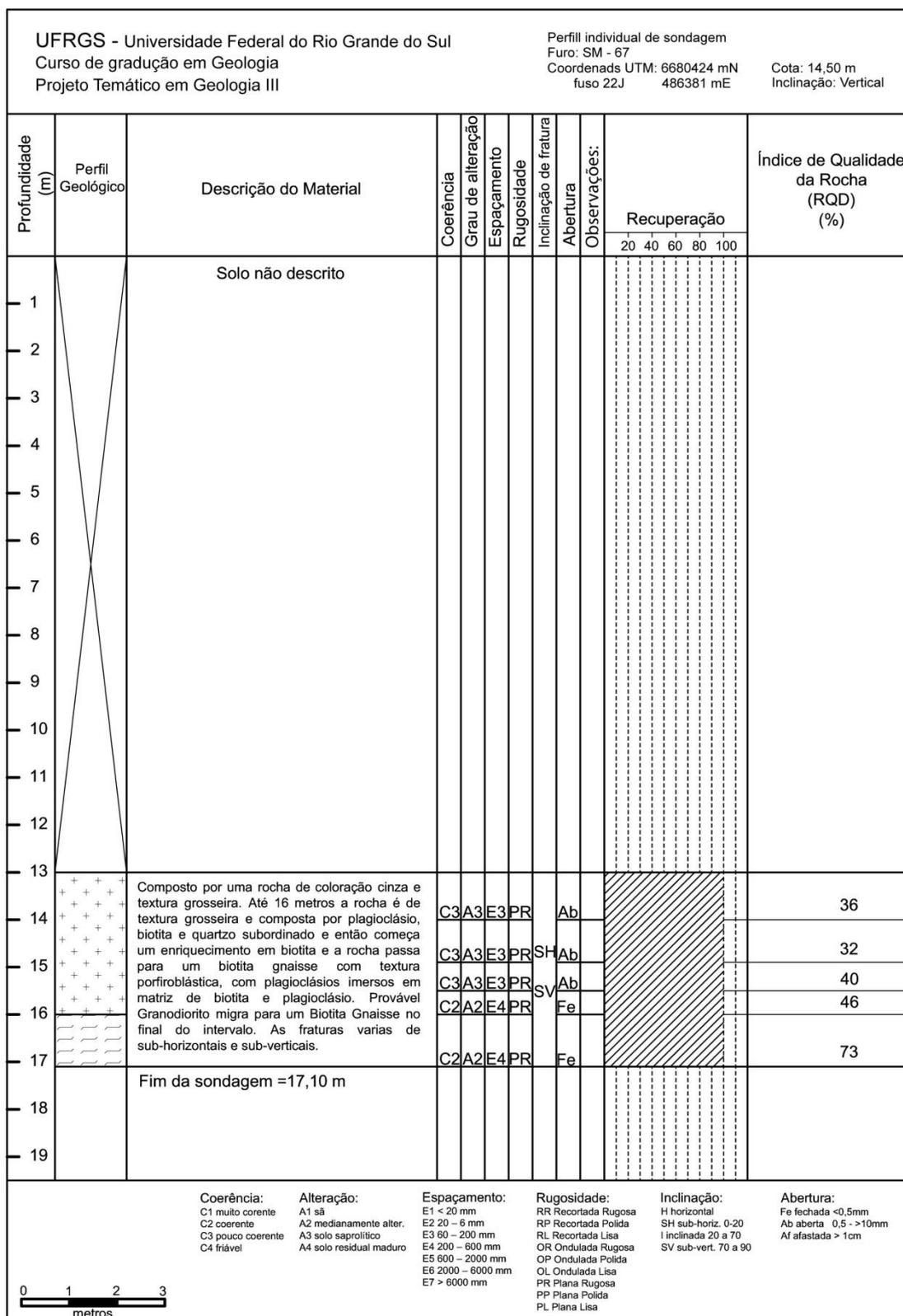


Figura 18 – Perfil Geotécnico SM 67 (Granito Independência, Gnaissé Granodiorítico)

### 7.3. ENSAIOS FÍSICOS, MECÂNICOS E TECNOLÓGICOS

Os ensaios físicos e mecânicos, juntamente com a análise petrográfica e a descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem foram importantes para o desenvolvimento das classificações geomecânicas. Apesar de não serem obrigatórios, ajudaram a esclarecer incertezas geradas durante outras etapas do trabalho e garantiram uma maior confiabilidade nos resultados obtidos nas classificações geomecânicas. O número de amostras ensaiadas dependeram da quantidade de amostra disponível e também dos corpos de provas disponíveis se encaixarem ou não nos pré-requisitos impostos pelas referências normativas utilizadas.

Apesar de Massa Específica Aparente Seca e Saturada, Absorção da Água, Porosidade Aparente e Velocidade Sônica não serem um parâmetro direto para as Classificações Geomecânicas, os dados obtidos ajudaram a corroborar os parâmetros coerência e grau de alteração definidos durante a descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem. O Índice de Carga pontual, multiplicado por uma constante (20, neste trabalho), forneceu a Resistência à Compressão Uniaxial dos materiais, que é um parâmetro utilizado diretamente na Classificação Geomecânica RMR, de Bieniawski.

A seguir são apresentados o valor médio e seu desvio padrão para parâmetros de Massa Específica Aparente Seca e Saturada, Absorção da Água, Porosidade Aparente, Velocidade Sônica de Ondas P, Carga Pontual e Índice de Abrasividade CERCHAR para cada um dos furos de sondagem trabalhado (Tabela 10). O valor de Resistência à Compressão Uniaxial para cada furo também é apresentado (Tabela 11). Todos os resultados dos corpos de prova ensaiados podem ser encontrados nos apêndices deste trabalho.

Tabela 10 – Compilação dos valores médios e desvio padrão (DP) do resultado dos ensaios físicos, mecânicos e tecnológicos realizados com os furos de sondagem selecionados.

		Massa Específica Aparente Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)	Velocidade de Ondas Sônicas P (km/s)	Índice de Carga Pontual (MPa)	Índice de Abrasividade CERCHAR (1/10 mm)
<b>SM 05</b>	<b>Média</b>	2,60	2,60	0,30	0,70	5,15	8,35	5,40
	<b>DP</b>	0,01	0,01	0,27	0,71	0,06	0,49	1,22
<b>SM 06</b>	<b>Média</b>	2,61	2,62	0,47	1,22	3,49	4,63	5,20
	<b>DP</b>	0,00	0,00	0,08	0,22	0,17	1,25	1,17
<b>SM 35</b>	<b>Média</b>	2,62	2,63	0,23	0,61	5,08	8,21	5,30
	<b>DP</b>	0,01	0,01	0,09	0,23	0,16	1,89	1,48
<b>SM 36</b>	<b>Média</b>	2,63	2,63	0,11	0,28	5,49	10,75	5,40
	<b>DP</b>	0,01	0,01	0,05	0,13	0,19	0,73	0,88
<b>SM 66</b>	<b>Média</b>	2,68	2,68	0,05	0,12	5,68	8,32	4,80
	<b>DP</b>	0,01	0,01	0,02	0,05	0,21	1,31	1,04
<b>SM 67</b>	<b>Média</b>	2,67	2,68	0,08	0,21	5,67	8,28	4,30
	<b>DP</b>	0,01	0,01	0,04	0,11	0,13	2,02	0,79

Tabela 11 – Valores de Resistência à Compressão Uniaxial para os furos de sondagem selecionados.

	<b>SM 05</b>	<b>SM 06</b>	<b>SM 35</b>	<b>SM 36</b>	<b>SM 66</b>	<b>SM 67</b>
<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	167,0	92,5	164,2	215,0	166,4	165,5

Os dados obtidos de Massa Específica para todos os furos estão de acordo com o encontrado na literatura para granitos, dentro da faixa de 2,55 a 2,75 g/cm<sup>3</sup> e apresentam desvio padrão muito baixo, indicando um material homogêneo dentro de todo o furo. As informações de Absorção e Porosidade aparente condizem com materiais de boa coerência e praticamente são, assim como os dados obtidos de Velocidade de Propagação de Ondas P e Índice de Carga Pontual. Um adendo se pode fazer para o furo SM 06 em relação ao SM 05, que apresenta valores ligeiramente mais elevados de Absorção e Porosidade, que quando associados com baixos valores de Velocidade de Propagação de Ondas Sônicas P e Resistência a Carga Pontual, indicam que é, possivelmente, uma amostra menos sã e com um menor grau de coerência. O Índice de Abrasividade CERCHAR também se enquadra nos valores encontrados para granitos na literatura, que podem variar de 4,5 a mais de 7,0.

Os ensaios foram realizados com o objetivo de encontrar variações lateralmente entre os furos e em profundidade dentro de um mesmo furo. Como observado nos resultados essas variações não ocorrem, com pequenas exceções, como a variação lateral comentada entre o furo de sondagem SM 05 e SM 06. Algumas amostras dos furos de sondagem SM 05 e SM 35, localizadas mais próximas a superfície apresentam Absorção de Água e Porosidade ligeiramente elevadas quando comparadas com amostras mais profundas. No entanto, por a diferença ser mínima, não se pode considerar que essa variação esteja diretamente associada a um maior grau de alteração e menor grau de coerência.

Os resultados encontrados nos ensaios de abrasividade CERCHAR para as litologias definidas como Monzogranito e Sienogranito estão de acordo com o encontrado na literatura, na faixa de 5, bem como para o Biotita Gnaisse, na faixa de 4 (segundo Maidl, Schmid, Ritz & Herrenknecht, 2001).

#### 7.4. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

As descrições geotécnicas dos testemunhos de sondagem, apresentadas anteriormente, forneceram informações indispensáveis para se realizar as classificações geomecânicas. E a partir delas foram construídas as seções geotécnicas que serão apresentadas daqui em diante.

A aplicação dos sistemas de classificação envolveu a análise dos dados obtidos através da análise petrográfica, ensaios tecnológicos e descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem. Para uma melhor visualização utilizou-se como base as seções geológicas construídas nesse trabalho.

É importante se ter em mente que as classes de maciço podem mudar entre um furo e outro, uma vez que se está extrapolando informações, principalmente porque a geologia pode mudar entre um furo e outro, especialmente nas regiões de relevo acidentado.

#### 7.4.1. *ROCK QUALITY DESIGNATION* – Sistema RQD

O primeiro sistema de classificação a ser aplicado foi o Sistema RQD e com ele foram elaboradas as Seções Geotécnicas a seguir. O maciço rochoso foi dividido em cinco classes, todas as classes geomecânicas aparecem em alguma parte dos trechos selecionadas, porém nem todas estão presentes em cada seção. O cálculo do índice RQD foi realizado durante a descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem.

A primeira Seção Geotécnica (Figura 19) que abrange os furos SM 04 a 07 apresenta três classes geomecânicas de acordo com a classificação geomecânica RQD. As classes muito ruim, razoável e boa. A segunda Seção Geotécnica (Figura 20) que abrange os furos SM 34 a 37 apresenta quatro classes geomecânicas de acordo com a classificação utilizada. A terceira Seção Geotécnica (Figura 21) que abrange os furos SM 66 e 67 apresenta quatro classes geomecânicas. As classes muito ruim, ruim, razoável e boa.

Durante a escavação do túnel se atravessará diferentes classes, fazendo com que as condições impostas pelo maciço rochoso variem a cada momento.

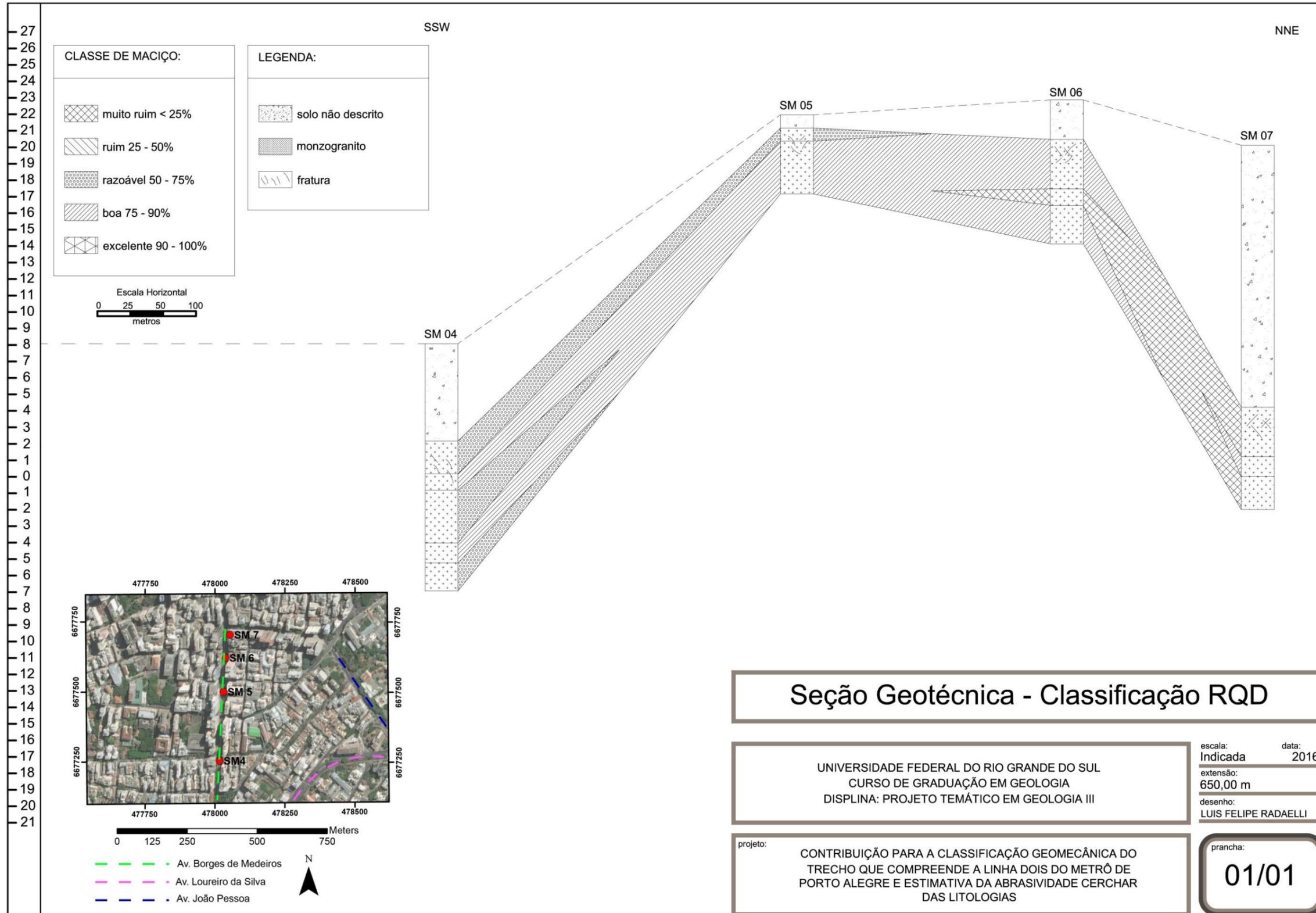


Figura 19 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no primeiro subtrecho, furos SM 04, 05, 06 e 07.

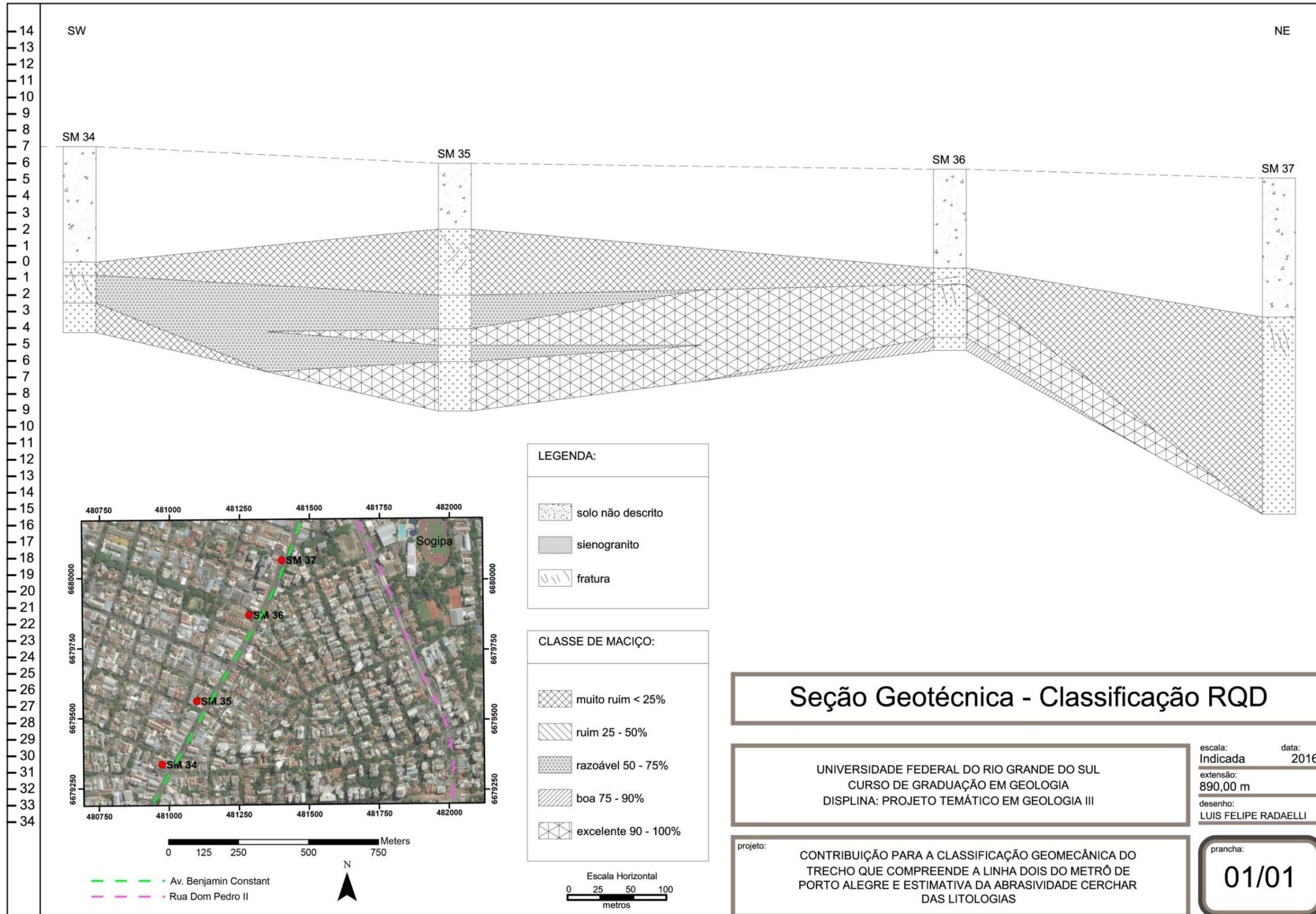


Figura 20 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no segundo subtrecho, furos SM 34, 35, 36 e 37.

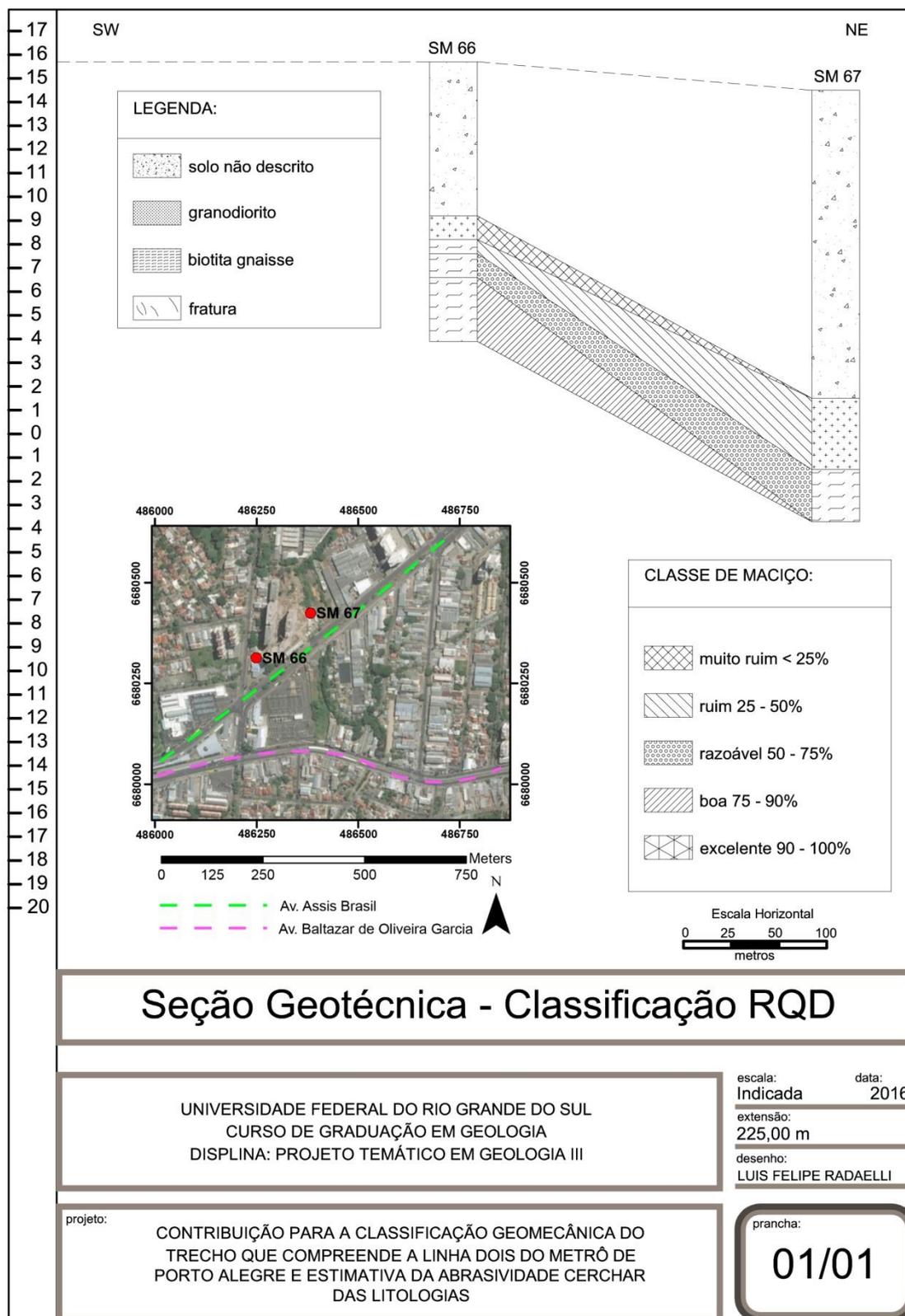


Figura 21- Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67.

Figura 21 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67.

#### 7.4.2. *Rock Mass Rating* – Sistema RMR

O segundo sistema de classificação a ser aplicado foi o Sistema RMR. Com os dados coletados durante as fases anteriores do projeto foi possível realizar a aplicação do RMR básico. O sexto parâmetro do RMR não foi possível ser incluído na classificação uma vez que os dados que se possui das sondagens realizadas, não apresentam informação de que tenham sido realizadas de maneira orientada.

A primeira seção geotécnica com a Classificação RMR (Figura 22) abrangeu os furos SM 04 a SM 07 e apresentou as Classes Geomecânicas II e III. Nesse caso a Classe II é composta por granitoide predominantemente são (A1 – A2), coerente (C1), pouco fraturado (E4), com RQD médio próximo de 90 e pouca presença de água. A Classe III por sua vez é composta por granitoide mais alterado (A2 – A3), rocha menos coerente (C2), por vezes muito fraturado (E2 – E3) e RQD médio próximo de 60 e presença intensa de água.

A segunda seção geotécnica com a Classificação RMR (Figura 23) abrangeu os furos SM 34 a SM 37 e apresentou as Classes Geomecânicas III e IV. A Classe III é composta por granitoide mais alterado (A2 – A3), rocha menos coerente (C2), por vezes muito fraturado (E2 – E3) e RQD médio abaixo de 50 e presença de água. Em porções mais profundas encontra-se rocha mais sã (A1) e menos fraturada (E3 – E4), porém é menos representativo do que possivelmente fara parte da parte que será escavada para o túnel e ira compor a abóbada. A Classe IV é composta por granitoide muito alterado e muito fraturado em sua grande parte e não se encontra rocha sã no furo de sondagem SM 37

## A terceira seção geotécnica com a Classificação RMR (

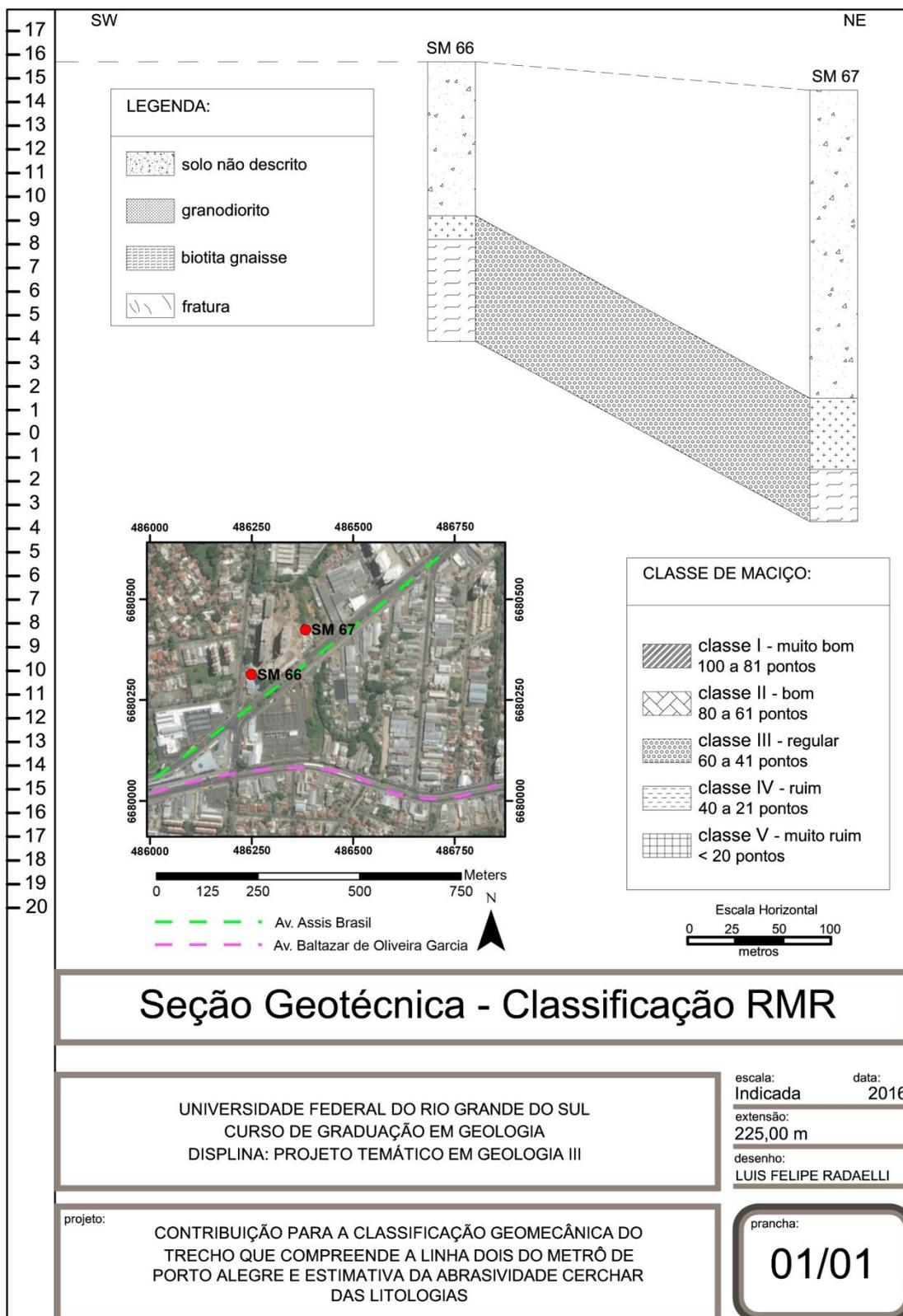


Figura 24) abrangeu os furos SM 66 e SM 67 e apresentou a Classe Geomecânica III. A Classe III é composta por granitoide e biotita gnaisses mais

alterados (A2 – A3), rocha menos coerente (C2 – C3), moderadamente fraturado (E3) e RQD médio próximo de 50 e presença moderada de água. Em porções mais profundas até se encontraria um classe geomecânica superior, porém optou-se por representar a classe que seria mais representativa no caso de uma escavação e que provavelmente iria compor a abobada do túnel.

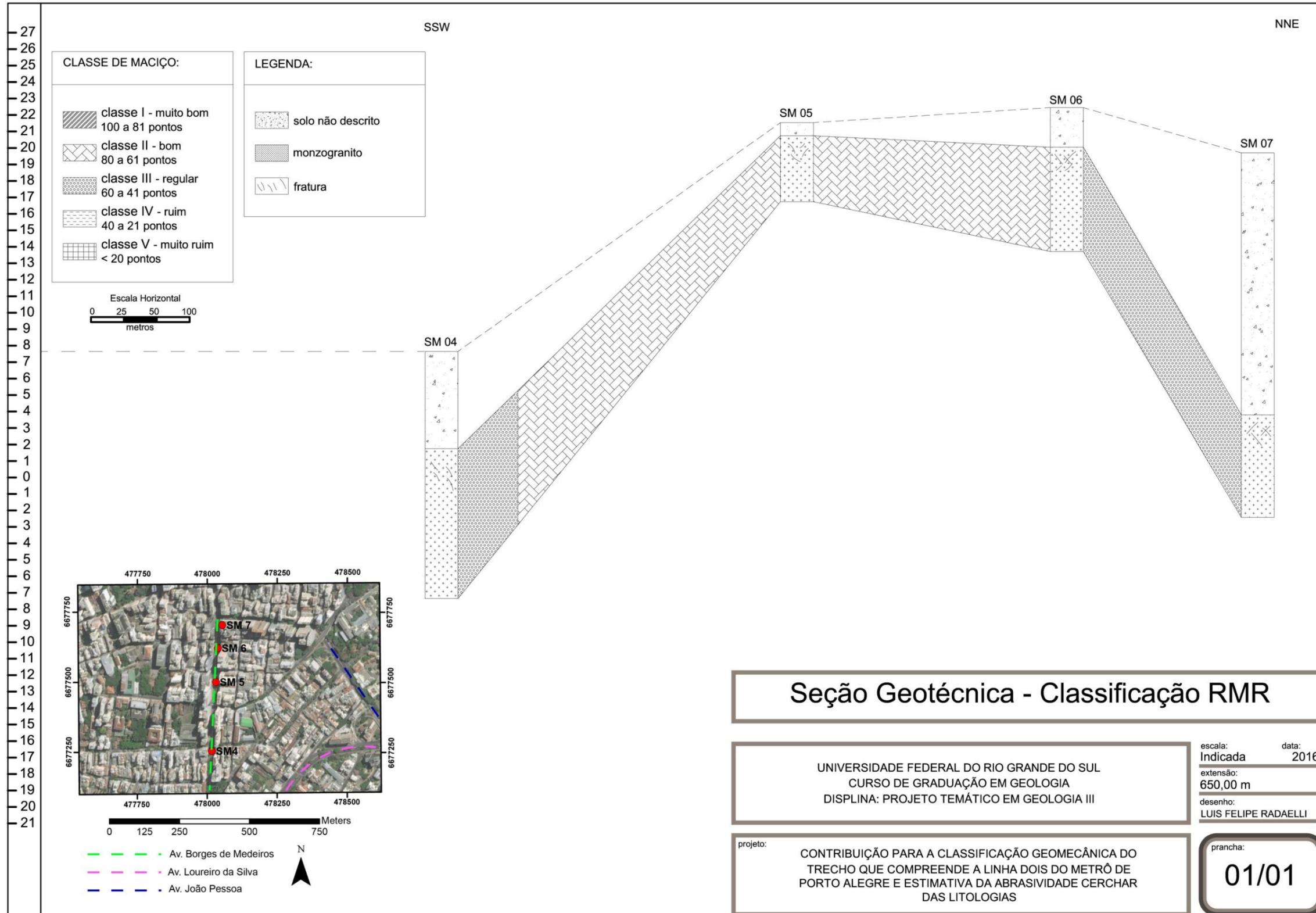


Figura 22 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RMR aplicado no primeiro subtrecho, furos SM 04, 05, 06 e 07.

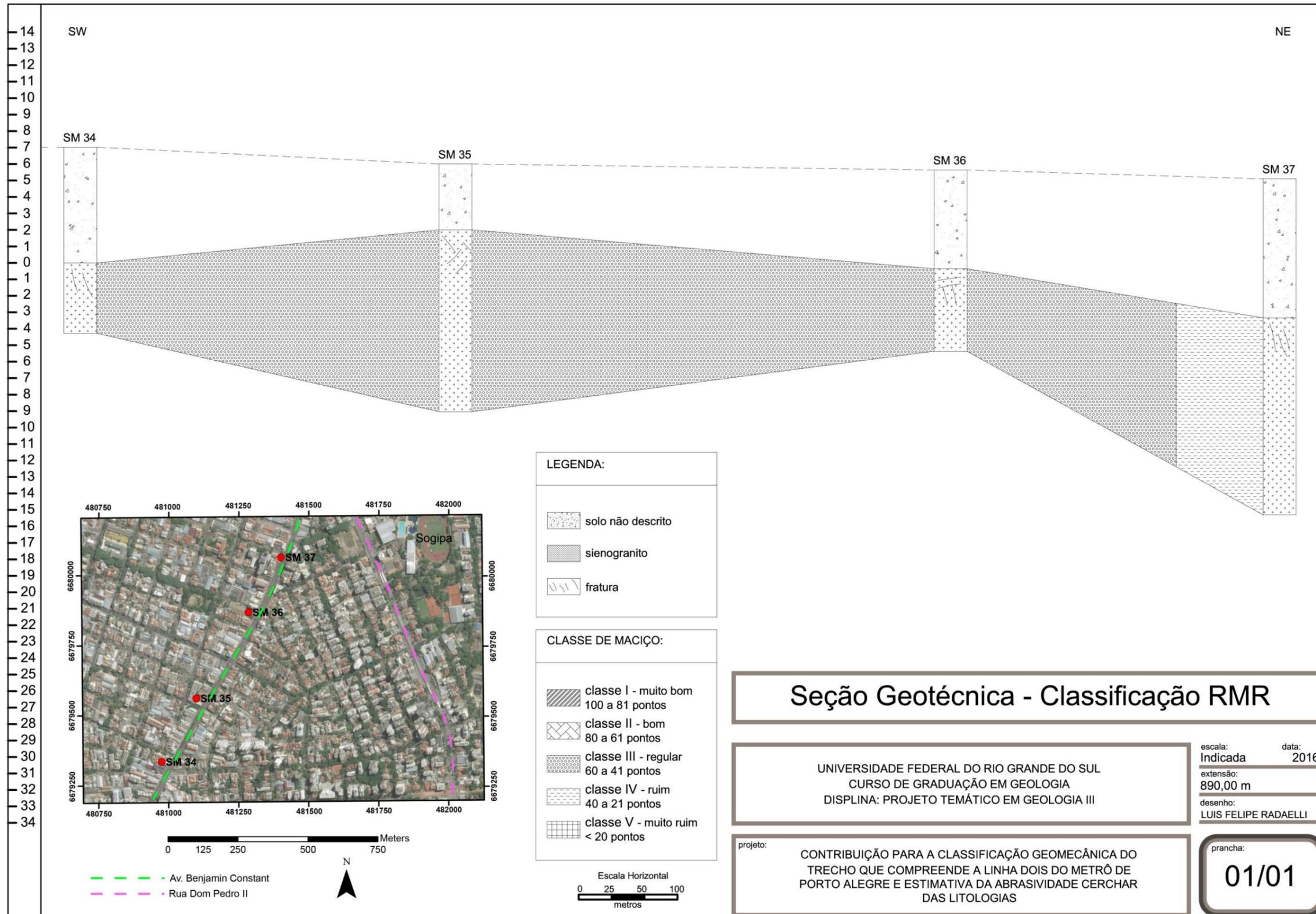


Figura 23 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RMR aplicado no segundo subtrecho, furos SM 34, 35, 36 e 37.

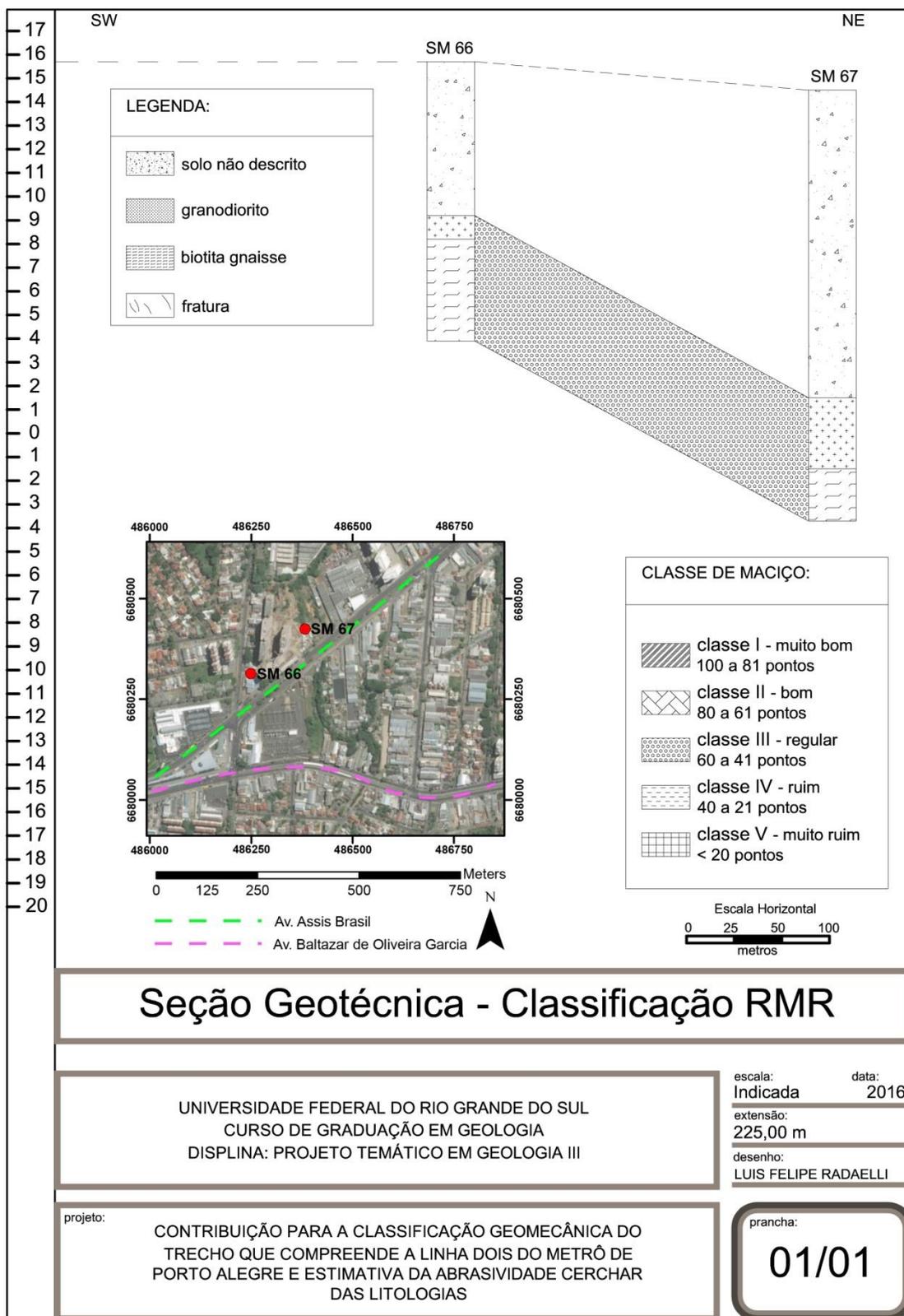


Figura 24 - Seção Geotécnica com sistema de classificação RQD aplicado no terceiro subtrecho, furos SM 66 e 67.

É possível estimar o tempo de autossustentação, conhecendo o RMR de cada trecho e estimando um vão livre para o túnel (Figura 25). A Classe Geomecânica II, presente no primeiro subtrecho possui tempo de autossustentação estimado na ordem de anos. A Classe Geomecânica III, presente em todos subtrechos possui tempo de autossustentação estimado na ordem de semanas a meses. E a Classe Geomecânica IV presente no segundo subtrecho, tem tempo de autossustentação estimado na ordem de horas.

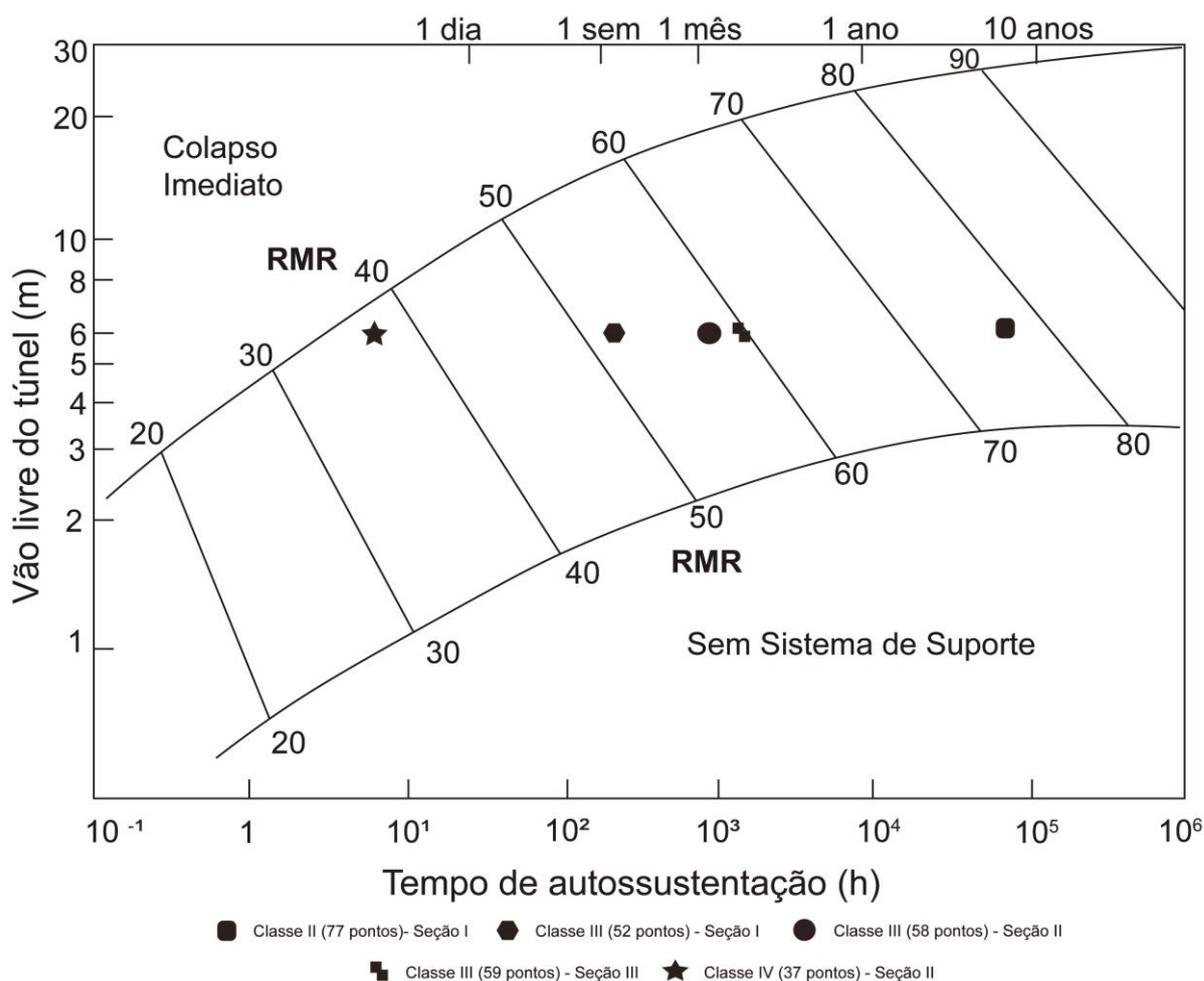


Figura 25 – Estimativa do tempo de autossustentação para um túnel de 6 metros de diâmetro (modificado de Bieniawski, 1989).

Por hora o tipo de escavação e sistema de suporte recomendado para as classes geomecânicas podem ser conferidos abaixo (Quadro 1).

CLASSE RMR	TIPO DE ESCAVAÇÃO	ANCORAGEM (20 mm com injeção)	CONCRETO PROJETADO	CAMBOTAS METÁLICAS
I	Seção plena, 3 m de avanço	Geralmente não é necessário. Requer apenas ancoragens isoladas.		
II	Seção plena, 1 a 1,5 m de avanço. Suporte executado até 20 m da frente da escavação.	Pontos localizados, ancoragem na abóbada com 3 m de comprimento. Espaçamento de 2,5 m. Eventuais malhas de proteção.	Se necessário, 50 mm na abóbada.	Não utilizar.
III	Calota e bancada, 1,5 a 3 m de avanço da calota. Suporte colocado após cada fogo. Suporte executado até a 10 m da face.	Sistemática, ancoragem de 4 m com espaçamento de 1,5 a 2 m na abóbada e paredes, com malhas de proteção no teto.	50 a 100 mm na abóbada e 30 mm nas paredes.	Não utilizar.
IV	Calota e bancada, 1 a 1,5 m de avanço da calota. Instalação do suporte concomitantemente à escavação. Suporte executado até 10 m da face.	Sistemática, ancoragem de 4 a 5 m com espaçamento de 1 a 1,5 m na abóbada e paredes, com malhas de proteção no teto.	100 a 150 mm na abóbada e 100 mm nas paredes	Quando necessário elementos leves a médios, espaçamento de 1,5 m.
V	Seções múltiplas, 0,5 a 1,5 m de avanço da calota. Instalação de suporte concomitante à escavação. Concreto projetado após cada fogo.	Sistemática, ancoragem de 5 a 6 m com espaçamento de 1 a 1,5 m na abóbada e paredes, com malhas de proteção no teto.	150 a 200 mm na abóbada, 150 mm nas paredes e 50 mm na face.	Elementos médios a pesados, espaçamento de 0,75 e cravação de pranchas se necessário. Fechamento do arco invertido.

Quadro 1 – Sistema de suporte e escavação para túneis com vão de 10 m (modificado de Bieniawski, 1989).

Esse zoneamento geomecânico feito com o uso de furos de sondagens poderá sofrer variações e ajustes durante as escavações. Os processos de desmontes poderão piorar as características do maciço rochoso. Bem como poderá se perceber que a Classificação Geomecânica foi subestimada e o maciço rochoso ter um desempenho superior.

#### 7.5. ABRASIVIDADE CERCHAR

Os ensaios de abrasividade CERCHAR foram realizados para os três subtrechos avaliados dentro do trecho que compõem a Linha Dois do Metrô de Porto Alegre. Os valores médios de CERCHAR dos três trechos avaliados foram plotados no gráfico de vida útil de discos de corte de Maidl et al. (2001). Neste gráfico são

utilizados os parâmetros de CERCHAR combinados com a resistência a compressão uniaxial (Figura 26).

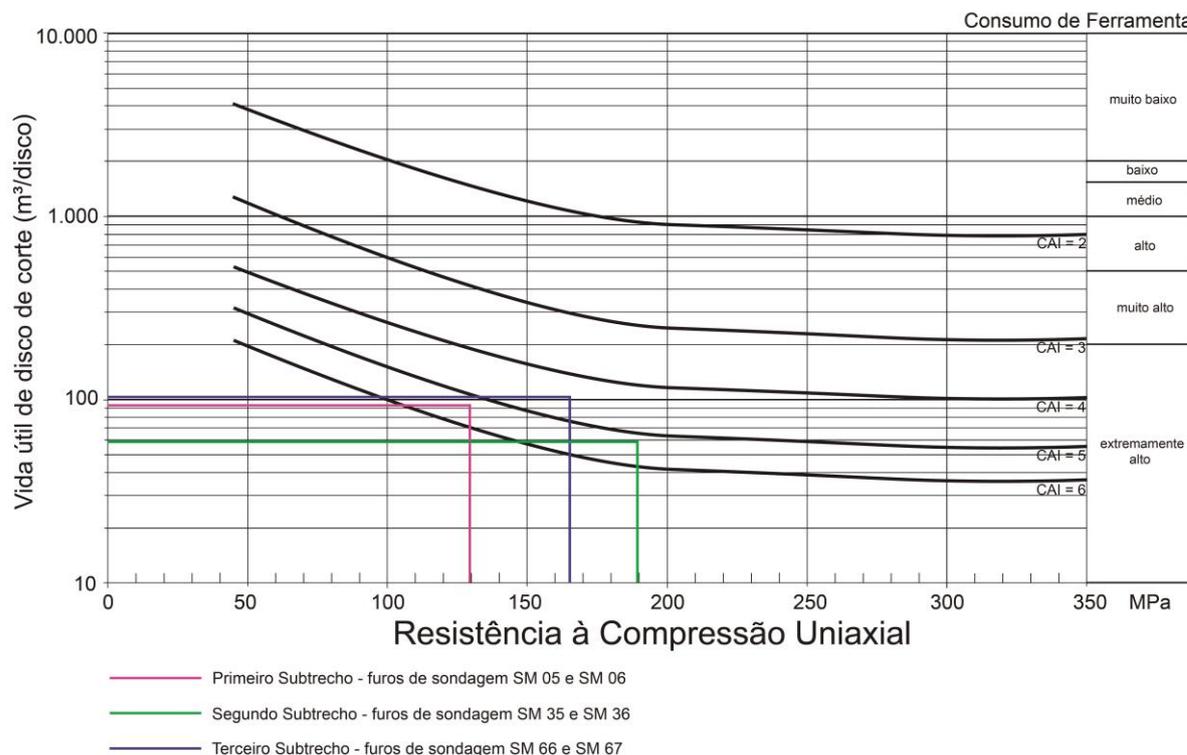


Figura 26 – Resultados para os três subtrechos analisados da relação de vida útil de disco de corte, resistência a compressão uniaxial e índice de abrasividade CERCHAR (Maidl et al. 2001).

Para o primeiro subtrecho foi considerado resistência a compressão uniaxial média de 129,8 MPa e CERCHAR médio de 5,4 resultando em uma vida útil de, aproximadamente, 95 m<sup>3</sup>/disco de corte. Esta vida útil implica em um consumo de ferramentas de corte, para desgaste primário, classificado como extremamente alto. Para o segundo subtrecho foi considerado resistência a compressão uniaxial média de 189,6 MPa e CERCHAR médio de 5,3 resultando em uma vida útil de, aproximadamente, 110 m<sup>3</sup>/disco de corte. Esta vida útil implica em um consumo de ferramentas de corte, para desgaste primário, classificado como extremamente alto. Para o terceiro e último subtrecho foi considerado resistência a compressão uniaxial média de 164,9 MPa e CERCHAR médio de 4,5, resultando em uma vida útil de, aproximadamente, 60 m<sup>3</sup>/disco de corte. Esta vida útil implica em um consumo de ferramentas de corte, para desgaste primário, classificado como extremamente alto.

## 8. CONCLUSÃO

A Classificação RQD se mostrou muito heterogênea, o maciço acabou sendo compartimentado muitas vezes. Em comparação com a Classificação RQD, a Classificação Geomecânica RMR permitiu compartimentar os subtrechos em classes geomecânicas de forma mais homogênea, uma vez que diversos fatores estavam sendo ponderados para se obter o resultado em comparação a um único fator da Classificação RQD.

Nos subtrechos analisados há a predominância de maciços rochosos de classe II e III na Classificação Geomecânica RMR de Bieniawski com aparecimento localizado da classe IV. Um resumo das características dos subtrechos é apresentado abaixo (Tabela 12), onde  $c$  é coesão,  $\Phi$  é ângulo de atrito,  $E_m$  é módulo de deformabilidade e  $IAC$  é índice de abrasividade CERCHAR.

Tabela 12 – Resumo das características geomecânicas de cada subtrechos estudado.

Subtrecho	Classe de Maciço RMR	Tempo de Autossustentação	Parâmetros de Resistência	Suporte Recomendado
1	II / III	Classe II = anos Classe III = semanas	$c$ (kPa) = 400 a 200	Ancoragem de 4 m de comprimento de forma sistemática na abóbada e paredes. Concreto projetado 50 a 100 mm na abóbada e 30 mm nas paredes. Cambotas metálicas não necessárias.
			$\Phi$ = 25 a 45°	
			$E_m$ (GPa) = II 54 / III 04	
			$IAC$ (1/10 mm) = 5,4	
2	III / IV	Classe III = meses Classe IV = horas	$c$ (kPa) = 300 a 100	Ancoragem de 5 m de comprimento de forma sistemática na abóbada e paredes. Concreto projetado 100 a 150 mm na abóbada e 100 mm nas paredes. Cambotas metálicas leves se necessárias.
			$\Phi$ = 15 a 35°	
			$E_m$ (GPa) = III 16 / IV 4,7	
			$IAC$ (1/10 mm) = 5,3	
3	III	Classe III = meses	$c$ (kPa) = 300 a 200	Ancoragem de 4 m de comprimento de forma sistemática na abóbada e paredes. Concreto projetado 50 a 100 mm na abóbada e 30 mm nas paredes. Cambotas metálicas não necessárias.
			$\Phi$ = 25 a 35°	
			$E_m$ (GPa) = 18	
			$IAC$ (1/10 mm) = 4,5	

Apesar de os resultados aqui obtidos e discutidos serem apenas uma previsão que poderá vir a se confirmar ou não, já são um bom ponto de partida para poder se definir avanço de escavação e sistema de suporte, para que apenas pequenos ajustes precisem ser realizados no decorrer da obra de engenharia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015) NBR 15845. Rochas para Revestimento – Métodos de Ensaio – Anexo A. p. 32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015) NBR 15845. Rochas para Revestimento – Métodos de Ensaio – Anexo B. p. 32.

ALENCAR, Carlos Rubens Araujo, INSTITUTO EUVALDO LODI, 1969 - Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais / Instituto Euvaldo Lodi - Regional do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim/ES: IEL, 2013. 242 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. 2012. Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. Designation D7625-10, 6 p.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). Engineering Rock Mass Classification. New York, John Willey. p. 251.

DEERE, D. U.; MILLER, R. P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rocks, U. S. Air Force Weapons Lab. p. 65 – 116.

GONZATTI, C.; PHILIPP, R. P. (2009). Características Tecnológicas de Rochas Ornamentais do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre : CIENTEC. p. 74.

ISRM. (1981). Suggested Method for Basic Geotechnical Description of Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 18. p. 87 – 110.

ISRM. (1985). Suggested Method for Determining Point Load Strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 22. p. 51 – 60.

ISRM. (2014). Upgrade Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. In: The ISRM Suggested Method for Rock Characterization, Testing and Monitoring. p. 95 – 100.

MAIDL B., SCHMID L., RITZ W., HERRENKNECHT M. 2001. Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein. Ernst & Sohn, 350 p.

MELO, M.M. 2010. Caracterização e compartimentação geológica e geomecânica de maciço basáltico heterogêneo, aplicados a engenharia. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, 183p.

MONTEIRO, M. D.; ROCHA, H. C., 2015. A abrasividade de rochas nos estudos do metrô de São Paulo. Revista Brasileira de Engenharia e Ambiental. p. 71 – 86.

NOGOSEKE., E., 2009. Compartimentação de Maciços Rochosos para Projetos Básicos de PCH'S usando o sistema RMR: Aplicação no projeto básico da PCH Morro Grande – RS. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 125p.

PHILIPP R.P., NARDI L.V.S., MACHADO R. 1998. O Magmatismo Granítico Neoproterozóico tardi a pós-colisional da região de Porto Alegre, RS. In: *Contribuição ao estudo dos granitos e rochas correlatas*. SBG, Núcleo Bahia-Sergipe, Pub. Esp., 5, pp.: 129-152.

PHILIPP, R.P., MACHADO, R., NARDI, L.V.S., LAFON, J.M., 2002. O magmatismo Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências* 32 (2), 277–290.

PHILIPP, R.P., DE CAMPOS, R.S., 2004. Geologia, Petrografia e Litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: Implicações Geotectônicas. *Revista Pesquisas em Geociências*, 31 (2): 79-94.

PHILIPP, R.P., MACHADO, R., 2005. The Late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. In: *Journal of South American Earth Sciences* 19, 461-478.

PHILIPP, R.P., VARGAS, J.A., Di BENEDETTI, V., 2009. A memória geológica do centro antigo de Porto Alegre: o registro da evolução urbana nos prédios históricos e no urbanismo da cidade. *Revista Pesquisas em Geociências*, 36 (1): 59-77.

PLINNINGER, R. J.; THURO, K. (2004). Wear Prediction in Hardrock Excavation Using the CERCHAR Abrasiveness Index (CAI) – EUROCK 2004 & 53<sup>o</sup> Geomechanics Colloquium. In Schubert (ed.) 599 – 604.

SERRA JÚNIOR, E.; OJIMA, L. M. (1998). Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A.. *Geologia de Engenharia*. São Paulo. ABGE. Oficina de Texto. p. 211-226.

SCHNEIDER, A. W.; LOSS, E. L.; PINTO, J. F. 1974. Mapa geológico da Folha Porto Alegre, RS, escala 1:50,000, Porto Alegre, CNPq, mapa.

WEST, G. (1989): Technical Note - Rock Abrasiveness Testing for Tunnelling.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstr.*, 26, 2: 151-160.

## APÊNDICE A – ÍNDICES FÍSICOS, RESULTADOS DETALHADOS

SM 05									
CP	Massa Seca (A) (g)	Massa Saturada (B) (g)	Massa Imersa (C) (g)	B-A	B-C	MEA Seca (g/cm <sup>3</sup> )	MEA Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)
1	783,52	784,14	487,73	0,62	296,41	2,64	2,65	0,1	0,2
2	826,97	827,74	514,8	0,77	312,94	2,64	2,65	0,1	0,2
3	286,38	286,87	177,9	0,49	108,97	2,63	2,63	0,2	0,4
4	344,35	344,95	213,98	0,6	130,97	2,63	2,63	0,2	0,5
5	375,63	378,85	235,12	3,22	143,73	2,61	2,64	0,9	2,2
6	291,96	292,49	181,67	0,53	110,82	2,63	2,64	0,2	0,5
7	156,69	157,16	97,33	0,47	59,83	2,62	2,63	0,3	0,8

SM 06									
CP	Massa Seca (A) (g)	Massa Saturada (B) (g)	Massa Imersa (C) (g)	B-A	B-C	MEA Seca (g/cm <sup>3</sup> )	MEA Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)
1	583,07	585,75	361,65	2,68	224,1	2,60	2,61	0,5	1,2
2	500,82	503,07	310,79	2,25	192,28	2,60	2,62	0,4	1,2
3	512,8	515,06	318,31	2,26	196,75	2,61	2,62	0,4	1,1
4	620,39	623,22	384,92	2,83	238,3	2,60	2,62	0,5	1,2
5	882,59	885,78	547,82	3,19	337,96	2,61	2,62	0,4	0,9
6	608,07	610,58	377,18	2,51	233,4	2,61	2,62	0,4	1,1
7	584,07	587,25	362,83	3,18	224,42	2,60	2,62	0,5	1,4
8	910,29	916,05	566,82	5,76	349,23	2,61	2,62	0,6	1,6

SM 35									
CP	Massa Seca (A) (g)	Massa Saturada (B) (g)	Massa Imersa (C) (g)	B-A	B-C	MEA Seca (g/cm <sup>3</sup> )	MEA Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)
1	454,72	456,69	281,78	1,97	174,91	2,60	2,61	0,4	1,1
2	445,53	447,36	276,31	1,83	171,05	2,60	2,62	0,4	1,1
3	416,66	418,6	257,61	1,94	160,99	2,59	2,60	0,5	1,2
4	521,13	521,89	323,82	0,76	198,07	2,63	2,63	0,1	0,4
5	317,66	318,45	196,91	0,79	121,54	2,61	2,62	0,2	0,6
6	387,26	388,06	240,62	0,8	147,44	2,63	2,63	0,2	0,5
7	358,76	359,39	222,1	0,63	137,29	2,61	2,62	0,2	0,5
8	357,08	357,68	221,9	0,6	135,78	2,63	2,63	0,2	0,4
9	332,37	332,96	206,2	0,59	126,76	2,62	2,63	0,2	0,5
10	308,83	309,89	192,11	1,06	117,78	2,62	2,63	0,3	0,9
11	114,66	115,1	71,15	0,44	43,95	2,61	2,62	0,4	1,0

SM 36									
CP	Massa Seca (A) (g)	Massa Saturada (B) (g)	Massa Imersa (C) (g)	B-A	B-C	MEA Seca (g/cm <sup>3</sup> )	MEA Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)
1	520,5	520,85	323,43	0,35	197,42	2,64	2,64	0,1	0,2
2	273,63	273,85	170,07	0,22	103,78	2,64	2,64	0,1	0,2
3	323,5	323,75	201,47	0,25	122,28	2,65	2,65	0,1	0,2
4	279,11	279,29	173,4	0,18	105,89	2,64	2,64	0,1	0,2
5	325,04	325,36	201,74	0,32	123,62	2,63	2,63	0,1	0,3
6	286,22	286,52	177,74	0,3	108,78	2,63	2,63	0,1	0,3
7	304,76	304,96	189,32	0,2	115,64	2,64	2,64	0,1	0,2
8	251,6	251,87	156,15	0,27	95,72	2,63	2,63	0,1	0,3
9	469,58	470,62	290,02	1,04	180,6	2,60	2,61	0,2	0,6
10	309,42	309,7	192,03	0,28	117,67	2,63	2,63	0,1	0,2
11	298,24	298,54	185,11	0,3	113,43	2,63	2,63	0,1	0,3

SM 66									
CP	Massa Seca (A) (g)	Massa Saturada (B) (g)	Massa Imersa (C) (g)	B-A	B-C	MEA Seca (g/cm <sup>3</sup> )	MEA Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)
1	661,47	661,68	416	0,21	245,68	2,69	2,69	0,0	0,1
2	527,68	527,88	329,84	0,2	198,04	2,66	2,67	0,0	0,1
3	670,62	670,87	421,5	0,25	249,37	2,69	2,69	0,0	0,1
4	519,89	520,1	326,36	0,21	193,74	2,68	2,68	0,0	0,1
5	597,92	598,42	374,76	0,5	223,66	2,67	2,68	0,1	0,2
6	496,09	496,25	311,36	0,16	184,89	2,68	2,68	0,0	0,1
7	477,6	477,79	299,85	0,19	177,94	2,68	2,69	0,0	0,1
8	427,55	427,81	268,58	0,26	159,23	2,69	2,69	0,1	0,2

SM 67									
CP	Massa Seca (A) (g)	Massa Saturada (B) (g)	Massa Imersa (C) (g)	B-A	B-C	MEA Seca (g/cm <sup>3</sup> )	MEA Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água Aparente (%)	Porosidade Aparente (%)
1	1053,87	1055,72	658,82	1,85	396,9	2,66	2,66	0,2	0,5
2	926,57	927,1	582,21	0,53	344,89	2,69	2,69	0,1	0,2
3	592,65	593,01	371,11	0,36	221,9	2,67	2,67	0,1	0,2
4	845,97	846,43	530,94	0,46	315,49	2,68	2,68	0,1	0,1
5	379,75	379,98	238,53	0,23	141,45	2,68	2,69	0,1	0,2
6	720,41	721	449,72	0,59	271,28	2,66	2,66	0,1	0,2
7	745,38	745,92	467,7	0,54	278,22	2,68	2,68	0,1	0,2

## APÊNDICE B – VELOCIDADE SÔNICA, RESULTADOS DETALHADOS

SM 05					
CP	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Tempo de Percurso (µs)	Vp (km/s)
1	54,39	128,98	299522,98	25,3	5,10
2	54,46	137	318966,81	26,7	5,13
3	42	80,26	111139,23	15,3	5,25
4	41,83	96,74	132877,51	18,7	5,17
5	41,84	105,25	144635,57	20,6	5,11

SM 06					
CP	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Tempo de Percurso (µs)	Vp (km/s)
1	54,14	98,58	226827,12	32,2	3,06
2	54,4	84	195140,20	20,7	4,06
3	54,42	85,52	198817,42	25,5	3,35
4	54,21	103,85	239571,40	31,9	3,26
5	53,79	149,83	340307,50	41,2	3,64
6	54,22	101,48	234190,43	28,5	3,56
7	54,18	98,64	227300,67	27,2	3,63

<b>SM 35</b>					
<b>CP</b>	<b>Diametro (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Volume (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tempo de Percurso (μs)</b>	<b>Vp (km/s)</b>
1	41,59	129,27	175527,53	28,9	4,47
2	41,73	127,61	174442,03	29,6	4,31
3	41,8	118,75	162875,53	27,6	4,30
4	41,82	144,74	198713,00	27,6	5,24
5	41,4	91,38	122948,01	17,6	5,19
6	36,18	149,81	153938,62	30,6	4,90
7	35,68	137,59	137501,11	27,3	5,04
8	36,04	134,31	136945,44	25,4	5,29
9	36,01	126,5	128767,55	25,3	5,00

<b>SM 36</b>					
<b>CP</b>	<b>Diametro (mm)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Volume (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tempo de Percurso (μs)</b>	<b>Vp (km/s)</b>
1	36,3	190,27	196812,75	33,7	5,65
2	36,36	100,86	104673,41	17,6	5,73
3	35,8	122,86	123607,90	21,4	5,74
4	35,83	105,57	106390,73	18,7	5,65
5	36,29	120,15	124213,09	21,4	5,61
6	36,36	106,57	110599,30	19,1	5,58
7	36,37	112,26	116568,52	19,7	5,70
8	36,32	92,97	96272,93	17,2	5,41
9	35,74	181,13	181622,29	34,8	5,20
10	36,22	114,88	118307,15	20,6	5,58
11	36,32	110,65	114581,04	19,8	5,59

SM 66					
CP	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Tempo de Percurso (μs)	Vp (km/s)
1	54,16	107,66	247902,75	17,9	6,01
2	54,88	84,04	198693,61	14,6	5,76
3	54,28	108,62	251222,85	18,5	5,87
4	54,27	84,08	194393,62	14,7	5,72
5	54,75	96,23	226437,52	17,7	5,44
6	54,57	79,66	186216,37	13,5	5,90
7	54,56	76,58	178950,84	13,1	5,85
8	54,85	68,08	160783,87	12,4	5,49

SM 67					
CP	Diametro (mm)	Altura (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Tempo de Percurso (μs)	Vp (km/s)
1	54,42	170,18	395635,50	35,3	4,82
2	54,46	148,34	345368,88	26,7	5,56
3	54,53	95,6	223150,85	16,7	5,72
4	54,54	136,48	318690,37	24	5,69
5	54,49	60,95	142061,69	10,9	5,59
6	54,52	116,63	272139,53	20	5,83
7	54,45	120,53	280517,90	21,9	5,50

### APÊNDICE C – CARGA PONTUAL, RESULTADOS DETALHADOS

SM 05									
CP	Tipo	Altura (mm)	Carga (kN)	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (Mpa)	F	I <sub>s(50)</sub> MPa	Obs.
1	d	54,39	25,20	54,4	2958,3	8,86	1,04	9,20	expurgado
2	d	54,46	26,00	54,5	2965,9	8,77	1,04	9,11	expurgado
3	d	42,00	16,40	42,0	1764,0	9,30	0,92	8,60	
4	d	41,83	15,20	41,8	1749,7	8,69	0,92	8,02	
5	d	41,84	16,00	41,8	1750,6	9,14	0,92	8,44	
I <sub>s(50)</sub> médio									8,35
DP									0,49
∂c = 20 * I <sub>s(50)</sub> médio									167,0

SM 06									
CP	Tipo	Altura (mm)	Carga (kN)	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (Mpa)	F	I <sub>s(50)</sub> MPa	Obs.
1	d	54,14	12,00	54,14	2931,14	4,09	1,04	4,24	
2	d	54,40	4,30	54,40	2959,36	1,45	1,04	1,51	expurgado
3	d	54,42	12,80	54,42	2961,54	4,32	1,04	4,49	
4	d	54,21	12,80	54,21	2938,72	4,36	1,04	4,52	
5	d	53,79	14,20	53,79	2893,36	4,91	1,03	5,07	
6	d	54,22	14,40	54,22	2939,81	4,90	1,04	5,08	expurgado
7	d	54,18	13,60	54,18	2935,47	4,63	1,04	4,80	
I <sub>s(50)</sub> médio									4,63
DP									1,25
∂c = 20 * I <sub>s(50)</sub> médio									92,5

SM 35									
CP	Tipo	Altura (mm)	Carga (kN)	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (Mpa)	F	I <sub>s(50)</sub> MPa	Obs.
1	d	41,59	9,80	41,59	1729,73	5,67	0,92	5,22	expurgado
2	d	41,73	11,40	41,73	1741,39	6,55	0,92	6,03	
3	d	4180	11,40	4180	1747,24	6,52	0,92	6,02	expurgado
4	d	41,82	19,20	41,82	1748,91	10,98	0,92	10,13	expurgado
5	d	41,40	14,20	41,40	1713,96	8,28	0,92	7,61	
6	d	36,01	13,40	36,01	1296,72	10,33	0,86	8,91	
7	d	35,68	14,80	35,68	1273,06	11,63	0,86	9,99	
8	d	36,04	12,80	36,04	1298,88	9,85	0,86	8,50	
<b>I<sub>s(50)</sub>médio</b>									8,21
<b>DP</b>									1,89
<b>∂c = 20 * I<sub>s(50)</sub> médio</b>									164,2

SM 36									
CP	Tipo	Altura (mm)	Carga (kN)	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (Mpa)	F	I <sub>s(50)</sub> MPa	Obs.
1	d	36,22	15,00	36,22	1311,89	11,43	0,86	9,89	expurgado
2	d	36,36	17,60	36,36	1322,05	13,31	0,87	11,53	expurgado
3	d	35,80	17,40	35,80	1281,64	13,58	0,86	11,68	
4	d	35,83	16,00	35,83	1283,79	12,46	0,86	10,73	
5	d	36,29	15,60	36,29	1316,96	11,85	0,87	10,25	expurgado
6	d	36,36	15,80	36,36	1322,05	11,95	0,87	10,36	
7	d	36,37	17,80	36,37	1322,78	13,46	0,87	11,66	expurgado
8	d	36,32	15,60	36,32	1319,14	11,83	0,87	10,24	
<b>I<sub>s(50)</sub>médio</b>									10,75
<b>DP</b>									0,73
<b>∂c = 20 * I<sub>s(50)</sub> médio</b>									215,0

SM 66									
CP	Tipo	Altura (mm)	Carga (kN)	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (Mpa)	F	I <sub>s(50)</sub> MPa	Obs.
1	d	54,16	22,00	54,16	2933,31	7,50	1,04	7,77	
2	d	54,88	30,60	54,88	3011,81	10,16	1,04	10,59	expurgado
3	d	54,28	28,80	54,28	2946,32	9,77	1,04	10,14	expurgado
4	d	54,27	22,20	54,27	2945,23	7,54	1,04	7,82	
5	d	54,75	19,00	54,75	2997,56	6,34	1,04	6,60	expurgado
6	d	54,57	25,60	54,57	2977,88	8,60	1,04	8,94	
7	d	54,56	25,40	54,56	2976,79	8,53	1,04	8,87	
8	d	54,85	23,60	54,85	3008,52	7,84	1,04	8,18	
<b>I<sub>s(50)</sub>médio</b>									8,32
<b>DP</b>									1,31
<b>∂c = 20 * I<sub>s(50)</sub> médio</b>									166,4

SM 67									
CP	Tipo	Altura (mm)	Carga (kN)	De (mm)	De <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	I <sub>s</sub> (Mpa)	F	I <sub>s(50)</sub> MPa	Obs.
1	d	54,42	13,20	54,42	2961,54	4,46	1,04	4,63	expurgado
2	d	54,46	15,40	54,46	2965,89	5,19	1,04	5,40	expurgado
3	d	54,53	29,60	54,53	2973,52	9,95	1,04	10,35	expurgado
4	d	54,54	21,80	54,54	2974,61	7,33	1,04	7,62	
5	d	54,49	24,60	54,49	2969,16	8,29	1,04	8,61	
6	d	54,52	26,00	54,52	2972,43	8,75	1,04	9,09	
7	d	54,45	22,20	54,45	2964,80	7,49	1,04	7,78	
<b>I<sub>s(50)</sub>médio</b>									8,28
<b>DP</b>									2,02
<b>∂c = 20 * I<sub>s(50)</sub> médio</b>									165,5

## APÊNDICE D – ABRASIVIDADE CERCHAR, RESULTADOS DETALHADOS

SM 05				
Nº de Leituras	Leituras Individuais	IAC (1/10 mm)	IAC <sub>médio</sub> Móvel (1/10mm)	DP Móvel (1/10mm)
1	0,5	5,9	5,9	-
2	0,44	5,2	5,6	0,50
3	0,4	4,7	5,3	0,60
4	0,64	7,6	5,9	1,25
5	0,58	6,9	6,1	1,17
6	0,52	6,2	6,1	1,05
7	0,3	3,6	5,7	1,35
8	0,38	4,5	5,6	1,32
9	0,4	4,7	5,5	1,27
10	0,4	4,7	5,4	1,22
			IAC <sub>médio</sub> (1/10mm)	5,4
			DP (1/10mm)	1,22

SM 06				
Nº de Leituras	Leituras Individuais	IAC (1/10 mm)	IAC <sub>médio</sub> Móvel (1/10mm)	DP Móvel (1/10mm)
1	0,42	5,0	5,0	-
2	0,56	6,6	5,8	1,17
3	0,52	6,2	5,9	0,86
4	0,44	5,2	5,8	0,78
5	0,42	5,0	5,6	0,76
6	0,43	5,1	5,5	0,71
7	0,38	4,5	5,4	0,75
8	0,61	7,2	5,6	0,96
9	0,32	3,8	5,4	1,08
10	0,3	3,6	5,2	1,17
			IAC <sub>médio</sub> (1/10mm)	5,2
			DP (1/10mm)	1,17

<b>SM 35</b>				
Nº de Leituras	Leituras Individuais	IAC (1/10 mm)	IAC <sub>médio</sub> Móvel (1/10mm)	DP Móvel (1/10mm)
1	0,61	7,2	7,2	-
2	0,4	4,7	6,0	1,76
3	0,33	3,9	5,3	1,73
4	0,59	7,0	5,7	1,65
5	0,66	7,8	6,1	1,71
6	0,47	5,6	6,0	1,55
7	0,38	4,5	5,8	1,53
8	0,36	4,3	5,6	1,52
9	0,33	3,9	5,4	1,53
10	0,37	4,4	5,3	1,48
IAC <sub>médio</sub> (1/10mm)				5,3
DP (1/10mm)				1,48

<b>SM 36</b>				
Nº de Leituras	Leituras Individuais	IAC (1/10 mm)	IAC <sub>médio</sub> Móvel (1/10mm)	DP Móvel (1/10mm)
1	0,44	5,2	5,2	-
2	0,53	6,3	5,8	0,75
3	0,48	5,7	5,7	0,53
4	0,44	5,2	5,6	0,51
5	0,44	5,2	5,5	0,47
6	0,5	5,9	5,6	0,45
7	0,43	5,1	5,5	0,45
8	0,27	3,2	5,2	0,92
9	0,53	6,3	5,3	0,93
10	0,47	5,6	5,4	0,88
IAC <sub>médio</sub> (1/10mm)				5,4
DP (1/10mm)				0,88

<b>SM 66</b>				
Nº de Leituras	Leituras Individuais	IAC (1/10 mm)	IAC <sub>médio</sub> Móvel (1/10mm)	DP Móvel (1/10mm)
1	0,27	3,2	3,2	-
2	0,27	3,2	3,2	0,00
3	0,42	5,0	3,8	1,03
4	0,52	6,2	4,4	1,45
5	0,4	4,7	4,5	1,27
6	0,45	5,3	4,6	1,19
7	0,38	4,5	4,6	1,09
8	0,5	5,9	4,8	1,11
9	0,36	4,3	4,7	1,05
10	0,48	5,7	4,8	1,04
			IAC <sub>médio</sub> (1/10mm)	4,8
			DP (1/10mm)	1,04

<b>SM 67</b>				
Nº de Leituras	Leituras Individuais	IAC (1/10 mm)	IAC <sub>médio</sub> Móvel (1/10mm)	DP Móvel (1/10mm)
1	0,39	4,6	4,6	-
2	0,38	4,5	4,6	0,08
3	0,48	5,7	4,9	0,65
4	0,34	4,0	4,7	0,70
5	0,37	4,4	4,6	0,62
6	0,39	4,6	4,6	0,56
7	0,27	3,2	4,4	0,75
8	0,37	4,4	4,4	0,69
9	0,41	4,9	4,5	0,66
10	0,25	3,0	4,3	0,79
			IAC <sub>médio</sub> (1/10mm)	4,3
			DP (1/10mm)	0,79