



**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS DE DRENAGEM DA UHE ITAÚBA  
ATRAVÉS DA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR DE BIENIAWSKI**

**PORTO ALEGRE, 2015**

## **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**Reitor:** Carlos Alexandre Netto

**Vice-Reitor:** Rui Vicente Oppermann

## **INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Ribeiro, Manoela Brandelli

Análise da Estabilidade dos Túneis de Drenagem da UHE Itaúba Através da Classificação Geomecânica RMR de Bieniawski . / Manoela Brandelli Ribeiro. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015. [75 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es): Clovis Gonzatti  
Coorientador(es): Antonio Pedro Viero

1. Caracterização Geomecânica 2. Classificação RMR 3. Mapeamento Geotécnico 4. UHE Itaúba. I. Título.

CDU 55

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Veleida Ana Blank

CRB 10/571

**MANOELA BRANDELLI RIBEIRO**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS DE DRENAGEM DA UHE ITAÚBA  
ATRAVÉS DA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR DE BIENIAWSKI**

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.

Orientadores: Prof. Dr. Clovis Gonzatti

Prof. Dr. Antonio Pedro Viero

Porto Alegre, 2015

**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 “ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TÚNEIS DE DRENAGEM DA UHE ITAÚBA ATRAVÉS DA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR DE BIENIAWSKI”, elaborado por Manoela Brandelli Ribeiro, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa

---

Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani

---

Dr. Marcos Alexandre de Freitas

## AGRADECIMENTOS

A conclusão da graduação em geologia representa além de um objetivo concluído, representa uma bagagem de conhecimentos e experiências que são pra vida. Agradeço aos meus pais, pela vida e principalmente à minha mãe por me incentivar a sempre seguir em frente. Aos meus avós, que foram também meus pais, por todo amparo e cuidado. Às minhas queridas tias Sali e Nina por sempre fazerem tudo por mim. Agradeço à minha amada amiga e irmã Mariana, por enfrentar junto todas as pedras no caminho, assim como as alegrias. Agradeço com muito amor ao meu namorado Geólogo Marcelo Barrios, por me incentivar e apoiar nesta etapa final, por toda ajuda e carinho. Minha jornada na UFRGS também deve um agradecimento especial à amigona, companheira de geologia e de vida, Tamires, muito obrigada pelo apoio e incentivo durante todos esses anos. Aos colegas de curso Pedro Meirelles, William, Luis Felipe, e Leonardo Leite, por todas as risadas que compartilhamos. Agradeço a todos os professores do Instituto de Geociências e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por proporcionarem um dos melhores cursos de geologia do país. A todas as oportunidades de estágio que me foram proporcionadas, agregando conhecimento a minha vida profissional, em especial à Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) e à Engenheira Camila Dahm Smiderle por oportunizar este estágio e permitir a realização deste projeto. Gostaria de agradecer ao professor e orientador Clovis Gonzatti, profissional e professor de atitudes nobres, por toda sua dedicação e conhecimento.

“Ah, o sorriso que tenho nos lábios é um sorriso geológico, o sorriso de quem sabe, olha, vê e compreende” - Monteiro Lobato

## RESUMO

Feições estruturais do tipo junta-falha são muito comuns em derrames basálticos da Formação Serra Geral, e de extrema relevância em estudos com abordagem geotécnica para Usinas Hidrelétricas, pois podem representar zonas de instabilidade em fundações de barragens. Este projeto teve como objetivo a caracterização geomecânica das galerias de drenagem da Usina Hidrelétrica de Itaúba, utilizando um dos métodos de classificação mais reconhecidos para compartimentação de maciços rochosos, o sistema *RMR (Rock Mass Rating)*. As galerias foram inicialmente construídas com intuito de investigar as condições geológicas estruturais do maciço, interceptado no local por uma junta-falha de orientação preferencial 25/100. Como resultado da classificação geomecânica dos diferentes maciços rochosos presentes na área de escavação dos túneis, foi gerado um mapa geológico geotécnico definindo-se zonas de compartimentação por classes, além da interpretação do tempo de auto sustentação dos túneis de acordo com a classificação proposta por Bieniawski. Os resultados obtidos mostram que as galerias são auto sustentadas, considerando pontos localizados com algum sistema de suporte necessário.

Palavras chave: Caracterização geomecânica, Classificação RMR, Mapeamento geotécnico, Usina Hidrelétrica de Itaúba.

## ABSTRACT

Structural features like joint fault type are very common in basaltic floods of Serra Geral Formation, and of extreme relevance in studies with geotechnical approach on hydropower plants projects, inasmuch it may represent instability zones in dam foundations. This thematic project aimed the geomechanical characterization of drainage galleries of Itaúba Hydroelectric Power Plant using one of the most recognized methods of rock mass classification, the RMR system (Rock Mass Rating). The galleries were initially built with the purpose of investigating the structural geological conditions of rock mass, intercepted in place for a preferred orientation joint fault 25/100. As a result of the geomechanics classification of different rock masses present in the excavation area of the tunnels, it was generated a geological geotechnical map defining the partitioning of areas for classes, as well as an interpretation of stand-up-time tunnels according to the classification proposed by Bieniawski. The results obtained show that the galleries are self-sustaining, with point located zones requiring some support system.

Keywords: Geomechanical Characterization, RMR Classification, Geotechnical Mapping, Itaúba Hidroelectric Power Plant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Usina Hidrelétrica de Itaúba modificado a partir do software Google Earth.....	4
Figura 2: Mapa geológico básico da Bacia Paraná. Modificado de Peate et al.1997. .	5
Figura 3 Mapa geológico da área de estudo. Modificado de CPRM, 2006. ....	9
Figura 4: Perfis de classificação de rugosidades. Modificado de Barton et al., 1974. ....	22
Figura 5: Diagrama de rosetas representando a direção das fraturas medidas no T2D a partir do software stereo 32.....	35
Figura 6: Diagrama de rosetas representando a direção das fraturas medidas no T1E a partir do software stereo 32.....	36
Figura 7: Diagrama de rosetas representando a direção das fraturas medidas no T2E a partir do software stereo 32.....	36
Figura 8: Fotomicrografia mostrando os aspectos gerais das lâminas delgadas de BVA com textura em cavidades. Lado esquerdo LN, lado direito LP. A e B: Amígdalas preenchidas por zeólita. C: Amígdalas preenchidas cristais esqueletais de quartzo, quartzo e calcita hipidiomórficos. ....	38
Figura 9: Fotomicrografia ilustrando aspectos gerais em lâminas de brecha basáltica. A e B: textura vesiculada, com interconexão. F: vesícula com quartzo de geometria esqueletal. ....	39
Figura 10: Difratoograma de Raios X em BVA amostrado no T1E. ....	40
Figura 11: Difratoograma de Raios X em amostra de brecha basáltica coletada no T1E. ....	40
Figura 12: Legendas dos mapas geológico geotécnicos. ....	51
Figura 13: Mapa geológico geotécnico T1.....	52
Figura 14: Mapa geológico geotécnico T1E. ....	53
Figura 15: Mapa geológico geotécnico T1D. ....	54
Figura 16: Mapa geológico geotécnico T2.....	55
Figura 17: Mapa geológico geotécnico T2E. ....	56
Figura 18: Mapa geológico geotécnico T2D .....	57
Figura 19: Diagrama de tempo de auto sustentação. ....	59

## LISTA DE IMAGENS

Imagem 1: Procedimento de saturação de amostras para realização do ensaio. Balança com pesagem inferior, recipiente cilíndrico e tanque preenchido com água utilizados no ensaio de determinação de índices físicos. ....	24
Imagem 2: Ultrassom, modelo Pundit Lab.....	25
Imagem 3: Equipamento utilizado para realização do ensaio de carga pontual.....	26
Imagem 4: Utilização do equipamento martelo de schimdt in situ. ....	27
Imagem 5: Seleção de amostras e equipamento utilizado para o ensaio Slake Durability. ....	28
Imagem 6: Basalto denso fraturado na área do T1E. ....	31
Imagem 7: Basalto vesículo amigdaloidal, túnel superior direito. A foto inferior à esquerda mostra uma das cavidades de basalto vesículo amigdaloidal semi-preenchida por quartzo e zeólita. ....	32
Imagem 8: Fotos superiores, brecha basáltica nos túneis inferiores esquerdo e direito. Fotos inferiores, injeções areníticas. ....	33
Imagem 9: As fotos superiores ilustram uma lente de arenito intertrap, as fotos inferiores mostram uma injeção arenítica, ambas localizadas no túnel inferior direito. ....	34
Imagem 10: Basalto compacto antes do ensaio de carga pontual e após o rompimento. ....	43
Imagem 11: Brecha basáltica antes do ensaio de carga pontual (esquerda) e após o rompimento (direita). ....	44
Imagem 12: BVA antes do ensaio de carga pontual (esquerda) e após o rompimento (direita). ....	45
Imagem 13: Brecha (esquerda) e BVA (direita) após o 5º ciclo do slake durability test. ....	47

**LISTA DE TABELAS E QUADROS**

Tabela 1: Critérios para avaliação do RMR.....	14
Tabela 2: Guia utilizado para classificar descontinuidades na avaliação RMR.....	15
Tabela 3: Ajuste para cálculo de RMR. ....	16
Tabela 4: Classes de atribuição final RMR.....	16
Tabela 5: Classificação do método Rock Quality Designation.....	19
Tabela 6: Classificação de persistências.....	20
Tabela 7: Classificação para abertura em descontinuidades.....	21
Quadro 1: Sistema de suporte e escavação para túneis com vão de 10 m. Modificado de Bieniawski, 1989.      17	
Quadro 2: Parâmetros tecnológicos das litologias na UHE Itaúba em comparação a fontes bibliográficas. ....	49

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	1
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
1.3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....	2
1.4	PREMISSAS .....	3
1.5	HIPÓTESES .....	3
2.	LOCALIZAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAÚBA.....	3
3.	CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO.....	4
3.1	BACIA DO PARANÁ .....	4
3.2	FORMAÇÃO SERRA GERAL .....	6
3.3	ASPECTOS ESTRUTURAIS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL .....	7
3.4	GEOLOGIA LOCAL .....	8
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
4.1	CLASSIFICAÇÃO DE TERZAGHI.....	11
4.2	Q SYSTEM .....	12
4.3	RMR (ROCK MASS RATING).....	13
5.	METODOLOGIA .....	17
5.1	TRABALHO DE CAMPO.....	17
5.2	RMR (ROCK MASS RATING).....	17
5.2.1	Resistência da Rocha Intacta .....	18
5.2.2	RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION INDEX).....	18
5.2.3	Espaçamento entre descontinuidades .....	19
5.2.4	Caracterização das descontinuidades .....	19
5.2.5	Influência da Água .....	23
5.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TECNOLÓGICA .....	23
5.3.1	Índices Físicos.....	23
5.3.2	Ultrassom – Velocidade Sônica .....	24
5.3.3	Índice de Resistência a Carga Pontual .....	25
5.3.4	Martelo de <i>Schmidt</i> (Esclerômetro).....	26
5.3.5	Resistência ao atrito e impacto a úmido – <i>Slake Durability</i> .....	27
5.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA .....	28
5.4.1	Petrografia Microscópica .....	28

5.4.2	Difratrometria por Raios-X.....	29
5.5	PROGRAMAS DIGITAIS.....	29
5.5.1	AutoCad .....	29
5.5.2	Estereonet 32 .....	29
6.	RESULTADOS .....	30
6.1	TRABALHO DE CAMPO.....	30
6.2	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	36
6.2.1	Petrografia Microscópica .....	37
6.2.2	Difração por Raios-X .....	39
6.3	ENSAIOS TECNOLÓGICOS .....	41
6.3.1.	Índices Físicos.....	41
6.3.3	Índice de Resistência à Carga Pontual e Martelo de Schmidt.....	43
6.3.4	<i>Slake Durability</i> .....	47
6.5	CLASSIFICAÇÃO <i>RMR</i> .....	49
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61

## 1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaúba está localizada no município de Pinhal Grande, região central do estado do Rio Grande do Sul. A UHE está em operação desde 1978 e totaliza uma capacidade de potência de 500 MW, sendo classificada como a terceira maior produtora de energia do estado. Insere-se no contexto geológico da Bacia do Paraná, ampla região sedimentar e vulcânica do continente Sul-Americano que inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai e Uruguai, abrangendo em extensão uma área aproximada de 1,5 milhões de km<sup>2</sup>. Diversas usinas hidrelétricas construídas sob o substrato da Bacia do Paraná, que compreendem maciços basálticos apresentam frequentemente uma estrutura geológica, denominada “junta-falha”, responsável por conferir condições adversas às obras de engenharia. Este tipo de descontinuidade ocorre também nas rochas sob as estruturas de concreto da UHE Itaúba, condição geológica esta, que abre espaço à análise e estudo geomecânico neste trabalho.

### 1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os modelos geomecânicos trazem informações sobre o meio rochoso no seu conjunto, envolvendo todas as características necessárias à elaboração do modelo físico, fundamentais para o desenvolvimento do projeto de engenharia. Os cuidados com os estudos geológico-geotécnicos são bem conhecidos e mostram um grande avanço nas décadas de 70 e 80, quando foram construídas as principais usinas hidrelétricas brasileiras. A Usina Hidrelétrica de Itaúba opera desde o ano de 1978. A região geológica na qual a UHE Itaúba está inserida consiste em derrames basálticos da Formação Serra Geral intercalados a camadas areníticas e arenitos *intertrap* da Formação Botucatu, (Guidicini 1981). A seqüência de derrames basálticos é interceptada por uma família de junta-falha, com orientação subvertical, de direção aproximada Leste-Oeste, as quais representam zonas de fraqueza no maciço rochoso. As características geológicas na área das estruturas de concreto (casa de força e vertedouro) são bastante complexas, pois neste local estas descontinuidades sofrem mudanças acentuadas no ângulo de mergulho. Estas feições foram detectadas apenas na fase de construção, podendo-se atribuir tal situação primeiramente aos

modestos recursos de prospecção utilizados na fase investigativa, e após, a própria posição espacial das juntas falhas, que dificultaram o seu mapeamento.

A usina possui duas galerias em rocha situadas nas cotas 144 m no túnel superior e 104 m no túnel inferior, posicionadas abaixo das estruturas de concreto. Estas galerias abertas inicialmente com intuito de investigar as condições geológicas foram adicionadas mais tarde ao sistema de drenagens, destinando-se a interceptar o fluxo de água na fundação das estruturas. Para a realização deste projeto estes túneis possibilitaram o mapeamento geológico estrutural, a avaliação geomecânica do maciço rochoso e a detecção de zonas de fraqueza que comprometam a estabilidade da rocha.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Além de participar da fase de pesquisa do projeto de uma UHE, as investigações geológico geotécnicas são também necessárias durante a vida útil da usina, com intuito de verificar comportamentos nas rochas que possam comprometer a estruturação da usina. O problema geológico da UHE Itaúba, apesar de ser conhecido, não foi detalhado e não está documentado no acervo técnico da UHE. Desta maneira, se fez necessária a investigação geológica geotécnica no local com o intuito de trazer informações geomecânicas embasadas para a avaliação dos maciços rochosos.

## 1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este projeto tem como objetivo a classificação geomecânica das galerias de drenagem da UHE Itaúba utilizando a técnica RMR de Bieniawski no mapeamento dos maciços rochosos.

Para compor a documentação da UHE Itaúba este trabalho servirá como o “*As Built*” das galerias de drenagem para a empresa proprietária. Em teoria o “*As Built*” deve ser iniciado na fase construtiva e acompanhar a evolução da obra em questão. Sugere-se também que seja realizado pela mesma equipe que conduziu o andamento da obra. Neste caso, após 37 anos de operação da usina, o documento será gerado com o objetivo de compor a documentação pertencente ao acervo técnico da UHE Itaúba, também servirá como consulta para outros projetos do gênero.

#### 1.4 PREMISSAS

No maciço rochoso da UHE Itaúba ocorrem derrames basálticos intercalados a camadas areníticas. Nesta região há a ocorrência de uma família de “junta-falha” abaixo das estruturas de concreto (tomada d’água e vertedouro) que está presente desde a cota 100 m e se estende até pelo menos a cota 160 m. Estas juntas-falhas tem orientação preferencial de 020/25, porém em certos locais sua inclinação de mergulho varia de subvertical a inclinada, representando zonas de fraqueza ao maciço rochoso.

#### 1.5 HIPÓTESES

Nas galerias de drenagens, as litologias presentes variam entre basaltos compactos, basaltos vesículo amigdaloidais (BVA) e brechas basálticas. Em consulta à bibliografia e estudos realizados em materiais similares, espera-se que as zonas brechadas e as zonas afetadas pela junta falha apresentem as classificações mais baixas esperadas pelos critérios de avaliação geomecânica.

## 2. LOCALIZAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAÚBA

A Usina Hidrelétrica de Itaúba localiza-se na região Centro Oriental Sul-Riograndense, situada sob as divisas municipais de Estrela Velha e Pinhal Grande, faz parte do sistema hidrelétrico Salto do Jacuí. Abastecida pelo Rio Jacuí, a UHE Itaúba é a terceira maior geradora de energia elétrica no estado, com 500 MW de potência é a fonte de energia para diversos municípios na região. A Figura 1 ilustra a localização da usina. O município de Pinhal Grande ocupa uma área territorial de 281,668 km<sup>2</sup>. Faz limite a Leste com os municípios Estrela Velha e Itaúba. Os limites extremos do município encontram-se delimitados entre os paralelos 29° 10' 37" de latitude Sul e o meridiano de 53° 9' 32' de longitude Oeste.

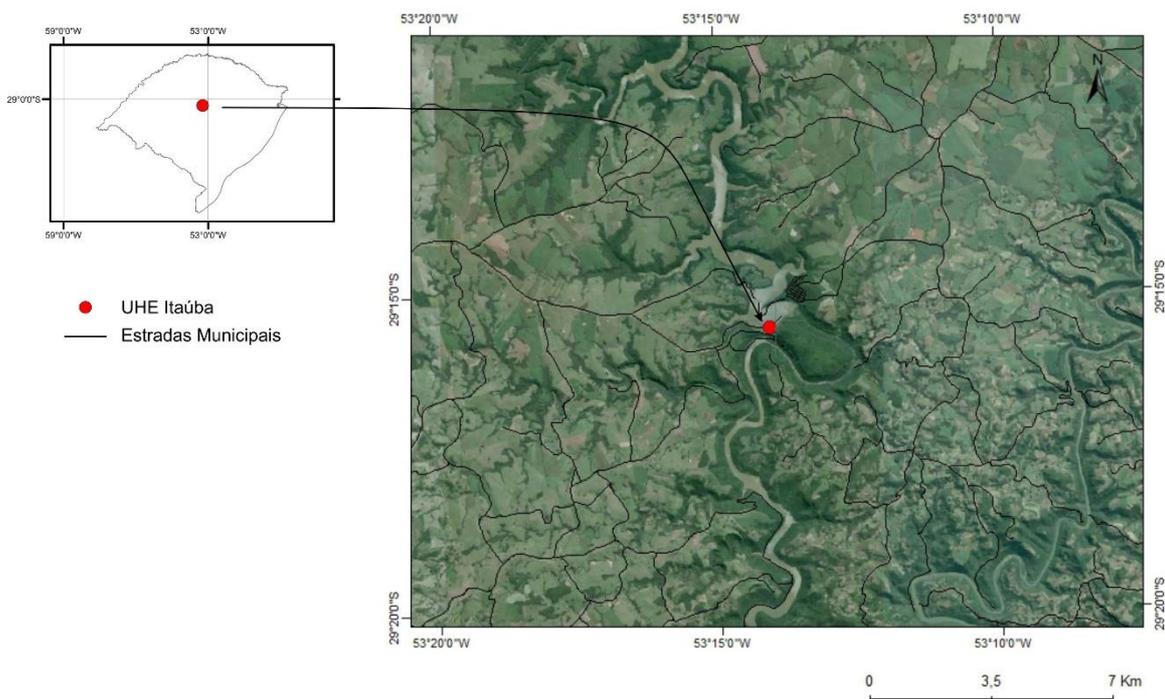


Figura 1: Localização da Usina Hidrelétrica de Itaúba modificado a partir do *software Google Earth*.

### 3. CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO

#### 3.1 BACIA DO PARANÁ

Quanto ao contexto geológico, a região do projeto está inserida na província vulcânica da Bacia do Paraná e litoestratigraficamente na Formação Serra Geral. Este tópico visa revisar bibliograficamente alguns aspectos considerados importantes a respeito do ambiente geológico correspondente a área de estudo.

A Bacia do Paraná consiste em uma ampla região sedimentar que ocupa, na porção da América do Sul, cerca de 1.200.000 km<sup>2</sup> abrangendo o Brasil, o Paraguai, a Argentina e o Uruguai com um volume que se estima em 800.000 km<sup>3</sup>. No Brasil a sequência vulcânica da Bacia do Paraná é classificada litoestratigraficamente como Formação Serra Geral. A Figura 2 ilustra o mapa geológico proposto para a Bacia do Paraná.

A disposição ovalada da Bacia do Paraná está intensamente associada à evolução geotectônica meso-cenozóica do continente sul americano. O flanco leste

da bacia, que compreende a porção entre o Sudeste brasileiro e o Uruguai, foi profundamente modelado pela erosão em função do soerguimento crustal associado ao rifte do Atlântico Sul, tendo a remoção da seção sedimentar sido estimada em até 2.500 m. Já o flanco ocidental é definido por uma feição estrutural com orientação norte-sul sobre um amplo bulge flexural, associado a pressão litosférica exercida sobre o continente pelo cinturão orogênico andino (Milani, 2000).

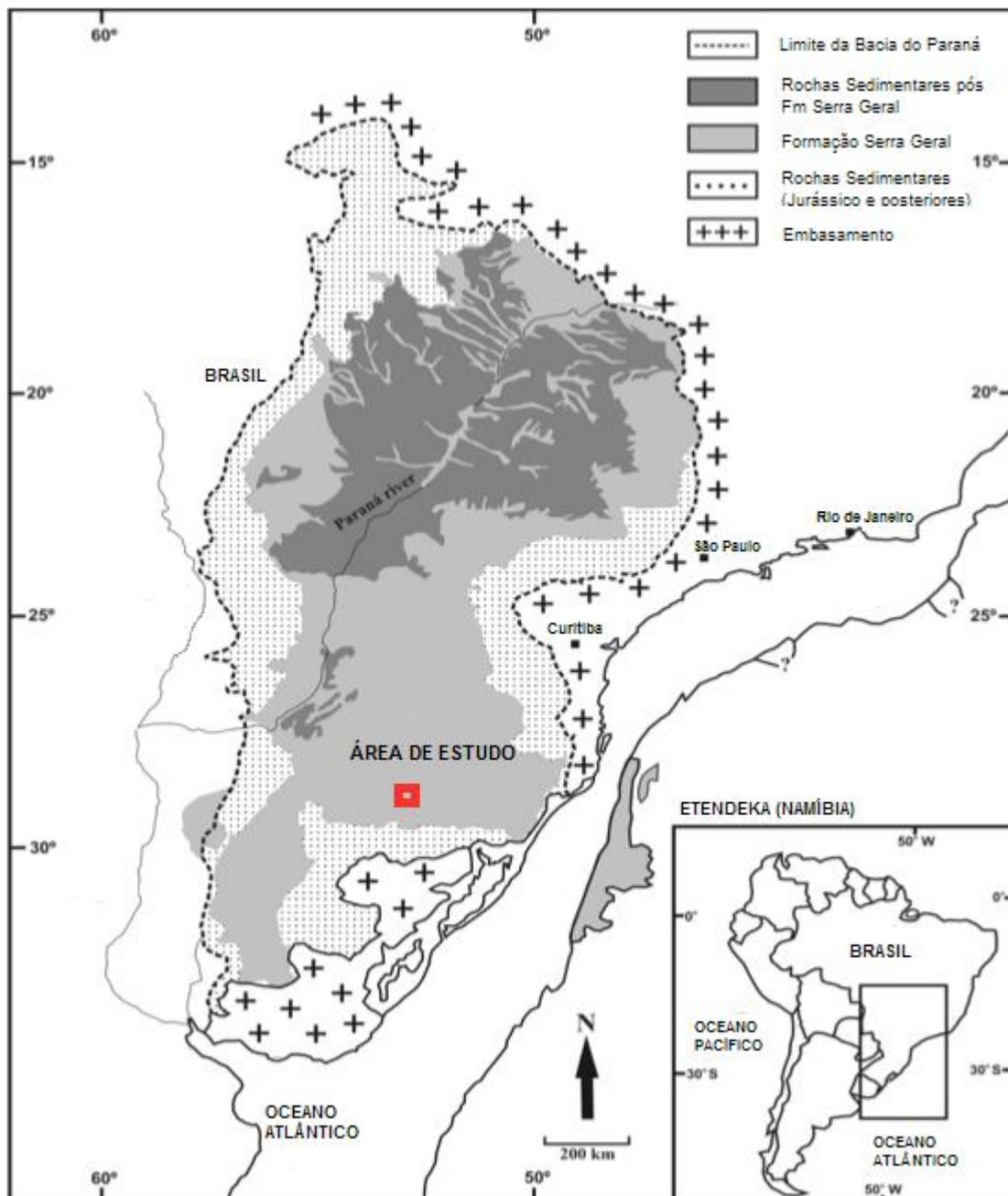


Figura 2: Mapa geológico básico da Bacia Paraná. Modificado de Peate *et al.* 1997.

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná inicialmente proposto por White, 1908 foi amplamente abordado em trabalhos por autores seguintes, sendo atualmente muito utilizado o modelo proposto por Milani (1997). O modelo estratigráfico proposto por Milani *et al.* (1997) com base no trabalho de Schneider *et al.* (1974) compreende um registro estratigráfico com idades que vão do Ordoviciano ao Neocretáceo. O autor divide o registro estratigráfico da Bacia do Paraná em seis unidades ou Supersequências, compreendendo um pacote sedimentar magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7.000 m, coincidindo geograficamente com o depocentro estrutural da sinéclise com a região da calha do rio que lhe empresta o nome (Milani, 1997). Cada pacote sedimentar definido corresponde a dezenas de milhões de anos, limitados por discordâncias regionais, sendo eles: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). Dentro desta definição, pode-se distinguir as três primeiras supersequências, que são representadas por sucessões sedimentares que definem ciclos transgressivo-regressivos ligados a oscilações do nível relativo do mar no Paleozóico, enquanto que as três últimas compreendem pacotes sedimentares continentais associados a deposições ígneas.

### 3.2 FORMAÇÃO SERRA GERAL

O magmatismo Serra Geral trata-se de um evento fissural que afetou as bacias cratônicas sul-americanas, marcando o fim dos episódios de sedimentação no interior do megacontinente no Mesozóico, definindo a maior manifestação vulcânica intracratônica durante o Fanerozóico, além de favorecer fortemente a geração de crosta continental do planeta.

O conjunto magmático recobre  $1.2 \times 10^6$  km<sup>2</sup> dos sedimentos da Bacia do Paraná, possui espessura total em torno de 1.720 m no depocentro da bacia e concentra-se na região centro-sul do Brasil e ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina (Nardy *et al.*, 2008). Idades obtidas a partir de datação Ar-Ar indicam entre 148 e 125 Ma para a atividade magmática na bacia.

Este pacote vulcânico recobre os arenitos da Formação Botucatu, formando um contato concordante e abrupto bem marcado, sendo muito comum na base dos depósitos magmáticos a presença de arenitos *intertrap*, com frequente feições de

interação entre lava e sedimento, com a formação de brechas e diques areníticos. As sucessões magmáticas abrangem grandes extensões laterais, individualmente a espessura de cada derrame é muito variável, sendo descrito por alguns autores como espessuras entre 10 e 80 m, Marques & Ernesto (2004).

A configuração vertical dos derrames mostra um padrão de características para a porção basal, central e superior. A zona inferior é marcada pela presença de material vítreo em BVA, sendo as amígdalas formadas por minerais de segunda ordem e as vesículas, indicativos de degaseificação formadas pelo rápido resfriamento de lava em contato com a superfície podendo ocorrer fraturamento horizontalizado. A zona central é constituída por basalto compacto normalmente de textura afanítica, com fraturas verticais, geradas pelo rápido resfriamento (Leinz *et al.*, 1966). Já a porção mais superficial é constituída por BVA, sendo as amígdalas comumente preenchidas por zeólitas, quartzo e calcedônia, o fraturamento típico se dispõem com padrão horizontalizado, (Leinz *et al.*, 1966).

Podem ocorrer associados aos derrames brechas basálticas constituídas por fragmentos angulosos de basalto imersos em uma matriz basáltica (lava aglomerática), ou sedimentar arenosa a carbonática. Podem ser geradas pelo próprio tipo de derrame, quando ocorre rompimento de fluxos tipo *pahoehoe*, além de serem geradas pela interação entre lavas e sedimentos, marcadas pela presença de peperitos (Waichel, 2006). Normalmente associam-se a topo de derrame e sedimentos interpostos constituídos de areia fina, silte e argila, frequentemente com cimento quartzoso e podem se manifestar também com porções arenosas na forma de pequenos diques e veios no corpo do derrame, (Curti, 2011).

### 3.3 ASPECTOS ESTRUTURAIS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL

Grande parte dos estudos a respeito da geologia física da Formação Serra Geral derivam de projetos voltados para construção de UHEs com foco para geologia de engenharia. Neste sentido é importante se conhecer as definições para determinadas estruturas geológicas.

A configuração estrutural da Bacia mostra extensos lineamentos, segundo Riccomini (1995), marcados por falhas, corpos intrusivos, altos ou baixos estruturais. Estas feições estão possivelmente relacionadas a estruturas de reativação, preexistentes no embasamento. Descontinuidades sub-horizontais de extensa

continuidade lateral estão muito presentes em derrames da Formação Serra Geral, e foram descritas inicialmente por Guidicini & Campos (1968) em mapeamentos geológicos para construção de barragens em São Paulo e no Paraná, sendo consideradas um importante condicionante desfavorável à estabilidade de fundações, pois se comportam como canais para fluxo de água em decorrência de seu preenchimento muito pouco resistente (Guidicini, 1979). Estas fraturas sub-horizontais e de grande extensão, foram definidas como junta-falha. Termo usado para definir duas feições em um mesmo plano de fratura. O termo junta falha, descrito por Guidicini & Campos (1968), e Souza J. & Campos (1990) caracteriza uma estrutura de inclinação sub-horizontal apresentando grande extensão lateral, podendo variar em uma junta pouco aberta à espaçamentos que chegam a 2 m de largura. O material de preenchimento apresenta fraturas subparalelas e zonas de cisalhamento que formam lentes e blocos angulosos. Com frequência podem ser verificadas estrias de fricção e brechação no material de preenchimento.

### 3.4 GEOLOGIA LOCAL

A Formação Serra Geral é definida por um espesso pacote de rochas predominantemente efusivas, cuja compartimentação estratigráfica está representada por características faciológicas que compõem os diferentes estágios da sucessão vulcânica. A caracterização química de cada derrame constitui o principal critério para a denominação das fácies, que se dividem em rochas de composição básica (basaltos) e de composição intermediária a ácida (dacitos, riodacitos e riolitos). A fácies que caracteriza a área de estudo conforme definido por CPRM (2006) denominada Fácies Gramado corresponde aos derrames basálticos granulares finos a médio, melanocráticos cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeólitas, carbonatos, apofilita e saponita, com estruturas de fluxo e *pahoehoe* comuns, além de intercalações com o arenito Botucatu. Dados isotópicos Ar-Ar mostram idades de  $132 \pm 1,4$  Ma. A Figura 3 ilustra o mapa geológico proposto, que abrange a área de estudo.

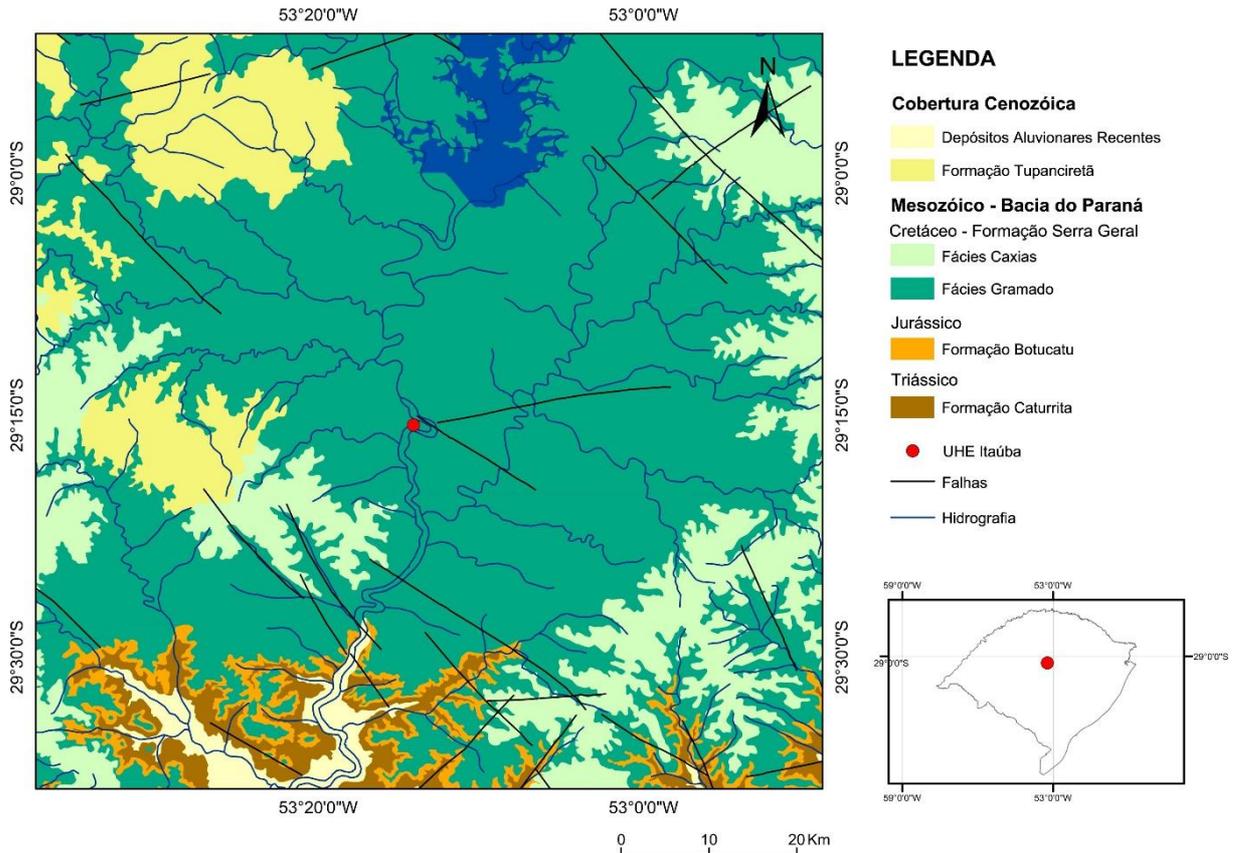


Figura 3: Mapa geológico da área de estudo. Modificado de CPRM, 2006.

A fácies Gramado refere-se a um conjunto composto por cerca de 16 derrames e espessura entre 15 e 35 m, aflorantes principalmente nas bordas sul e sudeste da escarpa Serra Geral, com área tipo ao longo das escarpas do planalto do Rio Grande do Sul, representando uma das primeiras manifestações vulcânicas sobre os sedimentos areníticos do Botucatu.

Estes primeiros eventos eruptivos possuem pequena expressão lateral, por estarem confinados a paleovales e a espaços interdúnicos existentes. Após o encerramento do aporte de areias do Botucatu, inicia-se um período francamente vulcânico, onde o relevo está condicionado ao arranjo formado pela ligação entre derrames, que encerraram o preenchimento da bacia.

As rochas que compõem esta fácies estão representadas por vulcânicas máficas em níveis que variam entre 12 a 40 m de espessura, com geometria aproximadamente tabular, contendo níveis vesiculares desenvolvidos no topo e amígdalares na zona inferior dos depósitos, normalmente preenchidas por zeólitas e carbonatos (Wildner *et al.*, 2004). Conforme o trabalho do autor, a porção central dos derrames ocupa entre 60 e 70% da espessura e é constituída por rochas granulares

finas a médias, cinza-escuro a cinza-esverdeadas, predominando um padrão colunado irregular característico que compõe blocos colunares de contorno pseudo-hexagonal que variam entre 0,1 e 0,4m de espessura, delineados por fraturas irregulares.

As rochas dessa fácies são tipicamente de grão fino, afíricas a raramente microporfíricas. Constituem-se de um arranjo de cristais de plagioclásio euédricos aos quais somam-se o par de clinopiroxênios (augita-pigeonita) e quantidades esporádicas de olivinas. Como acessórios destaca-se a presença dos óxidos de Fe-Ti (magnetita – ilmenita), apatita e quartzo. O espaço intersticial entre cristais encontra-se preenchido por vidro intersertal, podendo ocasionalmente estar rearranjado para um mosaico de cristálitos de plagioclásio e quartzo (Wildner *et. al.*, 2004).

#### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O capítulo 4 visa abordar uma breve revisão bibliográfica a respeito das condicionantes e da importância das classificações geomecânicas aplicadas à projetos de túneis.

As classificações geomecânicas tem por objetivo criar um modelo geológico-geotécnico com as informações capazes de fornecer as características necessárias para a execução de uma dada obra de engenharia. A utilização de técnicas de classificação geomecânica é uma metodologia difundida no âmbito da geologia de engenharia, obtendo-se a partir de parâmetros qualitativos e quantitativos uma nota que represente a qualidade e a resistência do maciço rochoso. As pontuações obtidas são usadas para elaborar uma visão da composição e das características do maciço para prover estimativas iniciais do suporte de escavações além de fornecer estimativas de valores de resistência e deformabilidade para o maciço rochoso (Hoek *et al.*, 1995).

A caracterização geológico geotécnica corresponde a uma das etapas mais relevantes em projetos de engenharia, tratando-se de reconhecer as condições do solo e subsolo, utilizando técnicas diretas e indiretas para tanto. Utilizam-se diversos meios de investigação, tais como fotointerpretação, mapeamento geológico, sondagens diretas e indiretas, ensaios *in situ* e de laboratório.

As classificações geomecânicas mais utilizadas atualmente foram propostas por Barton (Q System) e Bieniawski (Rock Mass Rating). São sistemas desenvolvidos com base em determinadas características de maciços rochosos, previamente selecionadas, tais como litologia, estrutura, grau de alteração da rocha, orientação, espaçamento, número de famílias de descontinuidades, presença de água subterrânea no maciço rochoso, entre outras.

Com o tempo verificou-se um aumento progressivo do número de classificações em decorrência do aumento das construções de obras e do reconhecimento da importância de certos fatores anteriormente desconhecidos (Fiori 2013; Carmignani (2013). Nos próximos subcapítulos são apresentadas algumas das classificações geológico – geotécnicas mais consagradas em bibliografias sobre o tema.

#### 4.1 CLASSIFICAÇÃO DE TERZAGHI

A primeira classificação geomecânica de maciços rochosos foi elaborada por Terzaghi (1946). A classificação foi proposta baseando-se em ensaios de modelos de areias e em critérios empíricos resultante da observação de inúmeros túneis em diversos tipos de formações rochosas.

Segundo Terzaghi (1946) classificando o maciço rochoso pode-se determinar a carga que o mesmo exerce sobre o suporte de cambotas metálicas (sistema de suporte utilizado). Estas relações foram obtidas a partir da execução de um grande número de túneis na região dos Alpes, onde foram utilizadas para suporte cambotas metálicas interconectadas (*steel sets*) firmemente pressionadas contra o maciço por cunhas de madeira. Tais blocos de madeira se comportavam como células de carga, sendo assim possível inferir, em função das deformações, as cargas que atuavam no revestimento. A linha de classificação é de descrição totalmente qualitativa, e se limita a túneis com diâmetro de até 9 m, em desmontes por utilização de explosivos e sistema de suporte com arcos metálicos. De forma genérica são ilustrada as principais classificações obtidas quando da utilização de TERZAGHI.

Rocha Intacta: Maciço sem descontinuidades, quando a ruptura ocorre é provocada no plano de maior fraqueza na rocha sã. Os efeitos provocados pelo uso de explosivos no desmonte causam fraturamentos nas porções mais externas do túnel que podem desagregar-se como queda de blocos e fragmentos após horas da

detonação ou até mesmo dias. Em rochas homogêneas também pode ocorrer rompimento brusco e violento em forma de lajes no teto ou nas paredes, esta situação pode acontecer quando as tensões residuais ou quando os fatores de concentração de tensão são muito elevados, igualando a resistência da rocha.

Rocha muito fraturada: caracterizada por rocha quimicamente sã ou praticamente sã, dispostos em fragmentos ou blocos de rocha desconectados entre si porém inseridos em uma matriz ou envoltos por preenchimentos que os ligam. Para esta classificação pode ser recomendado suporte para as paredes laterais.

Rocha expansiva: este tipo de rocha tende a deformar para o interior da escavação, normalmente relacionada a maciços que contém montmorilonita, importante mineral argiloso do grupo dos filossilicatos de alta capacidade expansiva.

Na aplicação da técnica acima descrita não existem limites exatos entre as categorias propostas, considerando que as propriedades dos maciços podem variar em limites amplos.

#### 4.2 Q SYSTEM

Concomitantemente à classificação de Bieniawski, é inserido no mercado da engenharia o sistema de classificação proposto por Barton *et al.* (1974), popularmente conhecido como *Q System*, desenvolvido para facilitar o desenvolvimento do sistema de suporte para túneis. Representa uma grande contribuição para o avanço dos estudos nas obras subterrâneas e baseia-se em cerca de 212 casos de galerias em rocha na Escandinávia. Trata-se de um sistema que considera 6 parâmetros quantitativos que são posteriormente agrupados em 3 quocientes resultando na qualidade total do maciço, apresentados abaixo

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \text{ onde}$$

*RQD*- Índice *RQD*.

*J<sub>n</sub>* - Índice relativo ao número de família de descontinuidades.

*J<sub>r</sub>* - Índice relativo à influência da rugosidade das descontinuidades.

*J<sub>a</sub>* - Índice relativo à alteração das paredes das descontinuidades.

$J_w$  - Índice relativo à influência da água subterrânea.

$SRF$  - Índice de influência do estado de tensões do maciço.

A classificação final pode ter uma variação total entre  $Q = 0.001$  a  $Q = 1000$  dados em uma escala logarítmica, o que torna a avaliação mais complexa de ser executada e exige do profissional um sólido conhecimento para a coerente pontuação. Os parâmetros avaliados se parecem muito com aqueles propostos para o RMR de Bieniawski (1989) e que são apresentados no tópico abaixo.

#### 4.3 *RMR (ROCK MASS RATING)*

O sistema de classificação *RMR* também conhecido como classificação geomecânica foi proposto por Bieniawski (1973). Esta técnica desenvolvida com base em diversos casos reais foi largamente modificada em relação a sua primeira versão, sendo atualmente utilizado o modelo proposto por Bieniawski em 1989. A classificação *RMR* considera cinco critérios para classificar o maciço rochoso: resistência à compressão uniaxial, *RQD*, espaçamento entre descontinuidades, características das descontinuidades e a presença de água. Sabe-se que nenhum parâmetro isolado ou índice pode classificar totalmente um material para uso na engenharia, cada propriedade tem uma importância distinta, e somente se tomadas em conjunto podem expressar a classe geomecânica da rocha. Para aplicar a classificação, o maciço rochoso deve ser dividido em zonas com padrões geomecânicos visíveis, similares, de modo que determinadas características sejam mais ou menos uniformes no interior de cada bloco, (Bieniawski, 1973). Cada compartimento recebe uma pontuação de acordo com suas características, onde a pontuação final pode variar de 0 a 100. A Tabela 1 ilustra os critérios utilizados para classificação *RMR*.

De acordo com as características do maciço rochoso avaliado, deve-se usar os parâmetros específicos para pontuação das descontinuidades (quando possível de avaliar), como mostra a tabela 2. Ao final da obtenção de todos parâmetros necessários, ajusta-se o valor obtido do *RMR* com decréscimo de acordo com a orientação e ângulo de mergulho da família de descontinuidade.

Tabela 1: Critérios para avaliação do RMR.

A CLASSIFICAÇÃO - PARÂMETROS E SUAS PONTUAÇÕES									
PARÂMETROS		FAIXA DE VALORES							
1	Resistência da rocha intacta	Carga Ponual	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 Mpa	Para baixos valores - Utilizar a compressão simples		
		Compressão Uniaxial	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5 - 25 Mpa	1 - 5 Mpa	< 1 Mpa
Peso		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%			
	Peso	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento entre descontinuidades	>2m	0.6 - 2.0m	20 - 60 cm	6 - 20 cm	< 6cm			
	Peso	20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades	Superfícies muito rugosas; Não contínuas; Fechadas; Paredes secas	Superfícies suavemente rugosas; Abertura < 1mm; Paredes levemente molhadas	Superfícies levemente rugosas; Abertura < 1mm; Paredes molhadas	Superfícies estriadas/ Preenchimento < 5 mm/ Abertura de 1 a 5 mm; Contínuas	Preenchimento com materail macio >5mm/ Abertura >5mm; Contínuas			
		Peso	30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Infiltrações ao longo de 10m de túnel	Nenhuma	< 10	10 a 25	25 a 125	> 125		
		Relação presença de água/ tensão principal	0	<0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	> 0.5		
		Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Água Gotejando	Água Corrente		
Peso		15	10	7	4	0			

Fonte: Modificado de Bieniawski, 1989.

Tabela 2: Guia utilizado para classificar descontinuidades na avaliação *RMR*.

GUIA PARA CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES					
PARÂMETRO	FAIXA DE VALORES				
Persistência da descontinuidade	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Suavemente rugosa	Suave	Lisa
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Resistente < 5 mm	Resistente > 5 mm	Macio < 5 mm	Macio > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Alterabilidade	Sã	Pouco alterada	Moderadamente Alterada	Muito Alterada	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: Modificado de Bieniawski, 1989.

Ao final da avaliação cuidadosa das características consideradas para a classificação, obtém-se uma pontuação que pode variar de 0 a 100. Cada um dos cinco parâmetro tem um intervalo de pontuação determinada, e a soma das notas obtidas resulta em um valor numérico, que corresponde ao valor de classificação final do maciço rochoso. Segundo o autor, deve-se aplicar correções ao valor das orientações das descontinuidades, considerando a influência da orientação das descontinuidades em relação ao túnel, avaliando se são favoráveis ou adversas à qualidade do maciço. A orientação para os ajustes no RMR são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Ajuste para cálculo de *RMR*.

AJUSTE DAS DESCONTINUIDADES: ORIENTAÇÃO E ÂNGULO DE MERGULHO EM TÚNEIS					
DIREÇÃO: PERPENDICULAR AO EIXO DO TÚNEL			DIREÇÃO: PARALELA AO EIXO DO TÚNEL		
Escavação no sentido do mergulho 45 a 90°	Escavação no sentido do mergulho 20 a 45°		Mergulho 45 a 90°	Mergulho 20 a 45°	
Não Influi	Pouco influente		Muito desfavorável	Moderadamente Influyente	
Escavação contra o sentido do mergulho 45 a 90°	Escavação contra o sentido do mergulho 20 a 45°		Mergulho de 0 a 20° com qualquer orientação		
Moderadamente Influyente	Desfavorável		Moderadamente Influyente		
DESCONTO PARA PONTUAÇÃO FINAL OBTIDA					
Descrição	Não Influi	Pouco influente	Moderadamente influente	Desfavorável	Muito desfavorável
VALOR	0	-2	-5	-10	-12

Fonte: Modificado de Bieniawski, 1989.

A pontuação do *RMR* entre 81 a 100 confere ao maciço a qualidades excelentes para uso na engenharia. Ao contrário, as pontuações mais baixas, menores que 20, correspondem aos materiais rochosos de piores qualidades. Sabendo classificar adequadamente o maciço rochoso através desta técnica é possível desenvolver o sistema de dimensionamento de suporte necessário, e em casos mais críticos desenvolver novas possibilidades para a disposição do projeto. As possíveis classes de *RMR* são descritas na tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Classes de atribuição final *RMR*.

CLASSE RMR	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IV	CLASSE V
PONTUAÇÃO TOTAL	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	< 21
DESCRIÇÃO	EXCELENTE	MUITO BOM	REGULAR	RUIM	MUITO RUIM

Fonte: Modificado de Bieniawski, 1989.

O sistema de suporte recomendado pelo autor corresponde a túneis com 10 m de vão, ilustrados no 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 da frente de escavação	Pontos localizados, ancoragem na abóbada com 3 m de comprimento. Espaçamento de 2,5. 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 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, 1-1,5 m de avanço da calota. Instalação do suporte concomitante 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.
V	Seções múltiplas, 0,5-1,5 m de avanço da calota. Instalação do 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	150-200 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.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 TRABALHO DE CAMPO

A atividade de campo foi dividida em duas etapas, tendo como objetivo diferenciar as litologias ocorrentes nos túneis, mapear todas as fraturas, caracterizar as características necessárias para obtenção do *RMR*, assim como a coleta de amostras para realização de ensaios em laboratório. Foram mapeados ao total 514 m de túnel e os dados estruturais foram medidos utilizando bússola modelo Brunton, com notação em trama. Os mapas dos túneis gerados estão divididos em três segmentos principais e são apresentados no capítulo resultados.

### 5.2 *RMR (ROCK MASS RATING)*

O sistema de classificação geomecânica utilizado foi o *RMR*, porque permite a análise do maciço rochoso em compartimentos, possibilitando uma análise mais sensível aos diferentes aspectos geológicos presentes na área do mapeamento. Para tanto, optou-se por dividir os dois túneis em compartimentos de aproximadamente 20 m, buscando identificar zonas com características litológicas e estruturais similares entre si. Para aplicação do *RMR* cada um dos cinco parâmetros foi caracterizado e considerado ao longo dos túneis. Cada critério avaliado é descrito nos subcapítulos seguintes.

#### 5.2.1 Resistência da Rocha Intacta

O valor para resistência da rocha foi determinado com estimativas obtidas em campo com o martelo de geólogo, juntamente ao martelo de *Schmidt* que gera resultados no local analisado, e que após devem ser processados através da plotagem em diagrama específico para obtenção do valor gerado em campo em MPa. Para uma melhor precisão, amostras coletadas em campo foram ensaiadas em laboratório pelo método de ruptura carga pontual.

#### 5.2.2 *RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION INDEX)*

Proposto originalmente por Deere (1966), como uma técnica de classificação de maciços rochosos, foi inserido como parâmetro de outras classificações geomecânicas. O *RQD* é uma técnica largamente utilizada para mapeamento de túneis em rocha, usado para fornecer uma estimativa quantitativa da qualidade do maciço rochoso. Para se valer deste método deve-se, através do testemunho de sondagem rotativa, considerar pedaços de rocha intacta maiores que 100 mm em uma manobra. A ISRM recomenda para o furo de sondagem o uso de um amostrador com diâmetro NX (54.7 mm) e barrilete duplo móvel. Conforme os resultados obtidos no *RQD*, classifica-se o maciço rochoso conforme mostra a Tabela 5:

Tabela 5: Classificação do método *Rock Quality Designation*.

<b>RQD (%)</b>	<b>QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO</b>
<b>0-25</b>	MUITO FRACO
<b>25-50</b>	FRACO
<b>50-75</b>	REGULAR
<b>75-90</b>	BOM
<b>90-100</b>	EXCELENTE

Fonte: Modificado de Deere, 1966.

As sondagens do local de estudo não estão atualmente disponíveis para consulta, portanto para a avaliação do *RQD* optou-se por atribuir um valor estimado em campo considerando paredes verticais correspondentes à altura do túnel, caracterizando fragmentos maiores que 10 centímetros, divididos pelo trecho total considerado, sendo o valor final gerado em porcentagem.

### 5.2.3 Espaçamento entre descontinuidades

O espaçamento é dado pela distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes pertencentes a uma mesma família. O espaçamento das descontinuidades condiciona o tamanho dos blocos individuais de uma rocha intacta. Um pequeno espaçamento confere ao maciço um comportamento mais próximo aos materiais de baixa resistência, enquanto que para grandes espaçamentos tem-se fundamentalmente o efeito condicionante do tamanho dos blocos com zonas de resistência mais alta. O espaçamento das descontinuidades foi determinado em campo utilizando trenas, durante o mapeamento.

### 5.2.4 Caracterização das descontinuidades

As condições das fraturas, que subdividem-se em cinco critérios, sendo eles comprimento das descontinuidades, abertura, rugosidade, preenchimento e alterabilidade foram avaliadas durante o mapeamento dos túneis, e são melhores descritas nos próximos subcapítulos. Para auxiliar a classificação do grau de alterabilidade utilizou-se os ensaios tecnológico de resistência ao atrito e impacto a úmido *slake durability* e ultrassom.

#### 5.2.4.1 Persistência

A persistência em uma rocha é definida pelo comprimento de uma determinada descontinuidade. Segundo a ISRM (1978) a persistência é um dos parâmetros mais importantes para a compartimentação dos maciços, e implica na extensão ou dimensão de uma descontinuidade em um plano e pode ser quantificada observando-se o comprimento do traço em uma superfície exposta do maciço rochoso. O comprimento do traço pode ser classificado conforme a tabela 6.

Tabela 6: Classificação de persistências.

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>COMPRIMENTO (metros)</b>
Persistência muito baixa	< 1m
Persistência baixa	1 - 3m
Persistência moderado	3 - 10m
Persistência alta	10 - 20m
Persistência muito alta	> 20m

Fonte: Modificado de ISRM, 1979.

#### 5.2.4.2 Abertura

A abertura é o parâmetro que quantifica o espaçamento perpendicular entre duas paredes de uma descontinuidade aberta. O material de preenchimento pode ser tanto argila, silte, areia, ou material grosseiro alterado resultante da fragmentação ao longo do plano de ruptura. O padrão para classificação de aberturas, conforme indica a ISRM (1978), pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7: Classificação para abertura em descontinuidades.

<b>ABERTURA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
< 0.1mm	Apertada	
0.1 - 0.25mm	Muito apertada	Descontinuidades fechadas
0.25 - 0.5mm	Parcialmente aberta	
0.5 - 2.5mm	Aberta	
2.5 - 10mm	Muito extensa	Descontinuidades lacunadas
> 10mm	Larga	
1 - 10 cm	Muito larga	
10 - 100cm	Extremamente larga	Descontinuidades abertas
> 1m	Cavernosa	

Fonte: Modificado de ISRM, 1979.

#### 5.2.4.3 Rugosidade

Conforme a ISRM (1978), a rugosidade de paredes em descontinuidades é potencialmente importante no que tange a resistência ao cisalhamento, especialmente em casos de juntas não preenchidas. A importância da rugosidade diminui à medida que a abertura da descontinuidade e a espessura do material de preenchimento aumentam. Medidas visuais de rugosidade ou coeficiente de rugosidade em fraturas foram propostos por Barton & Choubey (1977). A Figura 4 ilustra a classificação das rugosidades.

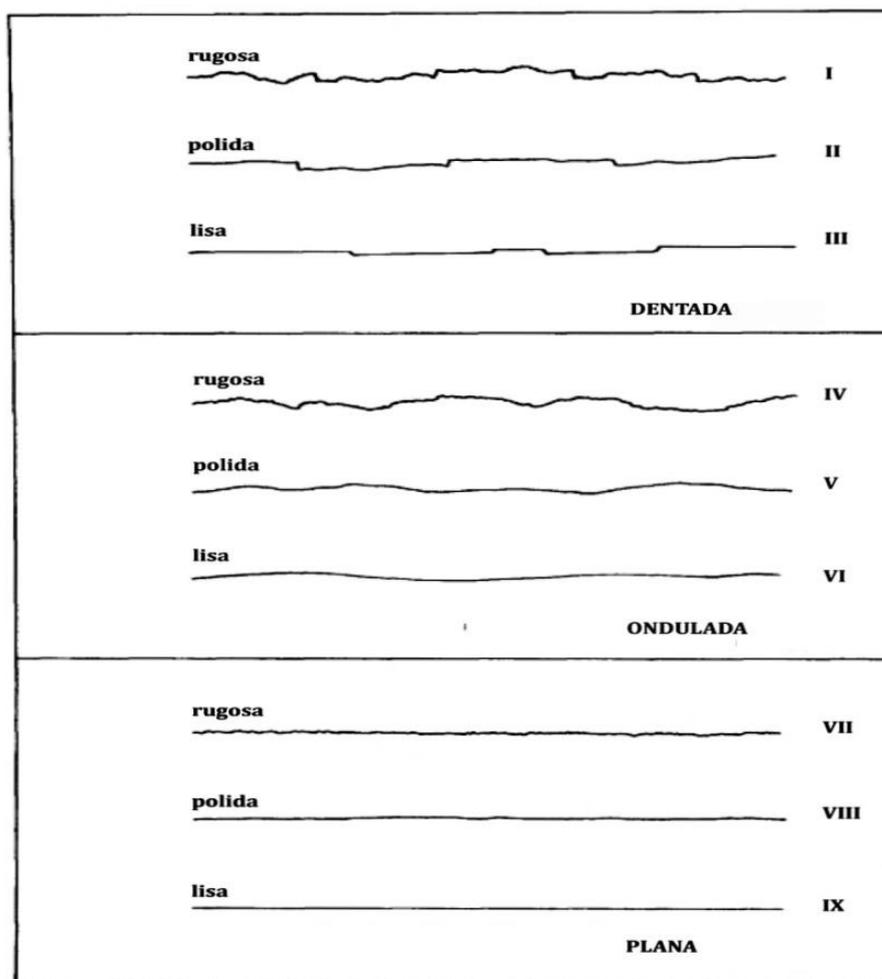


Figura 4: Perfis de classificação de rugosidades. Modificado de Barton *et al.*, 1974.

O espaço entre as paredes de discontinuidades podem estar vazias ou preenchidas. O material de preenchimento pode ocorrer por processos de deposição, desagregação por movimentos tectônicos ou por processos de intemperismo do maciço rochoso. Aberturas grandes podem inclusive estar preenchidas por blocos ou matacões. Quanto a condições de resistência mecânica, os materiais de preenchimento mostram uma grande variação, mas em geral, apresentam baixa resistência ao cisalhamento. Segundo Cording *et al.* (1975) as argilas como montmorilonita, illita, clorita e minerais como talco e grafita, merecem atenção redobrada, pois podem causar sérios problemas relacionados a estabilidade de maciços rochosos.

#### 5.2.4.4 Alterabilidade

A alteração em uma rocha pode ser definida como a possibilidade que os seus constituintes têm em serem alterados. Este processo destrutivo modifica os constituintes minerais pela ação de agentes internos ou externos.

#### 5.2.5 Influência da Água

A água age como um fator determinante para evolução da alteração no maciço rochoso, afetando diretamente a capacidade de resistência. Os túneis avaliados contam com um sistema de drenagem, onde são feitas leituras semanais através dos medidores de vazão. Portanto, foi necessário caracterizar o maciço em relação a este parâmetro.

### 5.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TECNOLÓGICA

#### 5.3.1 Índices Físicos

O ensaio para determinação de índices físicos teve como objetivo classificar parâmetros como massa específica aparente, porosidade aparente e a absorção de água das amostras analisadas. Para realização do ensaio é essencial que se determine em laboratório o volume da amostra, a sua massa saturada em água e seca em estufa (aproximadamente 104 °C por 24 horas constantes). O procedimento de saturação de amostras consiste em submeter as amostras selecionadas a recipientes imersas com água, deixando-as saturarem por 48 horas em temperatura ambiente. Para determinação dos parâmetros que se deseja obter, os dados coletados passam por uma série de cálculos, executados conforme recomenda a Norma ABNT 15845/2010 – Anexo B. A Imagem 01 mostra alguns dos procedimentos acima citados.



Imagem 1: Procedimento de saturação de amostras para realização do ensaio. Balança com pesagem inferior, recipiente cilíndrico e tanque preenchido com água utilizados no ensaio de determinação de índices físicos.

### 5.3.2 Ultrassom – Velocidade Sônica

Trata-se de um método não destrutivo para determinação do grau de alteração e da presença de descontinuidades, através da propagação de ondas ultrassônicas longitudinais. A ISRM (2014) sugere que sejam ensaiados apenas corpos de provas com fácies planas, para o melhor acoplamento dos fones de transmissão de ondas. A Imagem 2 mostra o equipamento usado (*Ultrasonic Pulse Velocity - Pundit Lab*). As características da rocha determinam a velocidade de propagação de ondas, sendo elas a constituição mineralógica, granulometria, textura, porosidade, anisotropia e temperatura ambiente. Analisando um determinado número de amostras de mesma composição, aquelas com velocidade de onda relativamente maiores normalmente

correspondem a materiais de resistência mecânica mais elevada, indicando um menor nível de alteração e maior coesão entre os minerais.

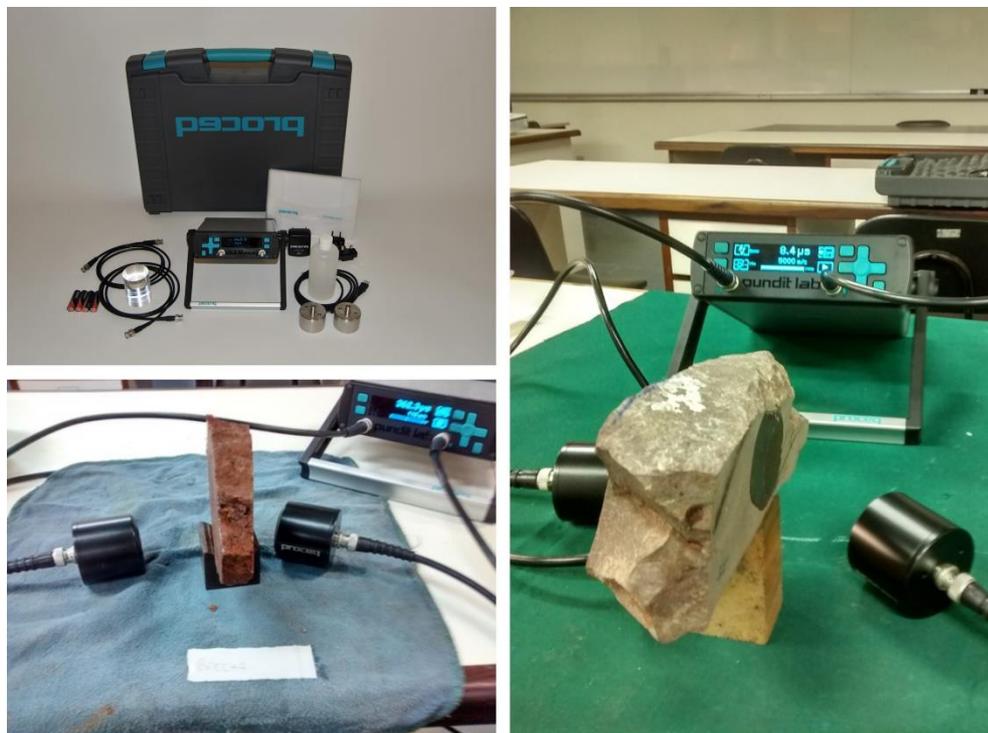


Imagem 2: Ultrassom, modelo *Pundit Lab*.

### 5.3.3 Índice de Resistência à Carga Pontual

O ensaio de resistência à carga pontual determina a tensão necessária para provocar a ruptura no corpo de prova ensaiado. O objetivo do ensaio é romper o material, através da aplicação de uma força crescente e concentrada através de um par de duas ponteiros cônicos de ferro. A amostra ensaiada é rompida por desenvolvimento de fissuras de tração paralelas ao eixo de carga, sendo registrado o valor da carga que provoca a quebra do corpo de prova.

A ISRM (2014) sugere a amostragem de pelo menos 10 espécimes, para uma melhor confiabilidade dos resultados. Após o processamento dos resultados através de uma série de cálculos, levando em consideração as medidas de altura e largura dos corpos de prova e o valor da carga para o rompimento, determina-se o índice  $I_s$  (50) médio, que é então multiplicado por uma constante igual a 20 (valor dado de acordo com as medidas do corpo de prova) para se obter o valor aproximado de

resistência a compressão uniaxial em MPa. O equipamento utilizado para o ensaio é mostrado na Imagem 3.

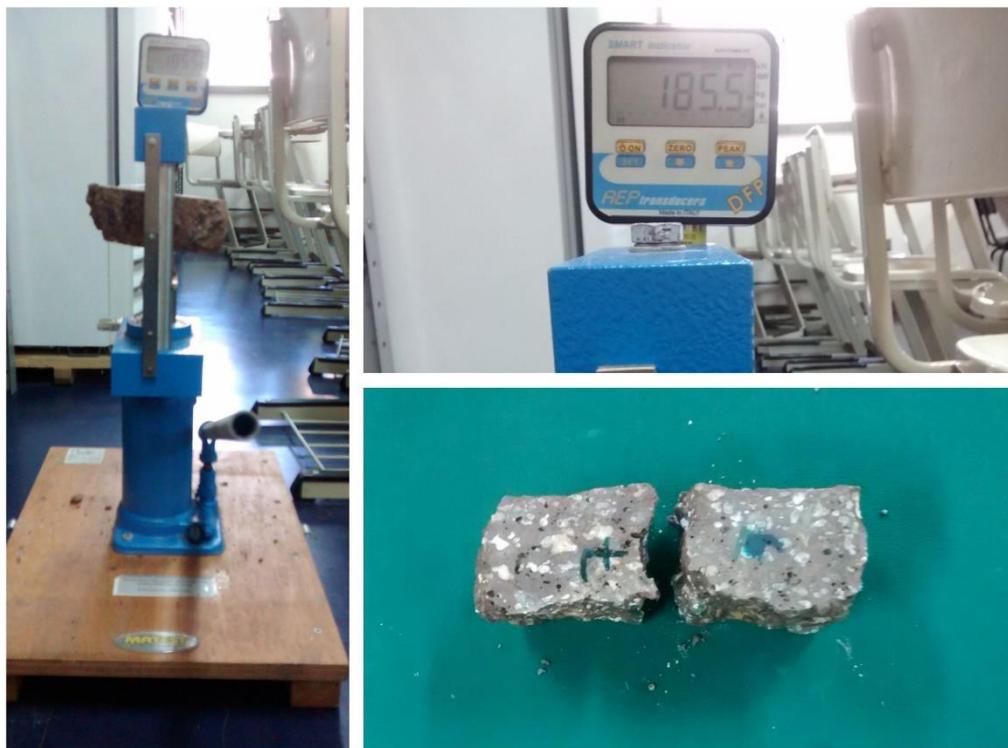


Imagem 3: Equipamento utilizado para realização do ensaio de carga pontual.

#### 5.3.4 Martelo de *Schmidt* (Esclerômetro)

O martelo de *Schmidt* (Imagem 4) é um aparelho simples e acessível, muito usado para avaliação de resistência *in situ* de concreto. Em maciços rochosos é um dos aparelhos mais utilizados para estimar a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade de rocha intacta tanto em laboratório quanto em condições e *in situ* (ISRM, 2014), tal qual compreende a finalidade utilizada em campo neste projeto. O aparelho consiste em uma espécie de pistão acoplado a uma mola que quando pressionado contra uma superfície gera uma energia. A extensão no qual a energia gerada atinge quando é recuperada depende da dureza do material (ou do impacto de penetração, resistência aos danos do material), e é expressa como um percentual máximo de comprimento que a mola atinge antes da liberação do pistão para a sua posição inicial, após o rebote.



Imagem 4: Utilização do equipamento martelo de *schimdt in situ*.

### 5.3.5 Resistência ao atrito e impacto a úmido – *Slake Durability*

O ensaio de durabilidade consiste em submeter pelo menos dez fragmentos de rocha, cada um pesando entre 40 e 60 gramas e que totalizem massa inicial de no máximo 600 g, a cinco ciclos normalizados de secagem e umidificação, além da ação mecânica. Os fragmentos são colocados dentro de redes metálicas cilíndricas com 2 mm de abertura, parcialmente imersos na água, girando a uma velocidade de 20 rpm durante 10 minutos em torno de um eixo horizontal. O choque dos fragmentos de rocha entre si e o contato com a água favorecem a sua desagregação e alteração. A secagem dos fragmentos é realizada em estufas. Após esse processo, pode-se seguir outra umidificação e ação mecânica. Os fragmentos para ensaio e o equipamento utilizado podem ser visualizados na Imagem 5.

O índice de durabilidade corresponde à percentagem de rocha seca que fica retida nos tambores de rede metálica em cinco ciclos completos de umidificação e secagem. Para os ensaios de durabilidade, foram selecionadas amostras de brechas basálticas e de BVA das galerias de drenagem, no intuito de avaliar a influência de minerais argilosos, por serem menos resistentes ao inchaço, enfraquecimento e desintegração.



Imagem 5: Seleção de amostras e equipamento utilizado para o ensaio *Slake Durability*.

## 5.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

### 5.4.1 Petrografia Microscópica

Lâminas petrográficas compõem um dos procedimentos básicos em qualquer tipo de pesquisa geológica. A petrografia permite que se reconheça os minerais presentes, o grau de alteração dos minerais, o tipo de granulometria, a estrutura e a natureza da rocha, muitas vezes revelando características que não podem ser observadas a olho nu.

O microscópio petrográfico de luz transmitida possui uma fonte de luz na parte inferior, sendo a luz conduzida por um sistema de lentes que, atravessando a amostra de rocha, permite que esta seja observada. A imagem resultante deste processo é

ampliada por um sistema de objetivas e oculares. Quando a luz atravessa a lâmina é possível ver as características e minerais contidos no material.

#### 5.4.2 Difractometria por Raios-X

Esta técnica foi utilizada com o objetivo de caracterizar minerais não identificados na microscopia óptica, utilizando raios X para identificação da estrutura cristalina do mineral. Para aplicação da técnica de difração de Raios-X, é necessário que o espaçamento entre as camadas de átomos sobre o qual eles incidem, seja aproximadamente igual ao seu comprimento de onda e os centros espalhadores de onda devem estar espacialmente distribuídos em um arranjo altamente regular (Skoog *et al.*, 2002).

Uma amostra cristalina apresenta essas condições com orientação tridimensional e dimensões próximas aos comprimentos de onda de raios X, atuando como centros espalhadores da radiação (Dana, 1969). Os raios X que incidem sobre um cristal em um ângulo ( $\theta$ ), alguns se espalham pelas camadas mais superficiais, enquanto outros passam para as próximas camadas, gerando o efeito da difração (Klein *et al.*, 1999). Como muitos planos paralelos estão envolvidos na geração de raios x somente ocorrerá interferência entre as reflexões dos planos sucessivos quando a diferença entre o comprimento do caminho entre os raios e planos, ou seja, a diferença de percurso entre os raios refletidos e incididos, for um número inteiro de comprimento de onda ( $\lambda$ ), havendo assim uma interferência construtiva e conseqüentemente, a difração. O padrão observado é o resultado destas interferências dispersadas pelos átomos do cristal (Borges *et al.*, 1980).

### 5.5 PROGRAMAS DIGITAIS

#### 5.5.1 AutoCad

A confecção dos mapas geológicos geotécnicos foi feita através do programa AutoCad versão 2015.

#### 5.5.2 Estereonet 32

O programa Stereonet foi utilizado para representar espacialmente as orientações das descontinuidades mapeadas em campo, sempre relacionando-as com a orientação do túnel.

## 6. RESULTADOS

Este capítulo mostra os resultados obtidos durante o mapeamento geológico geotécnico em campo, realizado em duas etapas nas galerias de drenagem da UHE Itaúba. Os parâmetros dos ensaios tecnológicos e geomecânicos, e por fim a classificação proposta para o RMR. Os resultados estão dispostos através de gráficos, além disso, ao final dos resultados é apresentado o mapa geológico geotécnico com as respectivas classificações geomecânicas obtidas

### 6.1 TRABALHO DE CAMPO

Os dois túneis são dispostos na forma da letra “grega Y”, o túnel de cota 104 m tem comprimento total de 308 m, já o de cota 144 m tem 196 m de extensão. Para o mapeamento os túneis foram divididos em túnel inferior (T1), túnel inferior esquerdo (T1E), túnel inferior direito (T1D), túnel superior (T2), túnel superior esquerdo (T2E) e túnel superior direito (T2D). A avaliação geológico geotécnica do maciço foi realizada através da compartimentação do maciço em trechos de 20 m, variando para mais ou menos de acordo com as suas características geológicas, onde foram mapeadas três litologias distintas. As litologias tratam-se de basalto denso, BVA e brecha basáltica. Todas elas presentes nas duas galerias, e também nas áreas adjacentes da usina. As adversidades encontradas, tais como a baixa iluminação, associada ao tempo de exposição das rochas no local, que encontravam-se cobertas por alteração superficial e até mesmo mofadas, dificultaram o mapeamento. As litologias são descritas abaixo.

- Basalto denso

Encontrados nas galerias inferior e superior, rocha são a pouco alterada em pontos localizados, tipicamente de coloração vermelho escuro a acinzentado, maciço com textura afanítica. Estruturalmente é marcado por fraturas inclinadas a sub-verticais predominantes no túnel inferior, podendo ter orientação preferencial, porém

predominam fraturas com orientação aleatória. Ocorrem também fraturas sub-horizontais mais frequentes no túnel superior, em sua maioria são fechadas, aquelas abertas tem espessura de 1mm a 3 cm preenchidas material síltico argiloso. O fraturamento tem espaçamento que varia de 0,50 m a 1,80 m e com persistência de 0,40 m a 2 m, em diversos pontos as fraturas inclinadas interceptam perpendicularmente todo trecho do túnel. A Imagem 6 mostra o basalto mapeado na galeria inferior.

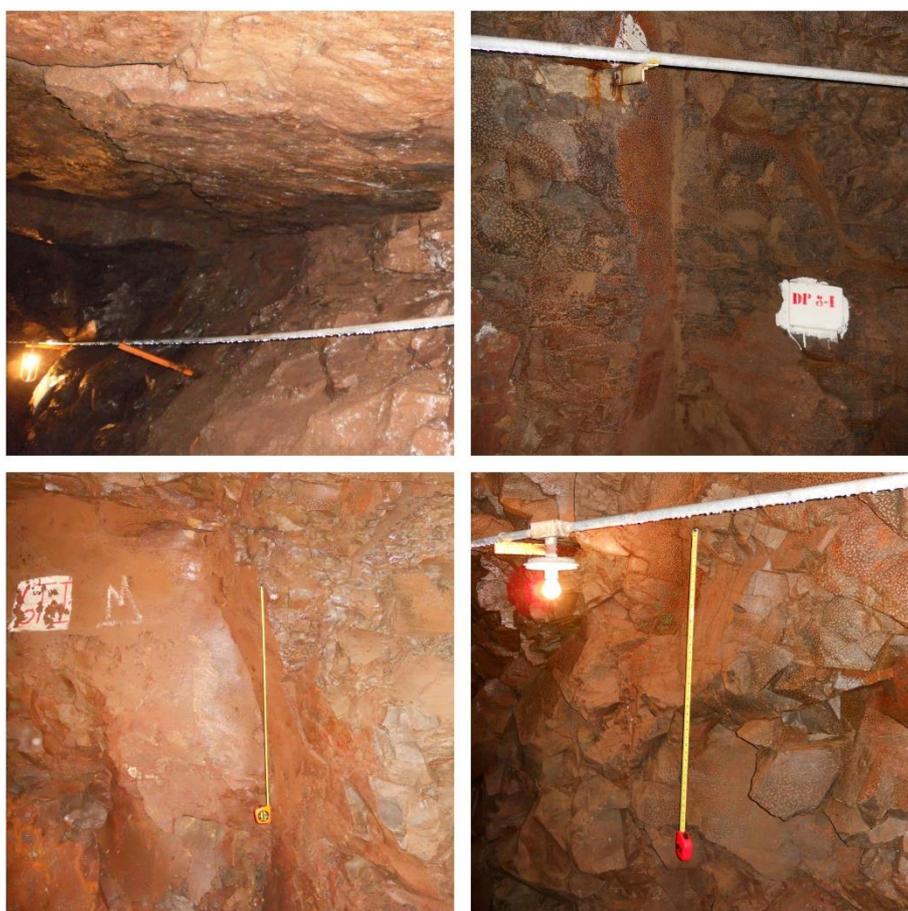


Imagem 6: Basalto denso fraturado na área do T1E.

- BVA

Rocha de cor cinza escuro a preto, são a medianamente alterada, Imagem 7. O BVA é de textura afanítica com vesículas e amígdalas. As vesículas variam de 2 mm a 6 cm, ocorrem frequentemente associados ao BVA. As zonas amígdaloidais compreendem basaltos com matriz afanítica e amígdalas constituídas de feldspatos, quartzo e frequentemente zeólitas e calcitas, as amígdalas têm dimensões que variam

de 4 mm a 5 cm, em pontos localizados formam cavidades que chegam a ter dimensões de até 40 cm preenchidas por cristais euédricos de quartzo, calcitas e zeólitas. Estruturalmente estão pouco fraturadas ao longo de todos trechos mapeados, as fraturas quando ocorrem tem persistência de até 0,50 m e espaçamento médio de 0,80 m a 2 m.



Imagem 7: Basalto vesículo amigdaloidal, túnel superior direito. A foto inferior à esquerda mostra uma das cavidades de basalto vesículo amigdaloidal semi-preenchida por quartzo e zeólita.

- Brecha basáltica

As brechas têm coloração laranja avermelhado, ocorrem de forma aleatória, sem continuidade lateral dispostas em espécies de blocos arredondados com dimensões que variam de centimétricas a métricas. Em dois pontos localizados constituem bolsões que formam cavidades de até 4 m de profundidade, mais frequentemente associadas aos basaltos maciços. São brechas basálticas medianamente a extremamente alteradas suportadas pela matriz, que se constitui de

material areno-argiloso com fragmentos subangulosos a angulosos de basalto pouco alterado a totalmente alterados de tamanho entre granelo e matacão (Imagem 8).

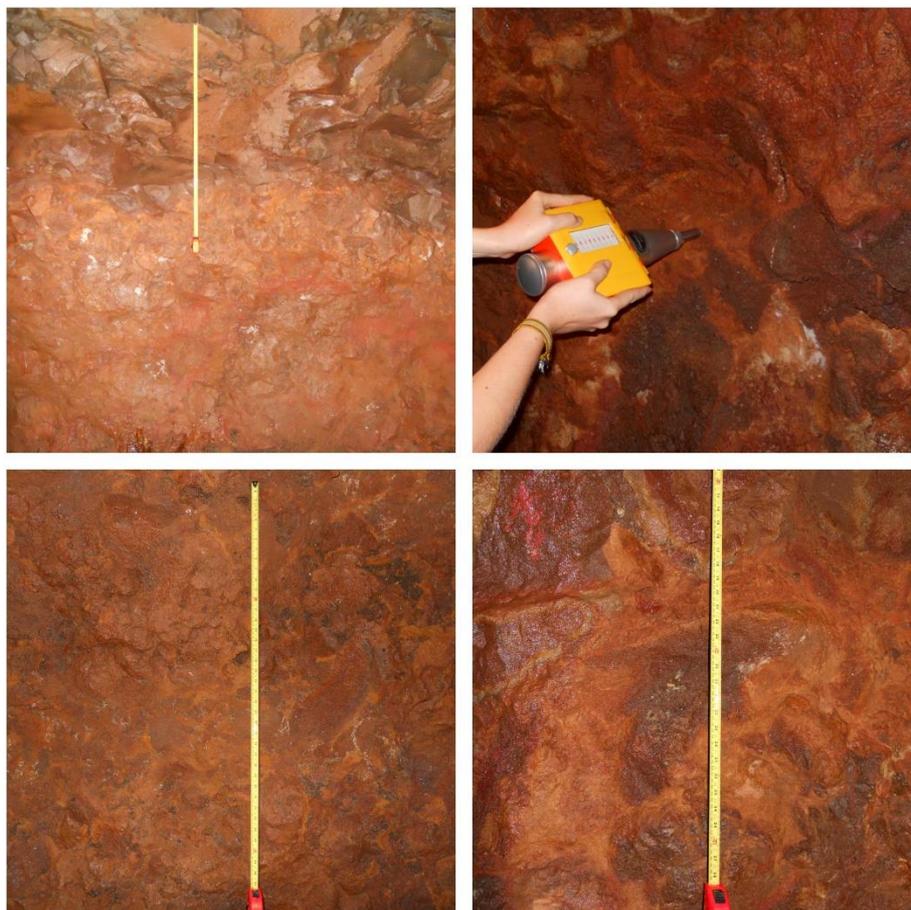


Imagem 8: Situação atual das brechas basálticas, T1E.

São verificados em contato com os basaltos maciços e vesículo-amigdaloidais, as lentes têm pequena continuidade lateral, com dimensões de 0,40 m x 1,00 m aproximadamente. São construídos por sedimentos quartzosos, normalmente muito alterados, podendo serem desagregados com o tato das mãos. As injeções areníticas ocorrem mais frequentemente associadas aos materiais brechados, com extensões de até 23 m, e espessura de 10 cm a 1,00 m. Da mesma forma que as lentes, são sempre muito alterados. A Imagem 9 ilustra as situações descritas.



Imagem 9: As fotos superiores ilustram uma porção mais arenosa, as fotos inferiores mostram diques areníticos, ambas localizadas no túnel inferior direito.

Quanto aos aspectos estruturais, é importante abordar a questão da junta-falha, verificada tanto no túnel inferior como no superior. No túnel inferior à 10 m da entrada do T1, a junta-falha intercepta sub-horizontalmente o eixo de avanço do túnel em uma zona diaclasada do basalto compacto, tem inclinação entre 20 e 25° e direção 100-280 disposta paralelamente à orientação do túnel inferior no túnel superior é praticamente horizontal, tem orientação preferencial 05/085.

A junta-falha, no T1, tem persistência de pelo menos 20 m (trecho em que aflora no túnel), espaçamento variando entre 10 cm e 1,10 m, com preenchimento de material avermelhado muito alterado e fragmentos de basalto imersos em uma matriz arenítica com porções argilosas. Os fragmentos de basalto são subangulosos a angulosos de tamanho entre 0,5 a 30 cm. Nos 34 m, 42m e 60 m de avanço do túnel ocorrem caimentos na abóbada que formam buracos no teto, com profundidade estimada de 6 m e largura de 2,10 m.

De acordo com as sondagens e seções geológicas elaboradas na fase construtiva, possivelmente tratam-se de bolsões de areia que ocorriam na área e no momento do desmonte da galeria vieram a colapsar devido a sua baixíssima resistência. Os três pontos são revestidos com tela soldada. Associado a este fato, possivelmente a junta falha sofre uma mudança no ângulo do mergulho interceptando o T1 acima dos bolsões areníticos.

No túnel superior a junta falha intercepta o T2E em uma zona também muito diaclasada de basalto compacto, atravessando a abóbada do trecho e conformando a geometria do túnel. É visível que na fase de escavação de túnel as rochas da abóbada colapsaram. A junta-falha tem orientação 05/085, abertura de 7 cm a 1, 20 m, preenchida por fragmentos de basalto médio a muito alterados imersos em uma massa arenítica com porções argilosas. A persistência neste trecho é de aproximadamente 17 m.

Os resultados do levantamento estrutural realizado nos túneis estão representados na forma de diagramas de rosetas ilustrados nas Figuras 5, 6 e 7.

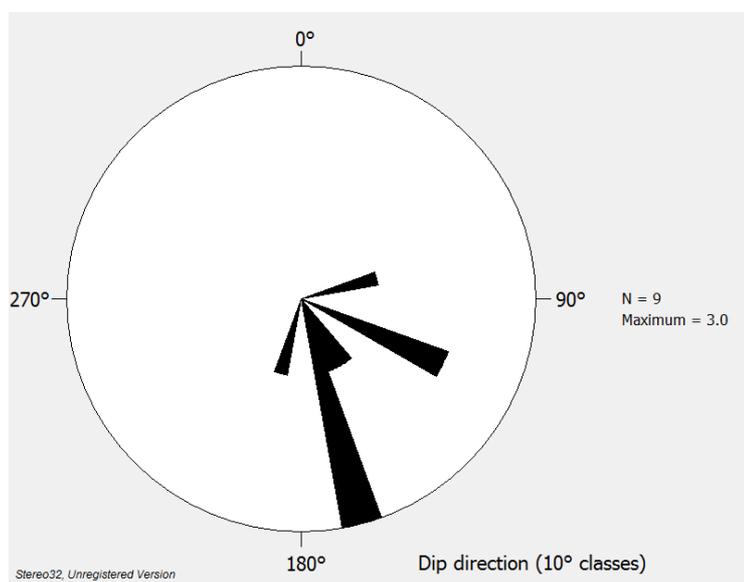


Figura 5: Diagrama de rosetas representando a direção das fraturas medidas no T2D a partir do *software stereo 32*.

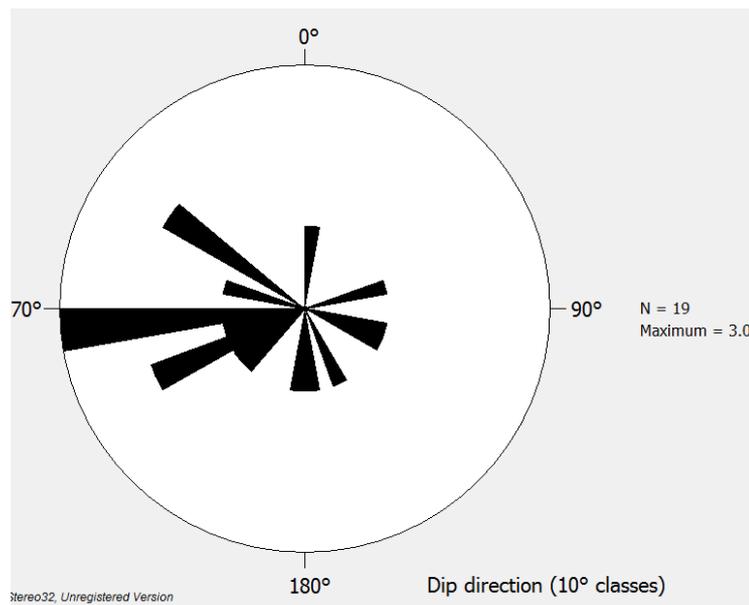


Figura 6: Diagrama de rosetas representando a direção das fraturas medidas no T1E a partir do software *stereo 32*.

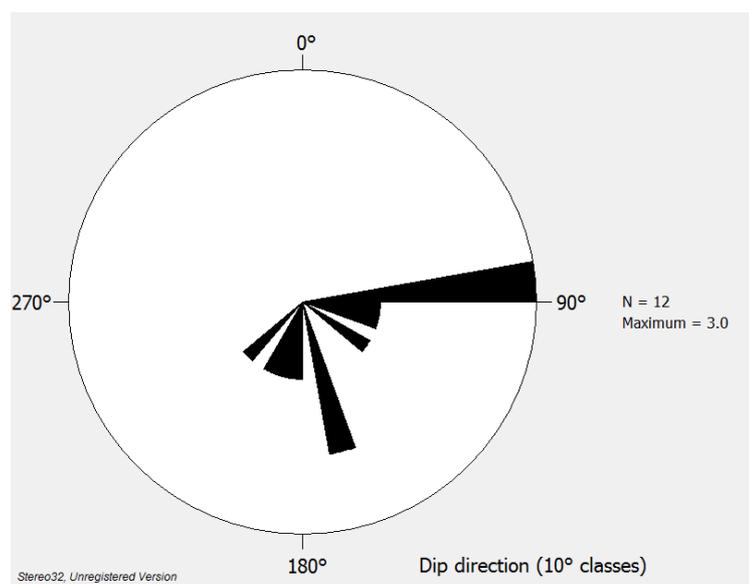


Figura 7: Diagrama de rosetas representando a direção das fraturas medidas no T2E a partir do software *stereo 32*.

## 6.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Os resultados a respeito da petrografia consistem em análises de difração de raios x para identificação de argilas, e interpretação de lâminas delgadas para microscopia.

### 6.2.1 Petrografia Microscópica

As lâminas delgadas foram confeccionadas a partir de 3 amostras de brechas basálticas e 3 amostras de BVA, por serem os materiais que conferem um grau de menor resistência ao túnel.

As lâminas analisadas em BVA mostram como características comum estrutura vesículo amigdalar com matriz afanítica que indicam rápida cristalização associada a presença de voláteis no magma. Apresentam-se hipovítreas a hipocristalinas e constituem cerca de 20 a 30 % do volume total. As amígdalas são frequentemente arredondadas de tamanho entre 0,2 e 6 mm com bordas corroídas, a mineralogia de preenchimento é representada por minerais secundários tais como zeólitas, quartzo (por vezes com forma esquelética) e carbonato. Os cristais de zeólita preenchem totalmente a amígdala, quando preenchidas por quartzo os cristais são alotriomórficos a hipidiomórficos de tamanho 0,1 a 3 mm. Os carbonatos têm geometria euédrica com dimensões que vão de 0,1 a 3 mm. A matriz é extremamente alterada composta por vidro, possivelmente plagioclásio alterado, olivina e piroxênio. Apresenta alteração moderada, evidenciada pela presença de óxidos de ferro. A Figura 8 ilustra as lâminas delgadas correspondentes às amostras de BVA.

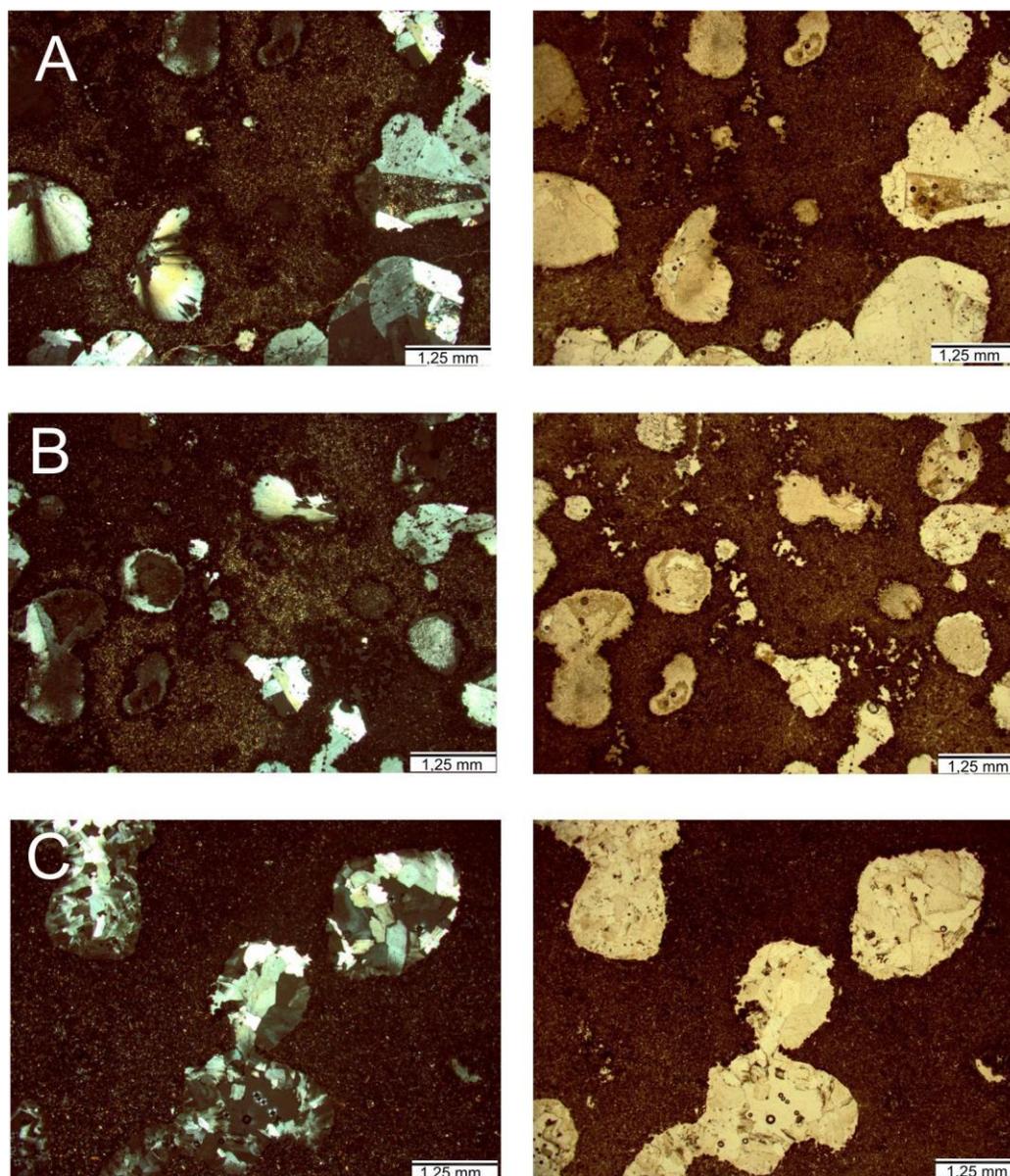


Figura 8: Fotomicrografia mostrando os aspectos gerais das lâminas delgadas de BVA com textura em cavidades. Lado esquerdo LN, lado direito LP. A e B: Amígdalas preenchidas por zeólita. C: Amígdalas preenchidas cristais esqueléticos de quartzo, quartzo e calcita hipidiomórficos.

As imagens das lâminas petrográficas das brechas basálticas podem ser observadas na Figura 9. Caracterizam-se por estrutura vesículo amigdaloidal, textura vesiculada imersa em matriz afanítica. Apresentam-se hipovítreas a hipocristalinas e constituem cerca de 40 a 60 % do volume total. A geometria das amígdalas é sempre arredonda, com espessuras de até 6 mm. Apresentam bordas corroídas e podem estar interconectadas entre si. Mineralogicamente é provável que a matriz seja constituída por plagioclásio, olivina e piroxênio, é constituída por alta quantidade de

material vítreo. Os minerais secundários são representados principalmente por quartzo e calcita, que preenchem as vesículas.

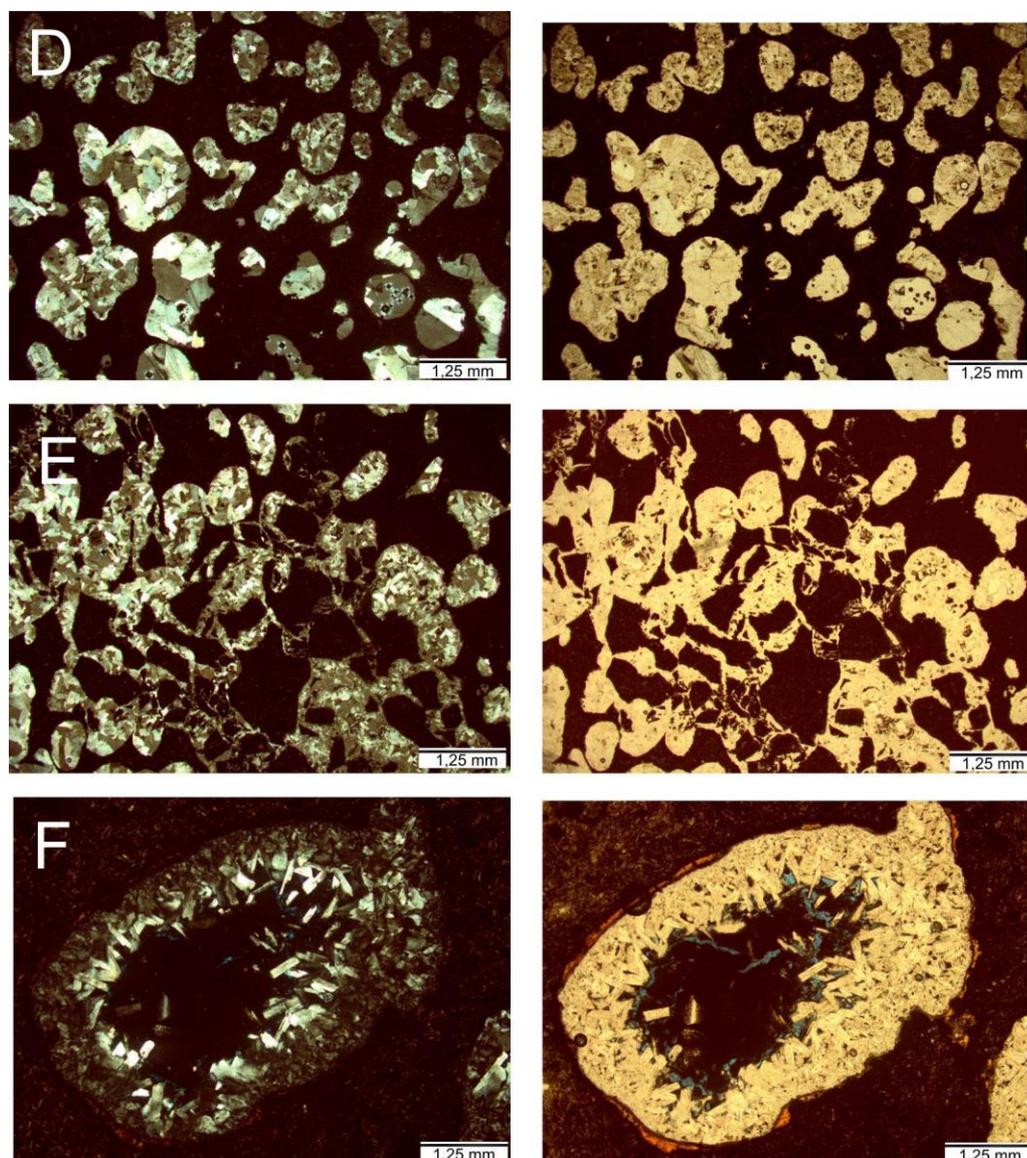


Figura 9: Fotomicrografia ilustrando aspectos gerais em lâminas de brecha basáltica. A e B: textura vesiculada, com interconexão. F: vesícula com quartzo de geometria esqueletal.

### 6.2.2 Difração por Raios-X

As duas análises foram realizadas em amostras de brecha basáltica (BRE) e basalto vesículo amigdaloidal (BAS) com o objetivo de identificar os argilominerais presentes nestas litologias. A illita apresenta estrutura cristalina 2:1, tendo ligações rígidas que dificultam a permeabilidade, portanto são relativamente expansivas. Da mesma forma, as esmectitas apresentam estrutura 2:1 porém são mais propícias a

alteração e expansão por conterem moléculas de água entre as suas camadas tetraédricas. Abaixo seguem os resultados das análises de DRX, Figuras 10 e 11.

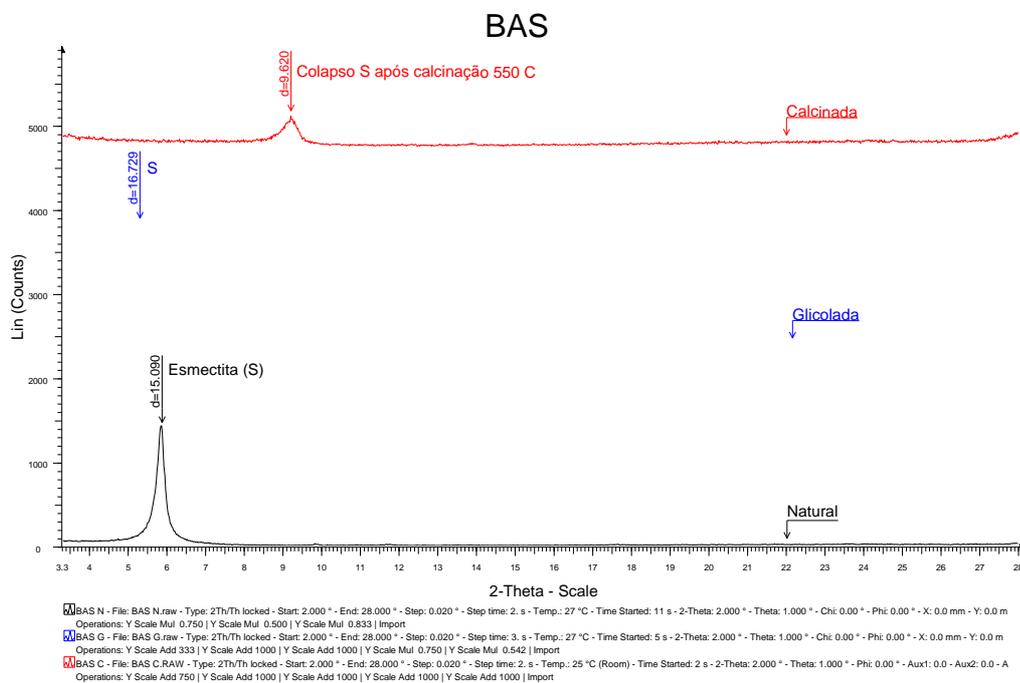


Figura 10: Difratograma de Raios X em BVA amostrado no T1E.

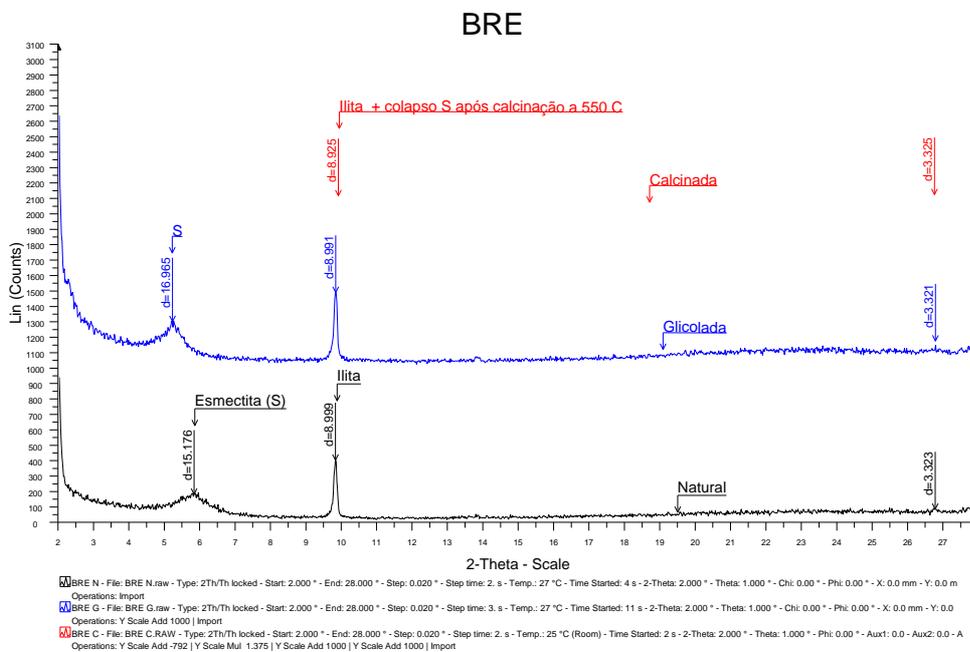


Figura 11: Difratograma de Raios X em amostra de brecha basáltica coletada no T1E.

### 6.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Os ensaios tecnológicos foram fundamentais para o desenvolvimento da classificação geomecânica, garantindo uma confiabilidade maior dos resultados obtidos. Desta forma, optou-se por apresentá-los na forma de gráficos, para uma melhor visualização.

#### 6.3.1. Índices Físicos

Os Gráficos 01, 02 e 03 mostram a taxa de absorção de água aparente nas amostras analisadas, comparando os resultados obtidos com médias de resultados autores encontrados na literatura. As amostras de brecha basáltica e BVA apresentam valores muito similares, taxas de absorção maiores que 6,0 correspondem a rochas pobres para o uso geotécnico (Leinhart, 2003; Lathan *et al.*, 2006; Ozden & Topal, 2007).

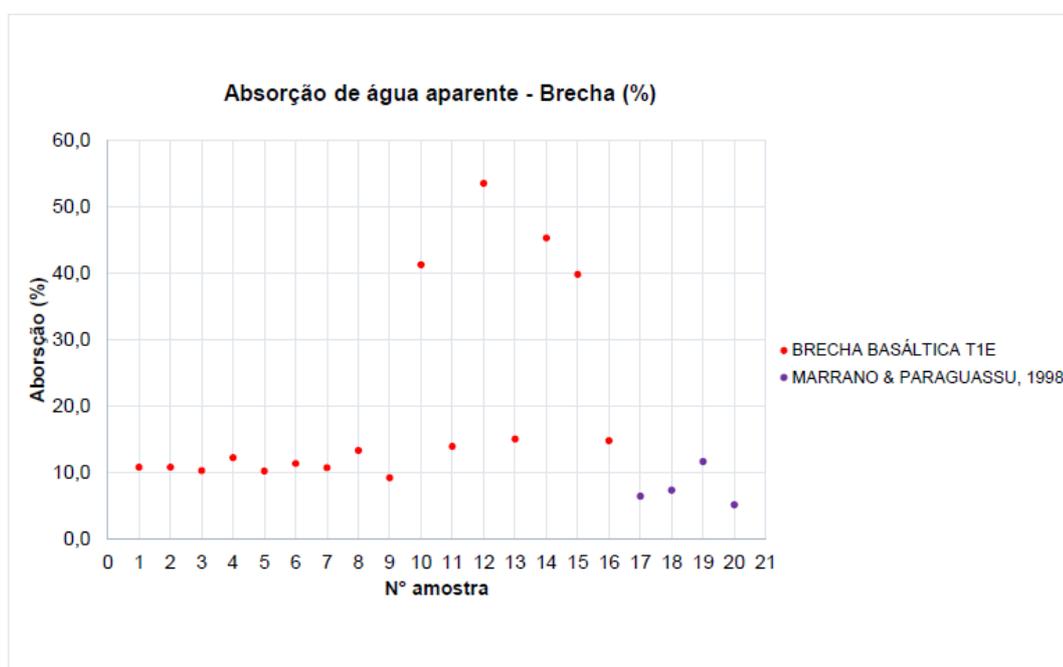


Gráfico 1: Absorção de água aparente para amostras de brecha basáltica da UHE Itaúba.

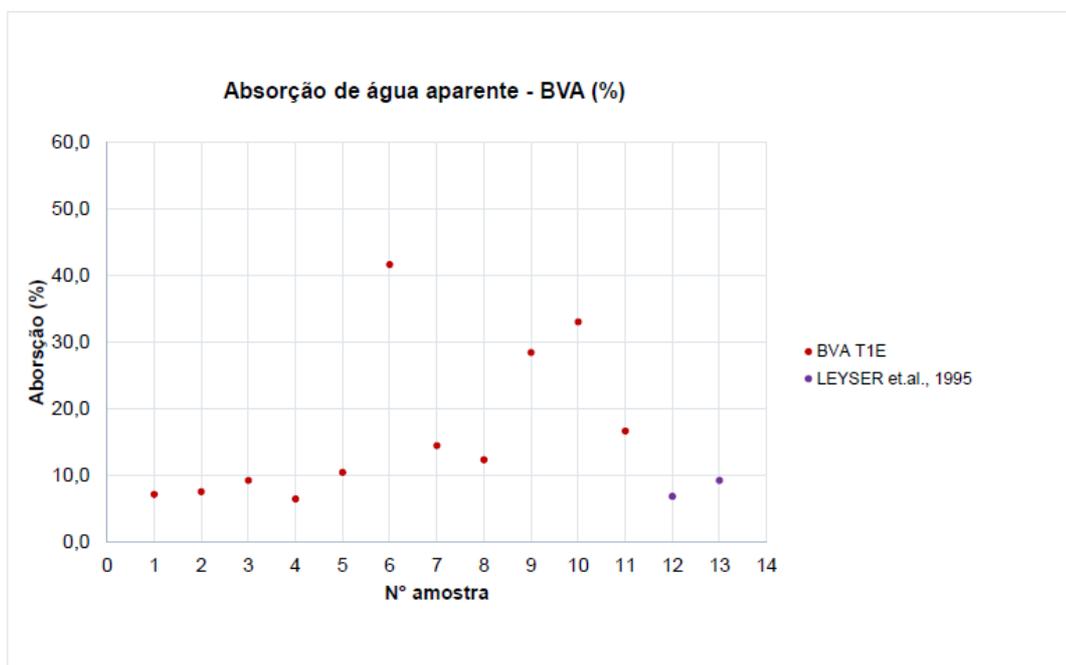


Gráfico 2: Absorção de água aparente para amostras de BVA da UHE Itaúba.

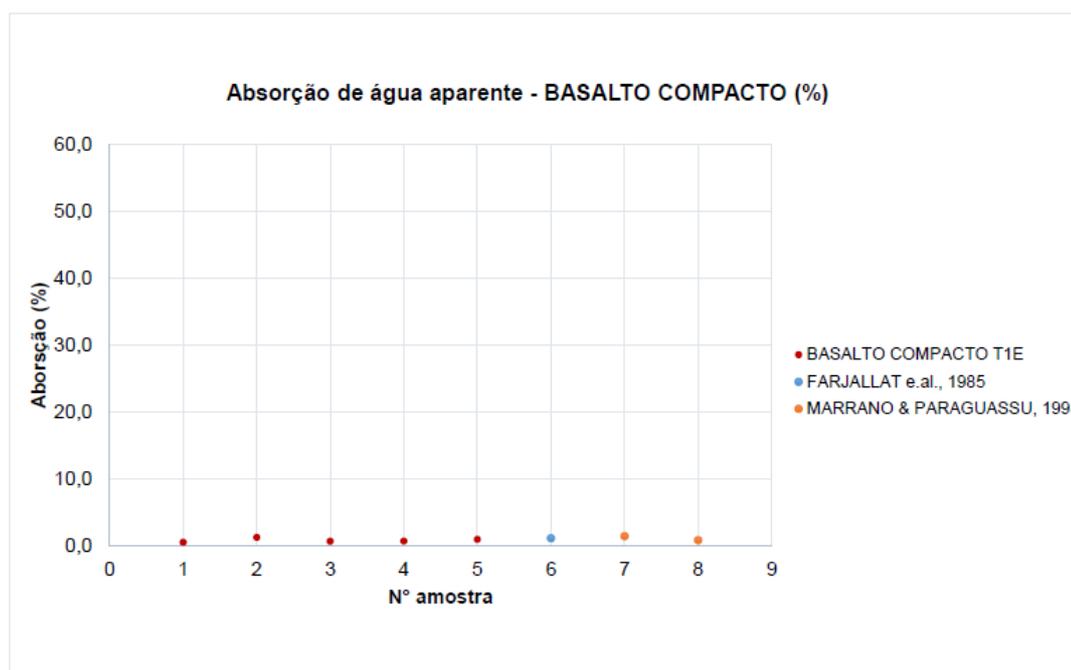


Gráfico 3: Absorção de água aparente para amostras de basalto compacto da UHE Itaúba.

Basaltos compactos são muito conhecidos na área da geotecnia por apresentarem as melhores características de um material para uso na construção civil, devido a sua alta coesão e resistência, baixa permeabilidade, como pode ser observado no Gráfico 03.

### 6.3.3 Índice de Resistência à Carga Pontual e Martelo de Schmidt

Os resultados de resistência obtidos para as litologias avaliadas mostram padrões de resistência similares para BVA e brecha, com valores em torno de 30 a 40 MPa (compressão uniaxial) enquanto que contrastam com os valores obtidos para resistência à compressão uniaxial nos basaltos compactos, aproximadamente 160 MPa. As Imagens 10 a 12 mostram os corpos de prova antes e após o ensaio de carga pontual.



Imagem 10: Basalto compacto antes do ensaio de carga pontual e após o rompimento.



Imagem 11: Brecha basáltica antes do ensaio de carga pontual (esquerda) e após o rompimento (direita).



Imagem 12: BVA antes do ensaio de carga pontual (esquerda) e após o rompimento (direita).

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de carga pontual nos corpos de prova de Brecha e BVA são apresentados nos Gráficos 4 e 5.

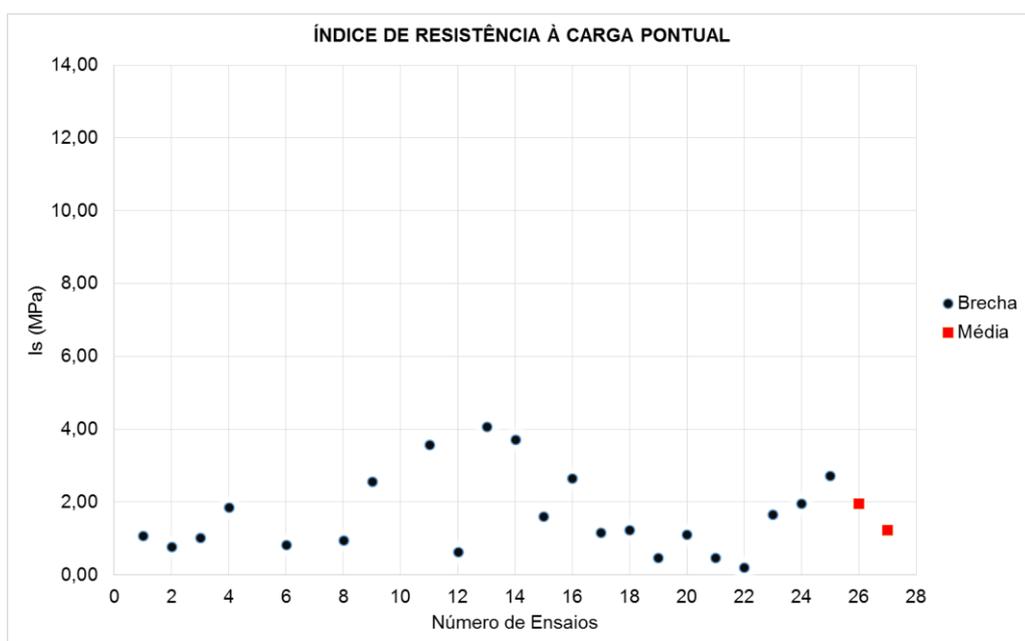


Gráfico 4: Índice de resistência à carga pontual em brecha basáltica.

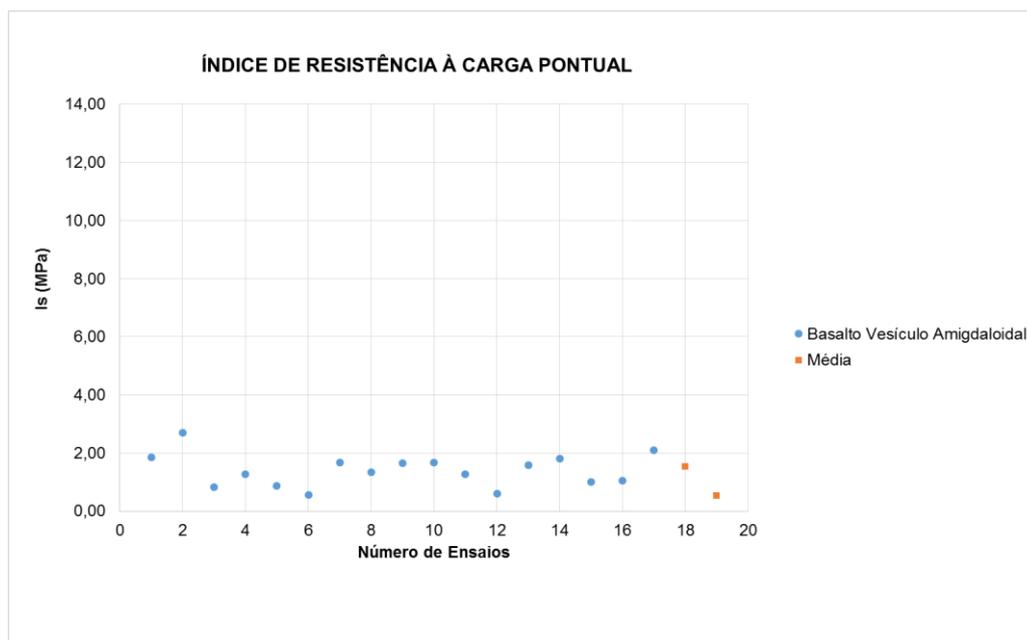


Gráfico 5: Índice de resistência à carga pontual em BVA.

Para avaliação do índice de carga pontual para os basaltos compactos foram realizados testes de ruptura em apenas 6 corpos de prova, em função de se conhecer previamente as resistências esperadas, considerando as diversas pesquisas que abordam o tema e apresentam resultados para as litologias, os valores de índice de carga pontual encontrado pode ser visto abaixo, Gráfico 6.

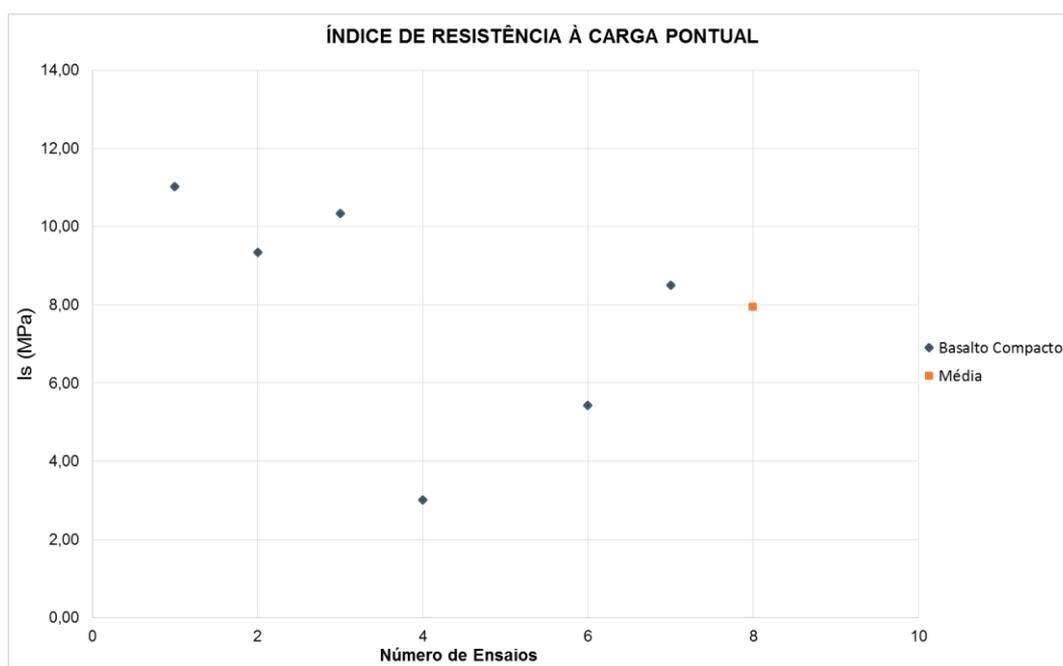


Gráfico 6: índice de resistência à carga pontual em basalto compacto.

#### 6.3.4 Slake Durability

Foram realizados 5 ciclos para as amostras de brecha e BVA. A Imagem 13 mostra a situação das amostras após o 5º ciclo ensaiado. Observa-se amostras mais alteradas com bordas suavizadas. Ao tato as amostras são sensivelmente mais lisas que antes do ensaio.



Imagem 13: Brecha (esquerda) e BVA (direita) após o 5º ciclo do *slake durability test*.

Os índices de durabilidade das amostras ensaiadas estão apresentadas no Gráfico 7. As duas litologias apresentaram valores muito similares, para as amostras de brecha a perda de massa de foi de 6,42 % enquanto que as de BVA apresentaram percentual de 5,91 %. Tal situação é explicável pela intensa presença de vesículas e amígdalas, que quando expostas a condições aquosas alteram consideravelmente a constituição mineral da rocha. Nota-se um arredondamento das arestas nas amostras após o 5º ciclo, além de um polimento que confere superfícies alisadas aos fragmentos. De acordo com Leinhart (2003), resultados de índice de durabilidade com valores maiores que  $I_d (\%) = 80$ , são classificadas como excelentes, materiais com esta classificação podem ser usadas em diversas obras de engenharia civil.

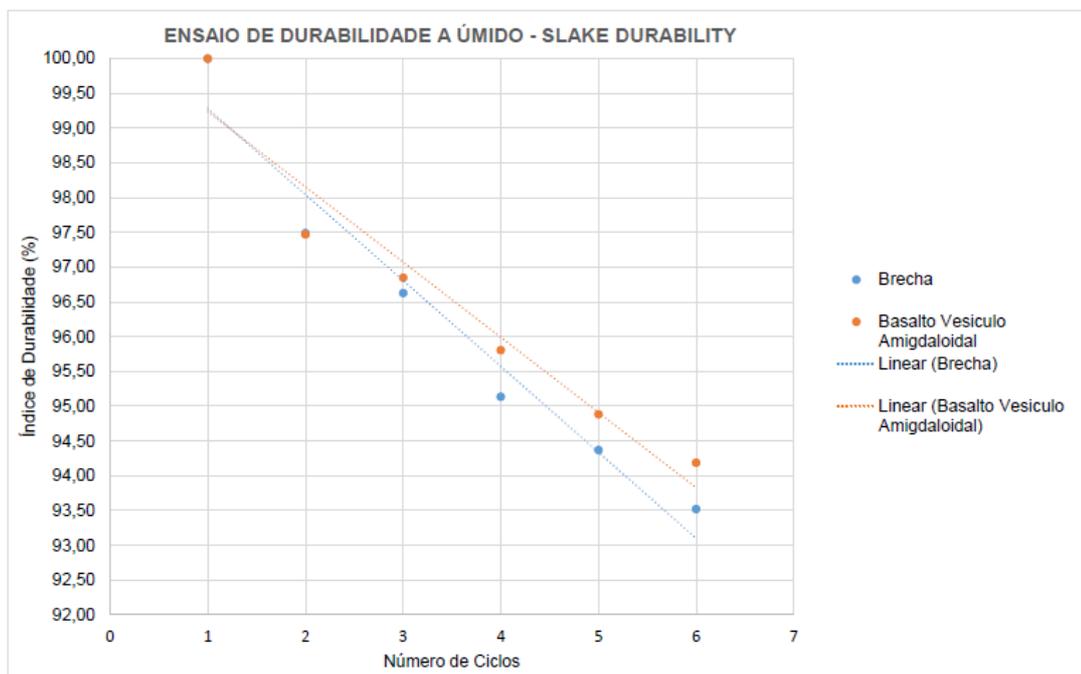


Gráfico 7: Resultado de índice de durabilidade para as amostras de brecha e BVA.

Foram gerados a partir dos resultados uma quantidade expressiva de valores numéricos, podendo-se atribuir um valor padrão para cada litologia de acordo com os respectivos ensaios utilizados neste projeto. Os valores médios obtidos são apresentados no Quadro 2, onde se compara com dados existentes na bibliografia.

AMOSTRA/ ENSAIO	Massa específica aparente seca (p seca) (g/cm <sup>3</sup> ) média	Absorção de água aparente (%) média	Porosidade aparente média	V <sub>p</sub> seca (km/s) média	Is 50 (Mpa) média	Índice de Durabilidade (%)
Brecha Basáltica UHE Itaúba	1,64	20,20	26,90	3,24	1,95	93,52
UHE Canoas (Marrano &Paraguassu, 1998)	2,21	11,70	24,01	–	–	–
UHE Foz de Areia (Pinto et. al. 1985)	2,30	–	12,00	–	–	–
Mina Maestra (Selmo, 2014)	2,20	8,20	17,40	–	3,10	95,92
Oliveira & Zuquette (2014)	–	–	–	–	3,75	–
BVA UHE Itaúba	1,61	15,49	19,12	4,39	1,65	94,19
UHE Salto (Leyser et al, 2010)	2,18	9,30	19,09	–	–	–
	2,41	6,90	16,60	–	–	–
Oliveira & Zuquette	–	–	–	–	5,51	–
Basalto Compacto UHE Itaúba	2,85	0,90	2,56	6,00	7,95	–
UHE Capivari Cachoeira (Farjallat et al, 1972)	2,86	1,30	3,80	–	–	–
UHE Canoas (Marrano &Paraguassu, 1998)	2,39	0,90	2,40	–	–	–
	–	–	–	5,8 - 6,6	8,84	–
Oliveira & Zuquette (2014)	–	–	–	–	8,39	–
	–	–	–	–	8,53	–

Quadro 2: Parâmetros tecnológicos das litologias na UHE Itaúba em comparação a fontes bibliográficas.

## 6.5 CLASSIFICAÇÃO RMR

Ao final da etapa de campo, foram mapeados 514 m de túnel, obtendo-se a classificação de 3 classes distintas através do somatório de notas atribuídas e que foram definidas dentro dos seus intervalos de distribuição como maciço regular, bom e muito bom.

Para o T1, o maciço foi compartimentado em 3 zonas distintas, sendo cada uma delas representada por uma classe RMR. A pior classe avaliada (regular) está relacionada a presença da junta falha (classe IV). As outras duas classes dizem

respeito a zona dos antigos bolsões, possivelmente preenchidos por brecha onde atualmente estão revestidas com malhas de proteção (classe III). O trecho final do túnel, constituído de basalto compacto com zonas de brechação, é classificado com uma classe II.

Avançando para o T1E, são mapeadas as classes II e III ao longo do percurso, correspondendo a compartimentações representadas por brecha basáltica (classe III) e basalto compacto fraturado, sem orientações preferenciais (classe II). A classificação do túnel T1D corresponde a classe III.

O mapeamento no T2 resultou em uma classe regular (III), definida principalmente pela constituição basáltica vesicular amigdaloidal predominante, associada a presença de fraturas no trecho. A aplicação do *RMR* ao T2D resultou na classe de características muito boas (classe II), condicionada pela presença de basalto compacto na abóbada e parcialmente nas paredes, associado a baixa quantidade de fraturas. Classes II e III foram obtidas para as compartimentações rochosas no T2E, novamente estando a classe regular associada a constituição basáltica vesicular amigdaloidal. A Figura 12 ilustra as legendas referente aos mapas geotécnicos. Os mapas geológico-geotécnicos são ilustrados nas Figuras 13 a 18.

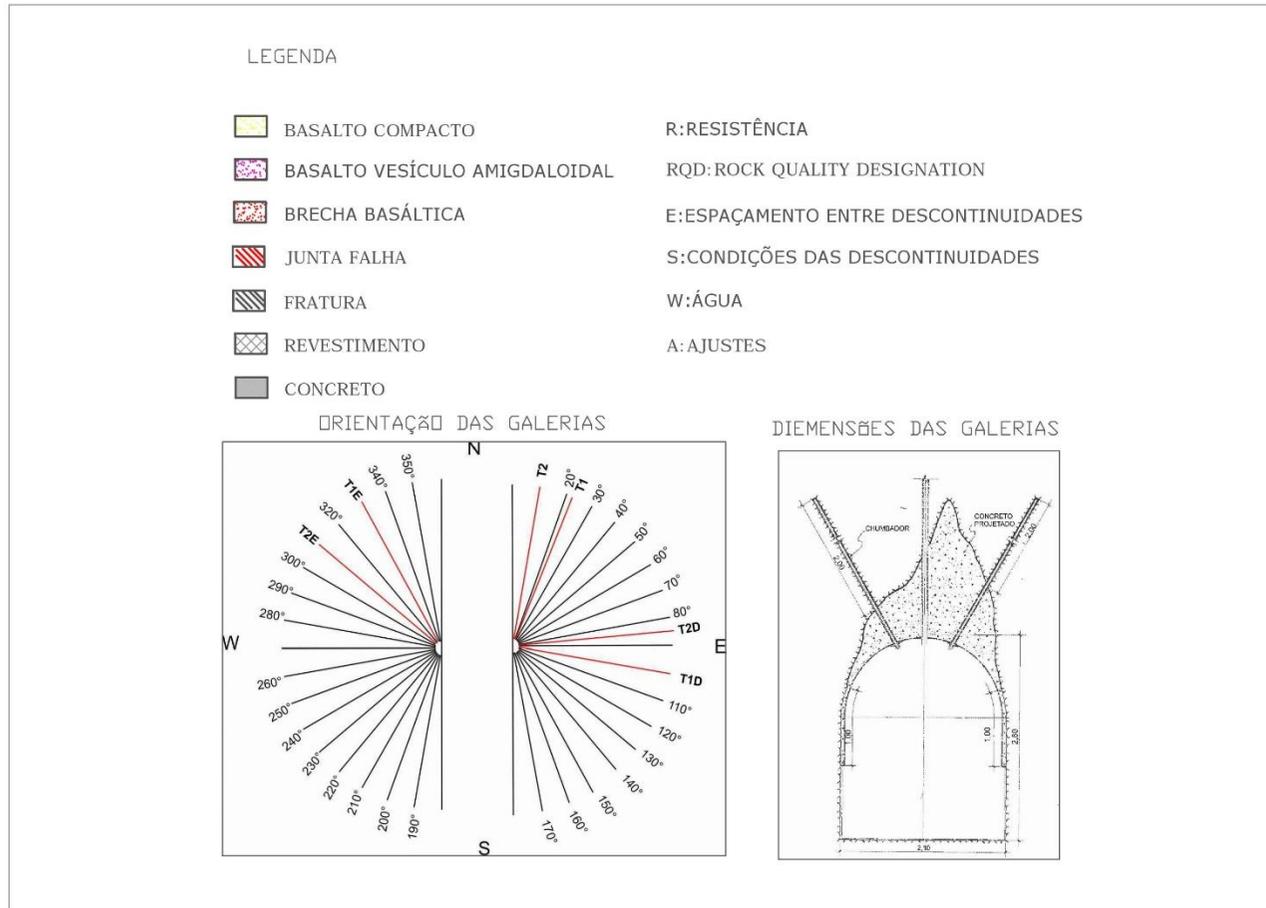


Figura 12: Legendas dos mapas geológico geotécnicos.

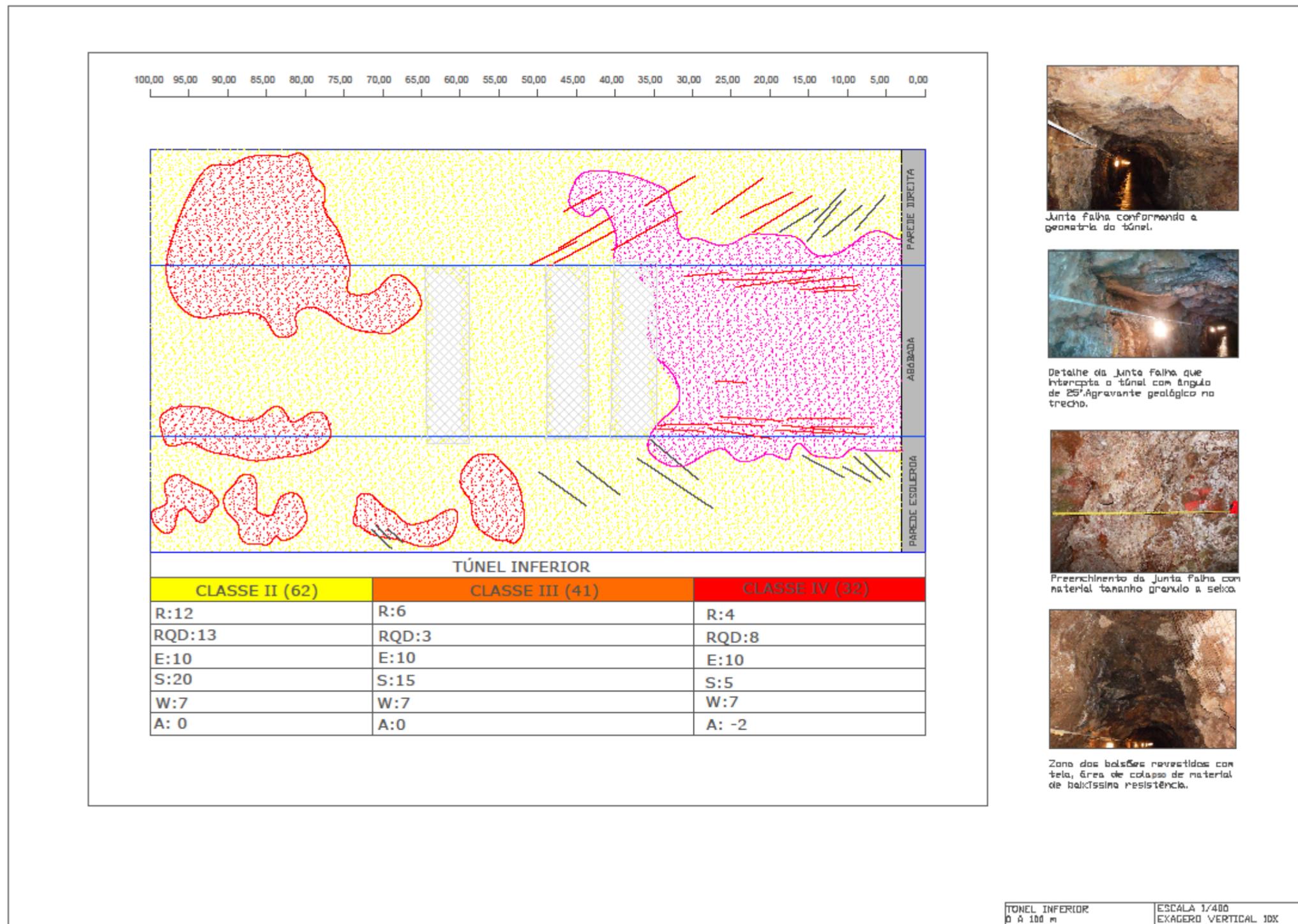


Figura 13: Mapa geológico geotécnico T1.

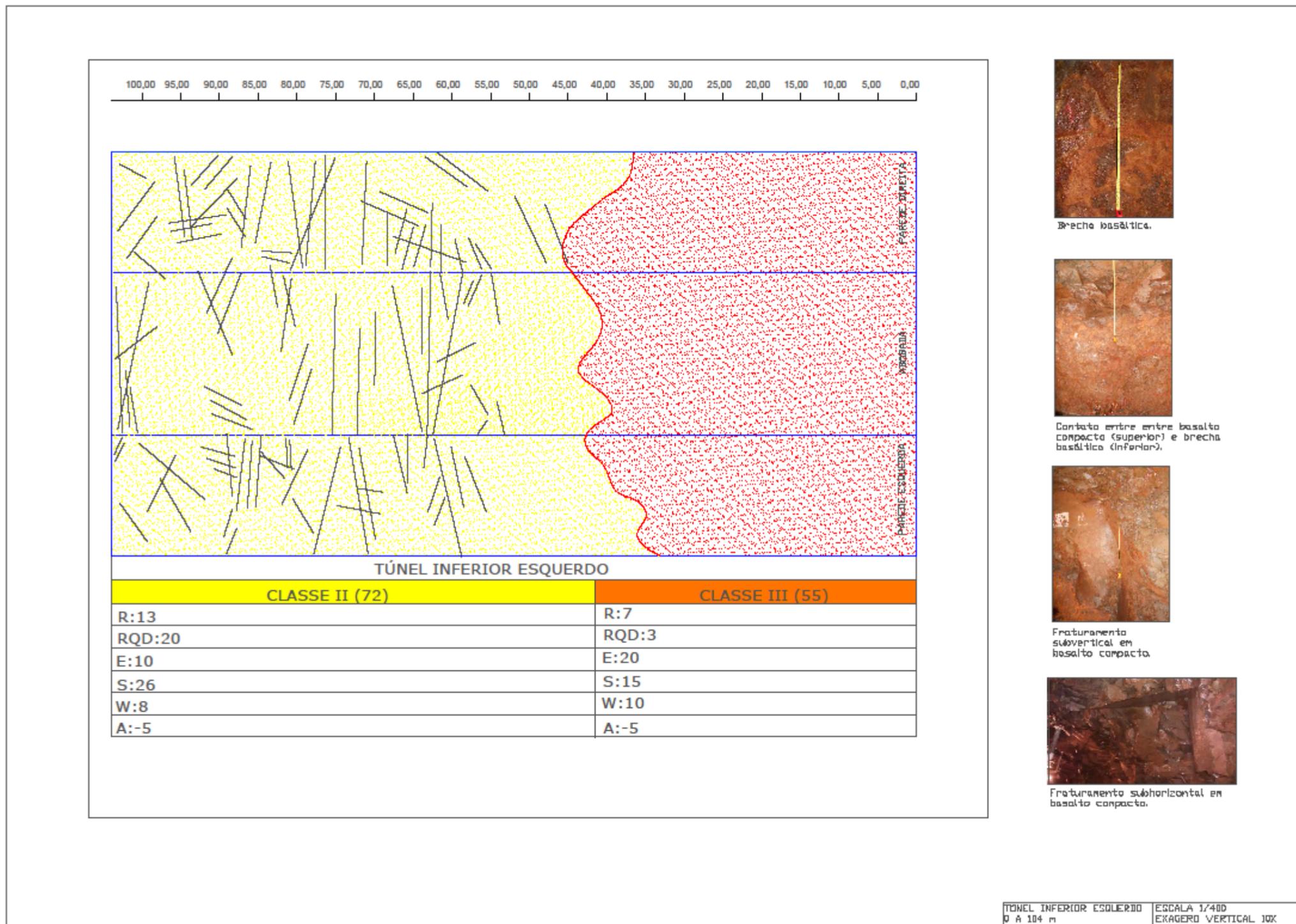


Figura 14: Mapa geológico geotécnico T1E.

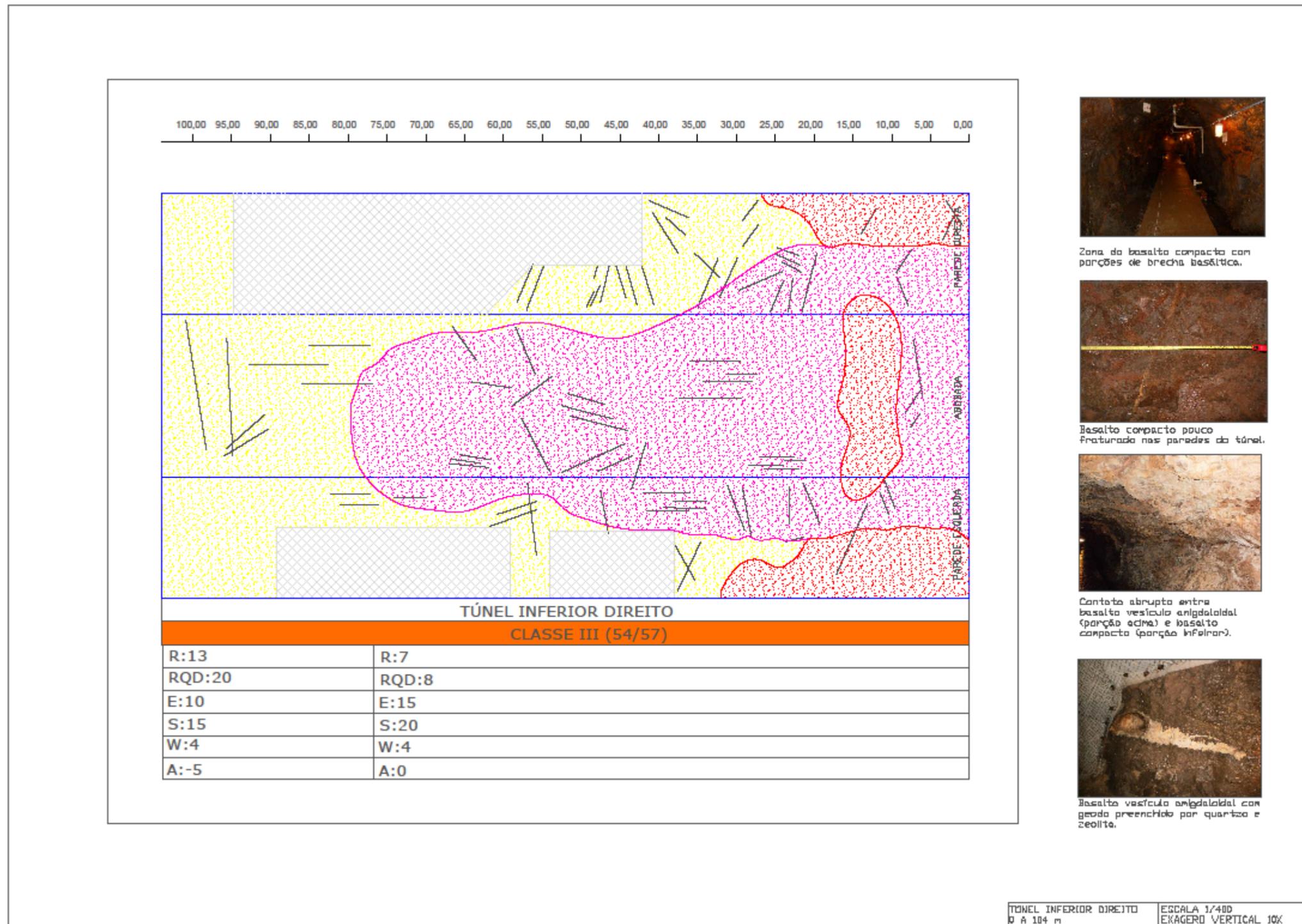


Figura 15: Mapa geológico geotécnico T1D.

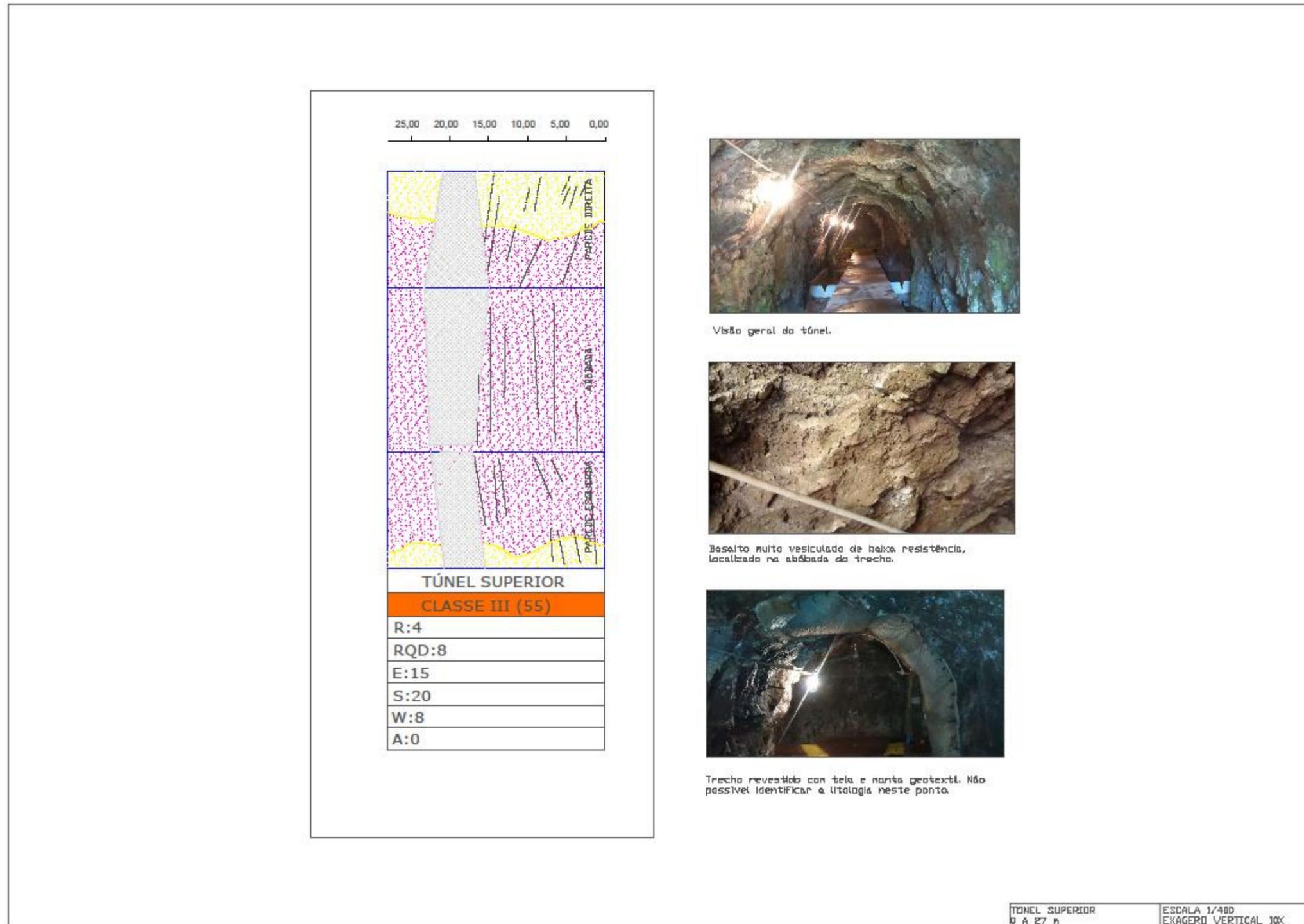


Figura 16: Mapa geológico geotécnico T2.

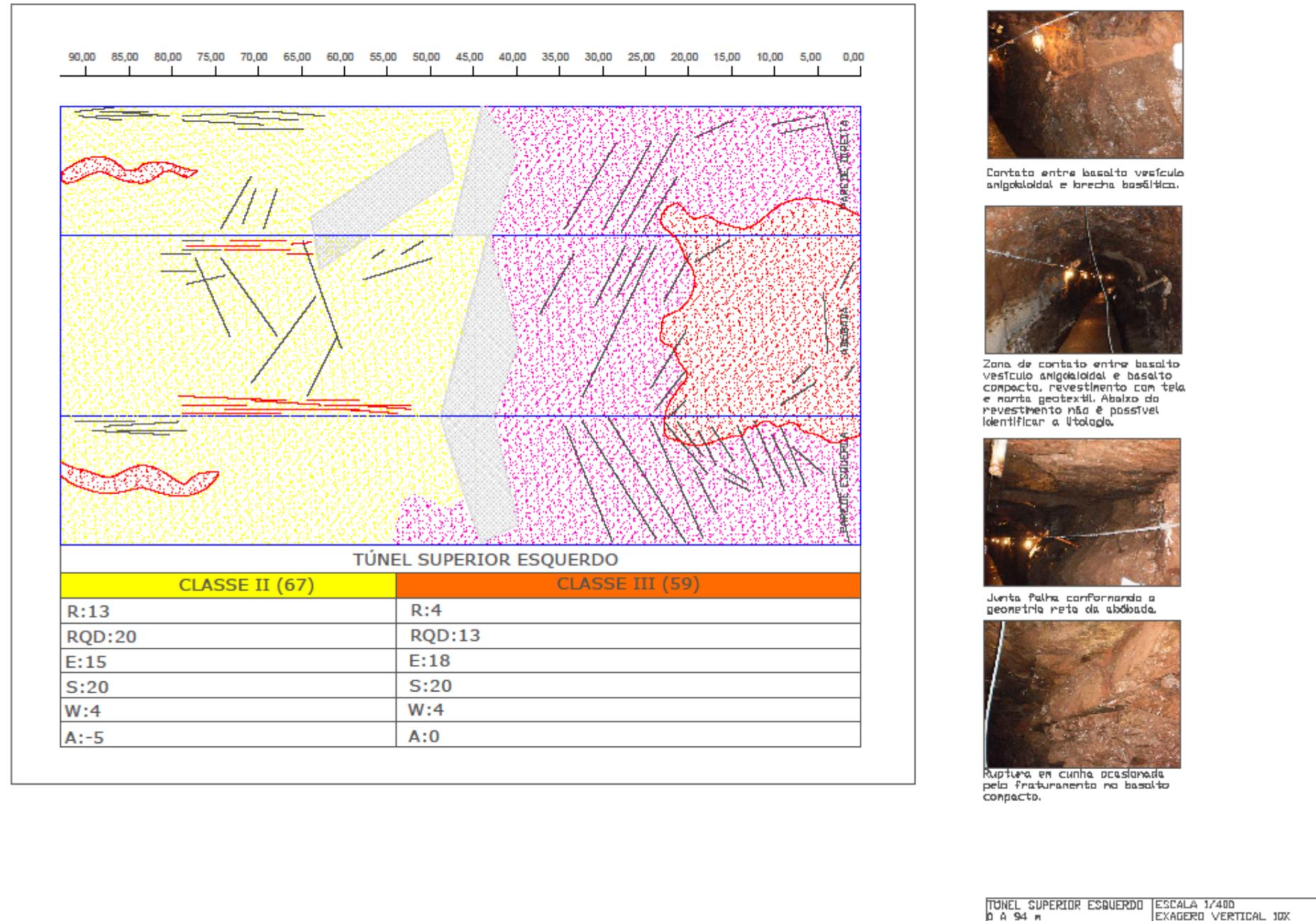


Figura 17: Mapa geológico geotécnico T2E.

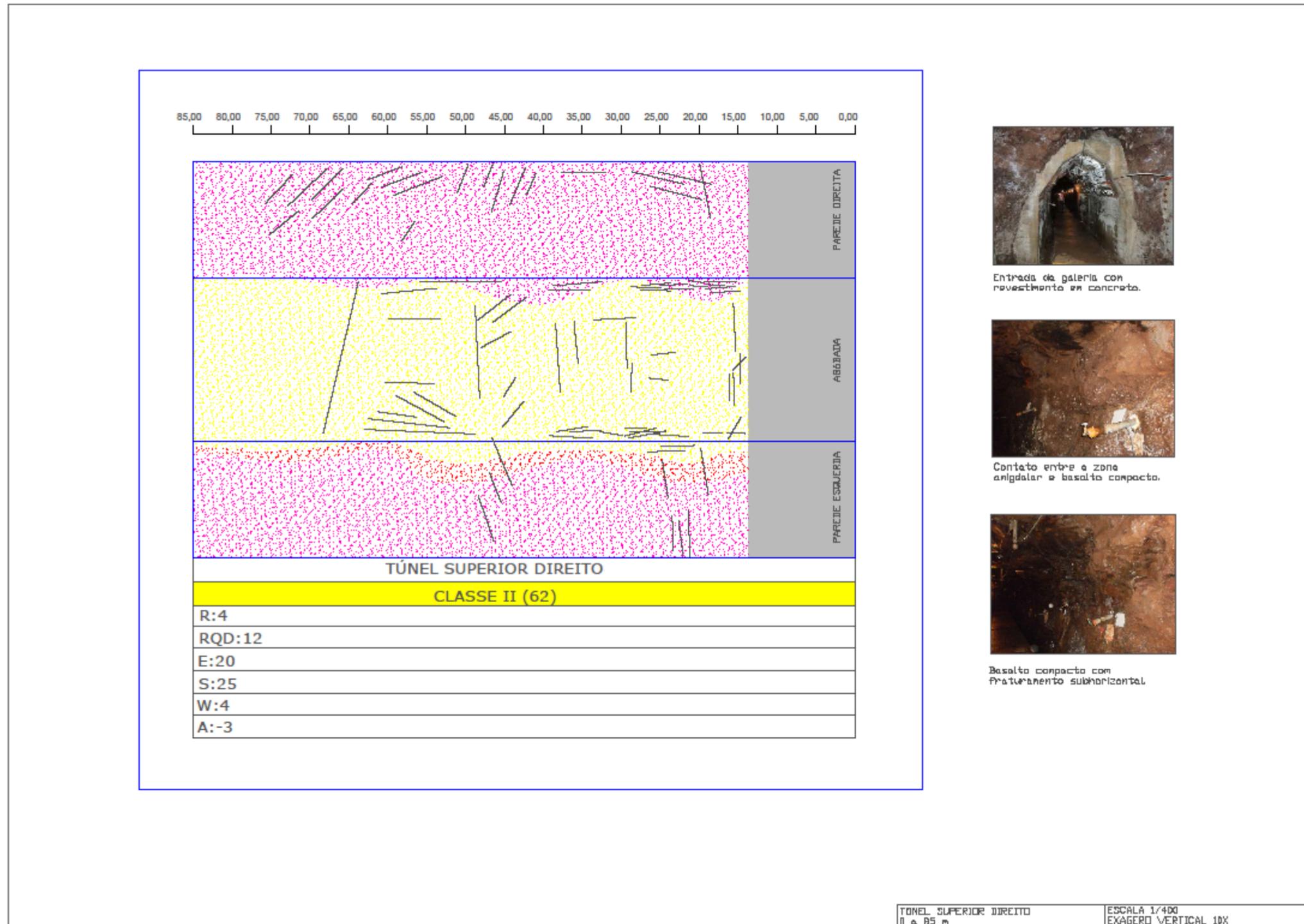


Figura 18: Mapa geológico geotécnico T2D

## 7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da integração dos resultados obtidos é possível perceber a tendência de classes associada às respectivas litologias, fato que pode ser analisado consultando-se os mapas geotécnicos. Os 514 m dos túneis foram divididos em 10 sub áreas, cada uma definida dentro uma classe RMR. As três classes obtidas são descritas abaixo.

Classe II: As rochas basálticas maciças representam qualidades de resistência muito boas (classe II), primeiramente por ser um material com elevada resistência ao cisalhamento quando submetida a pressões de carga, com valores em MPa de 160, variando com frequência para valores mais altos. Nota-se que a presença de descontinuidades agravam consideravelmente a qualidade do maciço, para o uso na engenharia.

Classe III: As zonas brechadas estão sempre associadas a classes regulares (III) inicialmente pela baixa resistência, em torno de 39 MPa, aproximadamente 4 vezes mais baixa que o basalto maciço, além disso, apesar de ser baixa a intensidade de fraturamento nas brechas, o contato com as litologias adjacentes acabam gerando descontinuidades irregulares, servindo como canais de fluxo de água. As brechas são constituídas por matriz areno-argilosa, extremamente susceptíveis a alterabilidade. Zonas compostas predominantemente por BVA também resultaram ao maciço uma classificação regular (III), da mesma forma que a brecha, apresentando resistência ao cisalhamento de menos de 35 MPa. Estas zonas estão extremamente alteradas, e possuem elevada porosidade.

Classe IV: apenas evidenciada no túnel inferior é condicionada pela junta falha, com espaçamento métrico, e com evidências de colapso.

Tendo definidas as classificações geomecânicas para todos trechos, e conhecendo o valor do vão livre no túnel (3,46 m), pode-se inserir os valores de *RMR* atribuídos ao diagrama de tempo auto-sustentação proposto por Bieniawski (1989), ilustrado na Figura 19.

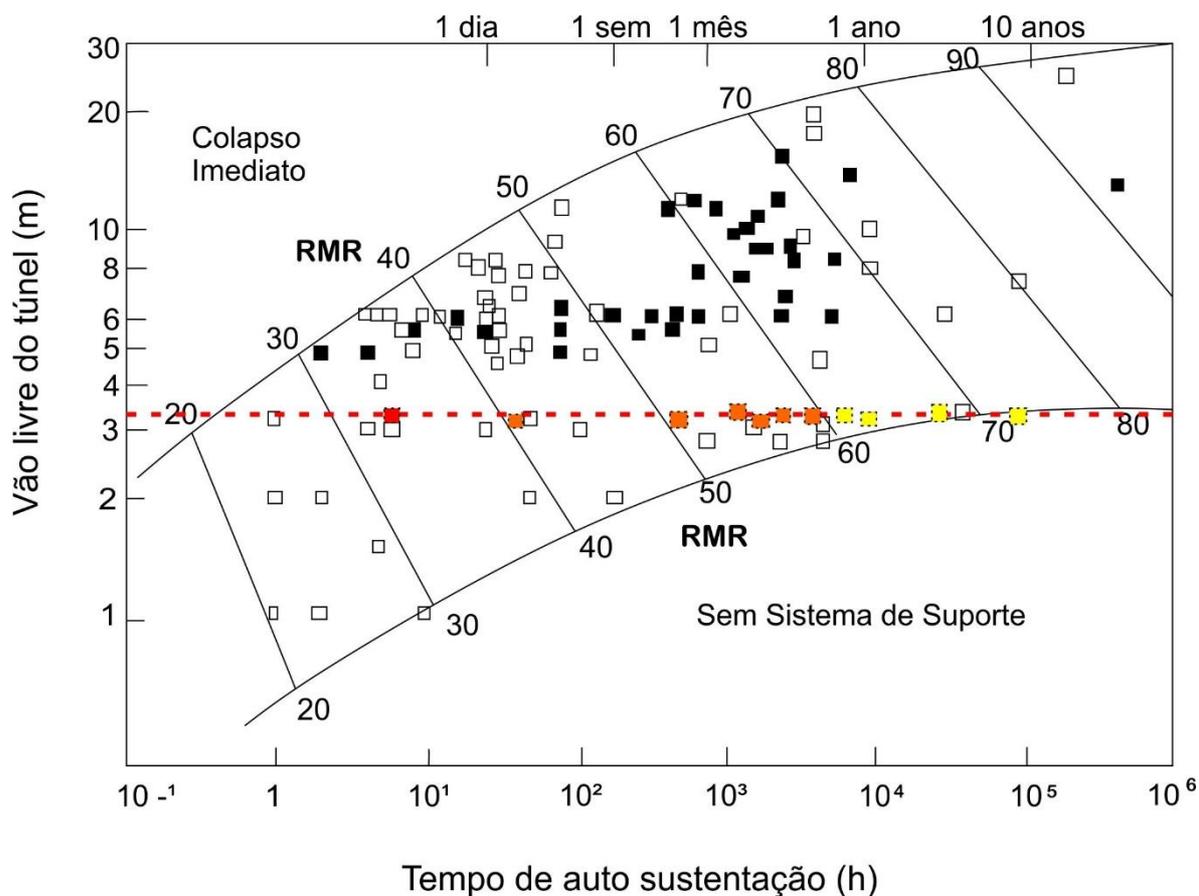


Figura 19: Diagrama de tempo de auto sustentação.

O diagrama acima representa três zonas de classificação distintas. Pontos situados no canto inferior direito não requerem nenhum tipo de suporte, enquanto as ocorrências dentro da zona intermediária correspondem a uma estabilidade com tempo determinado. Para esses casos, recomenda-se o uso de algum tipo de suporte. Já os valores representados pelo canto superior esquerdo inferem situações onde o colapso é imediato. Analisando o diagrama fica claro que o tempo de auto sustentação é condicionado pela qualidade do maciço rochoso associado ao tamanho do vão do túnel. Os pontos coloridos representam as zonas de classificação dos túneis da UHE Itaúba,

Para as galerias de Itaúba, de acordo com os pontos no diagrama, todos trechos teriam um tempo de estabilidade definida, e um sistema de suporte necessário. Os maciços de classe II, representam 220 m do total mapeado, correspondendo a um tempo de estabilidade de aproximadamente 9 meses a 10 anos,

não totalmente coerente com a realidade, fato justificado pela estabilidade atual de 37 anos.

Trechos representados pela classe III, que abrangem 266 m do total dos túneis, o tempo de auto sustentação estimado seria de 1 dia a 1 ano, coerente com a condição atual apenas em pontos localizados, onde são evidenciadas marcas de colapso.

O local onde foi registrada a classe IV, representa 28 m de extensão, e é definido por uma estabilidade menor que um dia. Esta classe é coerente com o que foi mapeado, pois o trecho interceptado pela junta falha conforma a geometria do túnel, e conta com evidências claras de colapso.

No geral pode-se concluir que os parâmetros caracterizados nesta técnica foram relativamente subestimados, o que significa que a qualidade do maciço rochoso é mais elevada que o proposto nesta avaliação. Contudo, deve-se levar em conta o atual sistema de suporte utilizado, tal como parafusos e malhas de proteção. Ainda assim deve-se considerar os pontos localizados de colapso que ocorrem atualmente, mesmo que representados por pequenos fragmentos. O sistema de suporte proposto por Bieniawsk (1989), apresentados nas revisões bibliográficas, baseia-se em túneis com vão de 10 m, para o túnel de Itaúba que possui 3,4 m de vão, o sistema de suporte recomendado seria significativamente mais espaçado e com ancoragens de menores comprimentos.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2010). ABNT NBR 15845. Rochas para Revestimento - Métodos de Ensaio – Anexo B. p. 32

ABGE. (1983). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo. (Tradução, 12). p. 30

BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech: Vol. 6, n. 4.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics. Vienna: Springer. p. 1-54

BORGES, F.S. (1980). Elementos de Cristalografia. 2 ed. Lisboa. Fundação Kalouste e Kolbekian. p. 625.

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

CORDING, E.J. (1975). Methods for Geotechnical Observations and Instrumentation in Tunneling. National Science Foundation, Washington, USA, 2 Volumes, 566 p.

CPRM. (2006). Serviço Geológico do Brasil,. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, CPRM. Escala 1:750.000.

CURTI, D. K. (2011). Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serra Geral, Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. IGC USP. p.131.

DANA, J.D. (1969). Manual de Mineralogia. Vol. 1. Rio de Janeiro. Ao livro Técnico S.A. e Editora da Universidade de São Paulo. p. 379.

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

FIORI, A.P., CARMIGNANI, L. (2013). Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas. p. 435-469.

FARJALLAT, J. E. S.; PAES DE BARROS, F.; YOSHIDA, R.; OLIVEIRA, J. A. N. (1972). Alguns problemas de degradação dos basaltos da barragem de Capivara, Rio Parapanema. In.: Semana Paulista de Geologia Aplicada, 4ª. São Paulo-SP, p. 73-93.

GUIDICINI, G., CAMPOS, J. O. (1968). Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, p. 15-21.

GUIDICINI, G. (1979). Juntas horizontais de grande continuidade em derrames basálticos da Bacia do Paraná. In: II Simpósio Regional de Geologia. Rio Claro. SBG. Atas, vol. 2, p. 13-21.

GUIDICINI, G., CRUZ P.T., E ANDRADE, R. M. (1981). Controle de Subpressões no Maciço de Fundação da Hidrelétrica de Itaúba RS, 1981, Recife. In: XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Anais. Recife, v.1. p. 11.

HOEK, E.; KAISER P. K.; BAWDEN, W.F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam Balkema.

ISRM. (1977). International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Great Britain, p. 319-368.

ISRM. (1978). Suggested Method for Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 15. p. 335-379.

ISRM. (1978). Suggested Method for Determination of the Slake Durability Index. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol 16. p. 154-156.

ISRM. (2014). Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version. In: The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring. p. 25-34.

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

KLEIN, C.; HULBURT JR., C. S. (1999). Manual of Mineralogy. 21 ed.. p. 681.

LEINZ, V; BARTORELLI, A.; SADOWSKI, G. R.; ISOTTA, C. A. L. (1966). Sobre o Comportamento Espacial do Trapp Basáltico Da Bacia Do Paraná. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia. p. 79-91.

LEYSER, S. D. L.; MIQUELETTTO, M.; MARANESI, D. A.; FILLOY, J. E.; FREITAS, F. A. E. (2010). Emprego de Basalto Vesículo-Amigdaloidal em Obras Definitivas na UHE-Salto (GO). In: COBRAMSEG 2010 - Engenharia Geotécnica Para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade. ABMS, p. 8.

MARRANO, A. & PARAGUASSU, A. B. (1998). Caracterização Tecnológica das Rochas Basálticas da Usina Hidrelétrica Canoas I. Rio Paranapanema. SP/PR. Brasil. Solos e Rochas, v. 21, n. 3, p. 143-164.

MARQUES, L. S., ERNESTO, M. (2004). O Magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. In: Geologia do continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Becca. São Paulo. p. 245-263.

MILANI, E. J. (1997). Evolução tectonoestratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese (Doutorado) – Porto Alegre, UFRGS.

MILANI, E. J., MELO, G. H. J., SOUZA, A. P. FERNANDES, A.L., FRANÇA, B. A., (2007). Bacia do Paraná. B. Geoci Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2 p. 265-287.

NARDY, A. J., MACHADO, F. B & FARIAS M. A. (2008). As Rochas Vulcânicas Mesozoicas Ácidas da Bacia do Paraná: Litoestratigrafia e Considerações Geoquímico-Estratigráficas. Revista Brasileira de Geociências, volume 38(1): p. 178-195.

OLIVEIRA, P. C.; ZUQUETTE, L. V. (2014). Evaluation of weathering of basalt lithotypes based on pH, electrical conductivity, and point-load strength tests. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto. p. 13.

PEATE, D. W. (1997). The Paraná Etendeka Province. p. 217-245.

PINTO, N. L. S.; MARQUES FILHO, P. L.; MAURER, E. (1985). Foz de Areia dam - Design, construction and behaviour. In: Symposium Concrete Face Rock Fill Dams- Design, Construction, and Performance. Proceedings. Cooke & Sherard, eds., ASCE, Detroit-Michigan, USA. p.173-191

RICCOMINI, C. (1995). Tectonismo Gerador E Deformador Dos Eventos Pós Gondwanicos da Porção Centro Sul Oriental do Estado de São Paulo e Áreas Vizinhas. Tese de livre Docência. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo. p.100.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. (1974) Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Porto Alegre. Anais do Congresso. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. p. 41-65.

SELMO, L. T. (2014). Caracterização geológico geotécnica da brecha vítrea ocorrente em uma jazida de riodacito – projeto de expansão da mina maestra – Caxias do Sul-RS. Trabalho Temático em Geologia. IGEO UFRGS. p. 109.

SOUZA JR., N. N. & CAMPOS, J. O.(1990). Subhorizontal Discontinuities of Large Extension In The Basaltic Lava Flows Nucleus of The Paraná Basin. In: Barton, N & Staphansson O. Rock joints. Rotterdam Brookfield. Balkema. p. 97-100.

TERZAGHI, K. (1946). Rock defects and loads in tunnel supports. Rock tunneling with supports. R. V. Poctos and T. L. White, eds., The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio. p. 17-99.

WAICHEL, B.L.; LIMA, E.F.; LUBACHESKY, R. & SOMMER, C.A. (2006). Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. Bulletin of Volcanology. p. 599-610.

WILDNER, W.; ORLANDO FILHO, V.; GIFFONI, L. E. (2004). Excursão Virtual aos Aparados da Serra - RS/SC. Aspectos geológicos e turísticos - cânions do Itaimbezinho e Fortaleza.

WILDNER, W.; BINOTTO, B.R.; GODOY, M. M. (2011). Geoparque Caminho dos Canions do Sul. CPRM. Volume I. p.459-492.