

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

COMPARTIMENTAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PARA APLICAÇÃO EM OBRAS
SUBTERRÂNEAS

Fábio Toshio Hamaguchi Maximiano

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

TF-2013 / 17

SÃO PAULO

2013

TF
M464
FTH.c
e.2

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

COMPARTIMENTAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA PARA APLICAÇÃO EM OBRAS
SUBTERRÂNEAS

Fábio Toshio Hamaguchi Maximiano



Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

TF-2013 / 17

DEDALUS - Acervo - IGC



30900031947

SÃO PAULO

2013

TF
M4G4
FT H.C
e.2

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOGRAFIA



Dasfurt

SUMÁRIO

I. Introdução	1
I.1. Objetivos	2
I.2. Justificativa	3
I.3. Materiais e métodos	3
II. Caracterização geológico-geotécnica	4
II.1. Coleta de dados	4
II.1.1 Etapas preliminares	4
II.1.2 Investigações de subsuperfície	5
II.2. Caracterização de maciços rochosos	7
II.2.1 Litologia	7
II.2.2 Alteração	7
II.2.3 Coerência	8
II.2.4 Descontinuidades	8
III. Classificação de maciços rochosos	10
III.1. RQD – Rock Quality Designation	12
III.2. Rock Mass Rating (RMR)	13
III.3. Sistema Q – <i>Rock Tunneling Quality Index</i>	16
III.4. Correlação entre RMR e Q	17
IV. Área de estudo	18
IV.1. Aspectos gerais	18
IV.1.1 Introdução, localização e acesso	18
IV.1.2 Aspectos geográficos	19
IV.1.3 Geologia regional	20
IV.2. Aspectos locais	23
IV.2.1 Investigações realizadas	23
IV.2.2 Aspectos geológicos locais	26
IV.2.3 Aspectos estruturais	29
IV.3. Classificação do maciço	31

IV.3.1 Rock Mass Rating (RMR)	31
V. Considerações e conclusão	32
VI. Referências Bibliográficas.....	33
VII. ANEXOS.....	35

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 – Parâmetros de classificação de sondagens

Anexo 2 – Tabelas para classificação do RMR

Anexo 3 – Tabelas para classificação do Q

Anexo 4 – Perfis de sondagem

Anexo 5 – Fotografias dos testemunhos de sondagem

Anexo 6 – Ensaios de infiltração e perda d’água

Anexo 7 – Plantas e seções

Anexo 8 – Classificação RMR

Anexo 9 – Tratamentos RMR

Anexo 10 – Fotografia aérea

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Foto VI.1 Fotografia da barragem de Pirapora do Bom Jesus e o emboque de jusante pré-existente (Google 2005)	19
Foto VI.2 - Imagem de satélite da área de estudo (Google Earth, 2009).....	20
Foto VI.3 – Mapeamento de superfície realizado na margem esquerda com o auxílio de fotointerpretação (Jensen P. D. et al, inédito). Foto tirada a partir da margem direita	24
Foto VI.4 – Vista geral da região de montante (Jensen P. D. et al, inédito).....	26
Foto VI.4 - Fraturas de alívio subverticais, paralelas ao leito do rio Tietê	29
Foto VI.5 – Brecha preenchendo fratura aberta ondulada subhorizontal	29
Figura IV.1 – Correlação entre os métodos de escavação e as classes de intemperismo (Vaz, 1996).....	9
Figura IV.2 – Litologias e resistência à compressão uniaxial (Vaz, 1996)	10
Figura VI.1 – Carta topográfica 1:50.000 SF-23-Y-C-III-3 IBGE (1984) e SF-23-Y-C-II-4 IBGE (1973).....	18
Figura VI.2 - Mapa geológico dos arredores da Barragem de Pirapora. Extraído de CPRM (2006).....	21
Figura VI.3 – Planta topográfica com local das sondagens e seções geológicas.	25
Figura VI.4 - Seção geológica A.....	27
Figura VI.5 - Seção geológica F.....	28
Figura VI.6 - Estereograma de igual área com a freqüência de pólos das descontinuidades, guirlandas das atitudes das principais famílias de descontinuidades e eixos do túnel (Jensen P. D. et al, inédito).....	30
Tabela VI.1 – Índices característicos das principais classificações geomecânicas, modificado de Oliveira & Brito (1998).....	11
Tabela VI.2 – Resumo do sistema RMR (Bieniawski, 1989).....	15

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, devo reconhecer a atenção oferecida pelo orientador, Prof. Dr. Fábio Taioli, cuja experiência, foco, organização e revisões de última hora, me auxiliaram na finalização deste projeto.

Aos geólogos Marilda Tressoldi, Daniel Augusto Buzzato de Lima e Gisele R. de Barros Yamanouth, pela dedicação e auxílio prestados, sem os quais este não teria sido possível.

Aos colegas, funcionários da THEMAG, pela amizade e convívio durante as jornadas diárias destes últimos anos.

Aos amigos, geólogos e futuros geólogos, da universidade, pela disposição, companhia e discussões letivas.

Aos amigos que conviveram comigo e me toleraram, nos últimos anos.

A THEMAG, por fornecer flexibilidade horária e material, para a execução deste trabalho.

Aos meus pais, aos quais devo muito. Pelo empréstimo do Royale, muito utilizado nas idas a faculdade.

RESUMO

Esta monografia teve como objetivo principal a compartimentação geológico-geotécnica do maciço rochoso situado na ombreira esquerda da Barragem de Pirapora do Bom Jesus (São Paulo), para a escavação de um túnel adutor.

Para este fim, foram realizados levantamentos bibliográficos dos métodos e procedimentos para o levantamento de dados, investigações geológico-geotécnicas, caracterização e compartimentação de maciços rochosos. Havendo ênfase na escavação de túneis de engenharia civil.

São descritos alguns aspectos do projeto e sua relevância geográfica para a bacia do Tietê, seu aproveitamento hidrelétrico e seu contexto geológico regional e local. O maciço é compartimentado, com o auxílio de duas seções longitudinais, em unidades geológico-geotécnicas de solos e rochas. Predominam na ombreira esquerda as intercalações de metarenitos e metassiltitos com ocasionais metargilitos, sendo os metassiltitos fortemente foliados, cobertos por fina camada de tálus. Estruturalmente a descontinuidade de maior importância é a foliação, orientada de forma desfavorável em relação a escavação do emboque de montante e favorável em relação ao emboque de jusante. Ocorrem também fraturas subverticais e subparalelas a orientação do rio Tietê.

A seção A, localizada a montante, apresenta espessa cobertura de solos, em porções de colúvio, aterro e tálus. As porções mais rasas do maciço se apresentam com RQD baixo e ocasionais pontos de alta condutividade hidráulica, porém as condições gerais do fraturamento e das descontinuidades permitem uma classificação em geral de classe superior a III para o sistema RMR.

A seção F, localizada a jusante, apresenta delgada cobertura de solo de alteração e tálus. O RQD e o fraturamento são aparentemente piores do que os encontrados na seção A, porém isto é atribuído a inclinação das sondagens que artificialmente fratura os testemunhos de sondagem. A classificação RMR deste maciço aponta classes em geral acima de III.

São feitas considerações acerca da aplicação dos parâmetros de investigação e caracterização de maciços rochosos para rochas metassedimentares bastante foliadas e é concluído que as classes de maciço obtidas são estimativas bastante conservadoras.

ABSTRACT

The main purpose of this work is the geological and geotechnical classification of the rock mass located at the left margin of Pirapora do Bom Jesus dam (state of São Paulo), for tunnelling applications.

To this end were performed bibliographic studies of the methods and procedures for data collection, geological and geotechnical characterization and compartmentalization of rock masses. Having emphasis on tunnelling for civil engineering.

Certain aspects of the project and its geographical relevance to the Tietê river basin and its hydroelectric potential are described, together with its geological context and location. The rock mass is compartmentalized with the aid of two longitudinal sections. The left margin of the dam is majorly composed of strongly foliated metasiltstones interbedded with metarenites, covered by a thin layer of talus. Structurally the discontinuity of greatest importance is the rock bedding, to which the upstream portion of the tunnel is orientated unfavourably while the downstream portion is orientated favourably. There also occur fractures which are subvertical and suparallel to the Tietê River.

Section A, located upstream, has thick soil cover in portions of colluvium, talus and landfill. The shallower portions of the rock mass are described with low RQD and sparse segments of high hydraulic conductivity, yet the generally good conditions of fracturing and discontinuities allow a scores generally of Class III or higher in the RMR system.

Section F, located downstream, has thin soil cover. The RQD and fracturing are, at a glance, worse than those found in Section A. However, these were attributed to the angle used in the borehole. The classification of this rock mass indicates RMR classes generally above Class III.

Considerations are made about the criteria used in borehole drilling and description, and the characterization of rock masses for strongly foliated metasedimentary rocks. It is concluded that the geomechanical classes obtained are rather conservative estimates.

I. INTRODUÇÃO

O geólogo ao observar um maciço rochoso sabe que este não é homogêneo. Poderá encontrar irregularidades em sua composição mineral, orientação em sua trama, famílias de fraturas em sua extensão e até mesmo variadas intercalações de difícil explicação. O geólogo também sabe que se prestasse todo seu esforço a descrever e analisar ao máximo o mesmo local poderia passar dias mensurando cada fratura centimétrica.

A caracterização de um material qualquer, geológico ou não, requer um processo simplificador, que reduz a natureza diversa a porções homogêneas compreensíveis e quantificáveis. Assim como uma função matemática reduz a uma curva a relação entre algumas variáveis, um modelo geológico reduz diversas características e propriedades físicas a alguns parâmetros de fácil referência.

Na metade do século XX, Karl von Terzaghi publicou em sua obra, *Theoretical Soil Mechanics* (1943), um estudo geológico-geotécnico para a estimativa da capacidade de carga dos maciços geológicos e novamente em 1946 publicou em *Rock Tunneling with Steel Supports* o primeiro grande sistema de classificação geomecânica de maciços rochosos com foco na escavação de túneis. Seu trabalho foi seguido por diversos outros aplicados a área de geologia de engenharia, com o intuito de sistematizar a análise de maciços e auxiliar no dimensionamento das estruturas de engenharia, porém estas classificações, assim como a de Terzaghi, destinavam-se principalmente ao uso na escavação de obras subterrâneas.

As classificações geomecânicas forneceram praticidade, pois agrupando unidades ou segmentos de unidades geológicas com comportamentos mecânicos relativamente homogêneos em seu trecho, permitiam prever a resposta do material a determinado método construtivo.

Em Bieniawski (1973) o autor propôs sua própria classificação geomecânica, o sistema RMR (Rock Mass Rating). Nesta época também foi proposto por Barton et al. (1974) *apud* Bieniawski (1989) outro sistema similar de classificação geomecânica, o sistema Q. Ambos se encontram entre os mais comumente utilizados atualmente e ao longo dos anos passaram e passam por revisões diversas.

O rápido desenvolvimento da engenharia geológica durante o último século, em parte causado por grandes tragédias que atingiram taludes e fundações de grandes obras ao redor do mundo, foi responsável pela criação e aperfeiçoamento de grande parte das técnicas hoje utilizadas para a descrição e caracterização de maciços rochosos.

I.1. Objetivos

Para a execução de qualquer obra de engenharia civil, é obrigatório o conhecimento de algum maciço rochoso. Seja este maciço uma futura fundação, uma área a ser escavada ou mesmo uma área de empréstimo para agregados.

A utilização do maciço rochoso querer conhecer um mínimo das suas propriedades. Algumas relativamente simples como: Qual a litologia? Resistência? Rocha sã ou alterada? Como estão as descontinuidades? É escarificável ou requer fogo? E outras mais difíceis como: No caso de um corte, qual o tratamento necessário? Qual a metodologia de escavação para um túnel?

Responder as mais fáceis requer apenas o conhecimento dos métodos geológico-geotécnicos de investigação e descrição de rochas e solos. Para as mais difíceis é necessário o entendimento do comportamento mecânico do maciço.

Como ferramenta de auxílio, existem sistemas de classificação de maciços rochosos. Estes correlacionam os parâmetros físicos medidos com a forma a qual atuam as forças sobre o maciço e seus blocos, permitindo prever, de forma aproximada, seu comportamento mecânico.

O uso destes sistemas permite a análise em maior escala dos fatores que condicionam comportamentos distintos, algo que de outra forma seria feito localmente, caso a caso.

A classificação e compartimentação geológico-geotécnica é um estudo necessário para a escolha e dimensionamento dos métodos de trabalho utilizados para a realização da obra. Seja na estabilização de taludes, mineração, escavação ou aterro, sua utilização é essencial para a logística de trabalho e resulta em economia de tempo e recursos através do adequado dimensionamento dos quantitativos de serviço.

Na superfície, um maciço rochoso detêm inúmeras características e propriedades que são a permutação de todos os eventos e processos aos quais foi submetida entre a sua formação e meteorização.

Atualmente existem diversas metodologias em uso para a caracterização de solos e maciços rochosos e vários sistemas de classificação de maciços. Por cada sistema de classificação ter sido desenvolvido de forma empírica com foco em algumas aplicações, se faz necessário conhecer os principais sistemas e suas aplicações, vantagens e desvantagens.

Portanto, o objetivo deste trabalho é, através do estudo dos métodos de descrição, caracterização e classificação de maciços geológicos, a elaboração da compartimentação geológico-geotécnica de um perfil de rocha para a escavação de túnel.

I.2. Justificativa

Os sistemas de classificação de maciços surgiram e evoluíram através do estudo de casos geológicos, incorporando considerações para diferentes tipos de maciços e condições de trabalho.

Portanto, este trabalho se faz jus ao acrescentar a aplicação de tais sistemas, e as ferramentas necessárias para seu uso, a um caso geológico inédito, fazendo-se notar os procedimentos utilizados e as considerações levantadas.

I.3. Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do projeto foram realizados levantamentos bibliográficos em busca dos métodos, técnicas e especificações utilizados na análise de um maciço rochoso.

É abordado bibliograficamente o que diz respeito a coleta de dados, caracterização e classificação geológico-geotécnica dentro do escopo de um projeto de investigação geológica com o detalhamento da caracterização geológica dos materiais como os aspectos texturais, granulométricos e classificações da litologia, alteração, coerência, fraturamento, condições das descontinuidades, as condições de água subterrânea e a orientação das descontinuidades. São citadas as normas técnicas associadas a estas etapas descritivas, quando houver.

É discutida a classificação de RQD (Rock Quality Designation) proposta em Deere et al. (1967) *apud* Deere & Deere (1989) e atualmente de uso corrente como índice característico em sistemas como o RMR e o Q.

São discutidos e comparados os sistemas de classificação de maciços rochosos, com ênfase na sua aplicação para a escavação de túneis de engenharia civil.

Com relação a área de estudo, foram levantados os aspectos da geologia regional, além de dados gerais e geográficos, com a função do entendimento do projeto e da geologia envolvida.

Os dados das investigações geológicas, previamente coletados, são trabalhados com a utilização dos sistemas de classificação, em específico o RMR (Bieniawski, 1989) devido as características do maciço, de forma a compartimentar o maciço rochoso em regiões homogêneas, considerado seu comportamento mecânico.

Por fim, a classificação do maciço é utilizada para a estimativa dos tratamentos utilizados para a escavação do túnel proposto, conforme o sugerido por Bieniawski (1989).

II. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A caracterização do comportamento de um maciço natural se dá principalmente através da interpretação de dados de sensoriamento remoto, mapeamentos de superfície e investigações de subsuperfície mecânicas e geofísicas que possibilitem a identificação dos diferentes tipos de solos e rochas e suas características mineralógicas, estruturais, de resistência mecânica e de permeabilidade (ABGE, 2013).

II.1. Coleta de dados

A necessidade de dados varia com o tipo de empreendimento, local e etapa de desenvolvimento em que este se encontra. Geralmente são utilizados os métodos de obtenção de investigação mais abrangentes nas etapas iniciais, com a progressão para métodos cada vez mais focados em um ou outro aspecto de interesse. Cada etapa de investigação refinará o planejamento da seguinte de forma a minimizar custos desnecessários.

O roteiro usual para um plano de investigações se inicia no escritório, com o: Levantamento de dados bibliográficos; Coleta de mapas, fotografias aéreas e imagens orbitais. Com estes é planejado o reconhecimento preliminar de superfície (*in situ*) que permite a elaboração dos planos de investigação de subsuperfície.

Com o avanço do conhecimento no projeto, são realizados planos de investigação mais detalhados em porções caracterizadas como mais críticas ao projeto ou onde seja necessário a utilização de outro método de investigação devido ao tipo de material encontrado, ou seja, necessária a realização de ensaios (Oliveira & Brito, 1998).

II.1.1 *Etapas preliminares*

O levantamento de dados de mapas de superfície (geológicos, estruturais, físicos, topográficos, fisiográficos, etc) e seu cruzamento entre si e com fotografias aéreas e imagens orbitais é a etapa inicial de maioria dos projetos e responsável pela produção de muitos dos dados que orientarão os trabalhos iniciais de campo e de coleta de dados.

A interpretação de imagens obtidas por sensoriamento remoto, sejam fotos aéreas ou imagens orbitais, é um recurso econômico indispensável para os trabalhos de mapeamento geológico-geotécnico. Consiste no reconhecimento e análise interpretativa dos vários elementos disponíveis na imagem como a morfologia do relevo e sua textura, lineamentos, padrões de drenagem e vegetação (ABGE, 2013). No meio urbano, as imagens podem auxiliar na localização de obras civis de interesse, bem como na evolução da urbanização e

seu impacto nas feições naturais como edificações, drenagens, áreas de empréstimo e bota-fora.

II.1.1.0 Mapeamento geológico-geotécnico

O mapeamento é o método de investigação no qual o geólogo percorre a área de estudo procurando caracterizar seus terrenos. Analisando e extrapolando o comportamento dos materiais geológicos às condições em que serão submetidos pelo desenvolvimento do projeto. Além do mapeamento litológico e subdivisão em unidades de interesse prático, é dada ênfase a condicionantes específicos relacionados ao projeto, tais como argilominerais expansivos, falhas geológicas, fraturas, minerais ou rochas de interesse econômico, etc.

É interessante que as equipes envolvidas no projeto adotem a mesma padronização para a caracterização e classificação dos solos e rochas mapeados. Preferindo a utilização das normas nacionais quando conveniente.

II.1.2 Investigações de subsuperfície

II.1.2.0 Métodos mecânicos

Os métodos mecânicos podem ser subdivididos em sondagens, que são investigações lineares e progressivas, e poços, trincheiras e galerias, que extraem informações volumétricas do material geológico. Segundo Oliveira & Brito (1998) os principais métodos de investigação utilizados para o reconhecimento geológico-geotécnico são:

Sondagem a trado: Utiliza de lâminas cortantes para atravessar, através do torque da haste, solos de baixa resistência até o nível d'água, coletando amostras de metro em metro. Diferentes formatos de trados podem ser utilizados, como o tipo cunha, o tipo caçamba e o tipo espiral, de acordo com o material a ser amostrado. A sondagem a trado para investigações geológico-geotécnicas é normatizada na NBR 9603:1986 (ABNT, 1986a).

Sondagem a percussão: Sondagem characteristicamente associada a execução do ensaio de SPT (*Standard Penetration Test*) e a respectiva amostragem dos solos sondados. Sua execução envolve a intercalação de uma etapa de perfuração (trado quando acima do nível d'água e lavagem quando abaixo) e a execução de um ensaio de SPT, realizado normativamente a cada metro. Este ensaio mensura o número de golpes necessários para um peso de 65 kg, caindo livremente de uma altura de 75 cm, fazer penetrar o barrilete amostrador em três trechos de 15 cm, sendo o resultado do ensaio a quantidade de golpes responsável pelos últimos dois trechos (30 cm) e a amostragem deformada do trecho ensaiado. A sondagem percussiva com SPT é normatizada na NBR 6484:2001 (ABNT, 2001).

Poço ou trincheira de inspeção: São geralmente utilizados para amostragem e coleta de material indeformado, com a realização de ensaios mecânicos *in situ* ou em laboratório. Estas investigações são normatizadas pela NBR 9604:1986 (ABNT, 1986b).

Sondagem rotativa: Este método utiliza de um barilete dotado em uma ponta de uma coroa revestida de pastilhas de material abrasivo de alta dureza (vídea ou diamante), para o avanço e amostragem em trechos de rocha e materiais muito consistentes. Os testemunhos são organizados e orientados de forma a preservar a orientação de topo e base e separar o fraturamento natural do material, e sua orientação, daquele ocasionado pela manobra de recuperação.

Sondagem mista: Geralmente refere-se a sondagens que empregam o método de percussão com SPT para trechos em solo e o método rotativo para trechos em rocha.

Perfuração com rotopercussão: Esta modalidade de sondagem utiliza uma perfuratriz pneumática para perfurar a rocha destrutivamente, não é recuperada amostra intacta. É principalmente utilizada para obter a posição do topo rochoso e a homogeneidade do maciço.

Galeria de investigação: Utilizada geralmente em testes piloto das condições do maciço em fase final do projeto básico ou no início do executivo. O mapeamento é feito para as paredes e o teto e em casos raros, como no caso da Barragem de Pirapora (SP), no piso devido à contaminação por resíduos.

II.1.2.1 Métodos indiretos

Métodos de investigação que envolvem a correlação dos parâmetros físicos de interesse com parâmetros secundários como a resistividade elétrica ou a velocidade de propagação de ondas mecânicas.

Para aplicações em engenharia civil os métodos mais utilizados são os geoelétricos e os sísmicos, com destaque para a eletrorresistividade, GPR (*Ground-penetrating radar*) e sísmica de refração.

Devem ser notadas as interferências naturais e antrópicas ante a aplicação de cada método.

II.1.2.2 Ensaios *in situ*

Ensaios realizados em trabalho de campo, em superfície ou subsuperfície, comumente durante a execução das investigações de subsuperfície com o múltiplo aproveitamento de furos de sondagem.

Ensaio de infiltração: Obtém a permeabilidade ou perda d'água específica (PE) de solos através da medida da absorção de água de um trecho de furo de sondagem

submetido a uma coluna d'água. São feitas 10 leituras, uma a cada minuto, até a estabilização da taxa de vazão.

Ensaio de perda d'água sob pressão: Utilizado em sondagem rotativa, envolve o bombeamento de água sob pressão a trechos de rocha isolados pelo obturador. São 'decrescente até o quinto. A pressão máxima é dada pelo produto da profundidade pelo critério de carga (geralmente $0,25 \text{ kgf/cm}^2$), a pressão intermediária é metade da pressão máxima e a pressão mínima é de $0,1 \text{ kgf/cm}^2$.

Índice de resistência à penetração (Esclerómetro ou martelo de Schmidt): Utilizado para a medida da resistência de rochas, especialmente nas paredes de descontinuidades, que não podem ser facilmente amostradas para a execução de ensaios de compressão. O ensaio registra um valor que é correlacionável a resistência de compressão.

II.2. Caracterização de maciços rochosos

O estudo geológico-geotécnico adequado exige que os dados utilizados tenham suas descrições padronizadas de forma a definir trechos claramente homogêneos e mapeáveis dentro da escala de trabalho. Por tanto se exige também conhecer os padrões e métodos correntes de classificação. A NBR 6502:1995 (ABNT, 1995) define os termos utilizados para estas descrições, quando utilizadas para fins de engenharia.

Os parâmetros descritos nesta seção tem suas denominações, características e siglas correlacionados no **Anexo 1**.

II.2.1 Litologia

A caracterização litológica é um dos procedimentos mais básicos da geologia. As rochas são classificadas quanto a sua origem, estrutura interna, textura, coloração, composição e etc.

Geralmente é mais importante conhecer as características das descontinuidades de um maciço do que as propriedades mecânicas do material em si (Bieniawski, 1989). Os sistemas de classificação de maciços rochosos baseados no RMR (Bieniawski, 1973) e Q (Barton et al, 1974) são muito mais sensíveis a condição das descontinuidades do que as características de resistência da rocha em si.

II.2.2 Alteração

A alteração de uma rocha é causada principalmente por processos de intemperismo, em superfície. Geralmente a alteração de uma rocha acarreta na perda de características mecânicas, com a redução progressiva de sua resistência. Os processos de alteração podem ser divididos em:

Mecânicos: Atuantes principalmente em regiões expostas a grandes variações térmicas. Provoca a fragmentação do maciço.

Químicos: Atuantes principalmente em regiões tropicais, como o Brasil. O intemperismo químico provoca a alteração da mineralogia da rocha através da lixiviação de elementos químicos e hidratação ou hidrólise. Estes processos são controlados pela exposição da rocha a água e seu pH.

Biológicos: Atuam tanto de forma mecânica, reduzindo o tamanho dos blocos de um maciço, quanto de forma química, através da produção de substâncias químicas que provocam a decomposição da rocha.

Observa-se que o reconhecimento do estado de alteração de uma rocha sedimentar pode apresentar dificuldades, pois nem sempre se manifestam mudanças significativas na trama mineral.

II.2.3 Coerência

O parâmetro de coerência foi inicialmente proposto em Guidicini et al. (1972) *apud* Vaz (1996) como forma de suprir as dificuldades relacionadas a caracterização do grau de alteração de rochas brandas.

Este parâmetro é baseado nas propriedades de tenacidade, dureza e friabilidade das rochas e pode ser caracterizado através da observação da resistência da rocha ao uso do martelo e do canivete.

Apesar dos graus de alteração e coerência serem parâmetros relativos, seu uso permite a comparação dos variados graus com a rocha seca para a estimativa da diminuição da resistência da rocha.

Vaz (1996) correlaciona a resistência da rocha, aos métodos de escavação e perfuração, aos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais (Figura II.1). Apresenta, ainda, a correlação empírica entre diversos tipos litológicos, sua resistência à compressão uniaxial e classe de alteração.

II.2.4 Descontinuidades

Por descontinuidade entende-se toda a feição geológica que interrompe a continuidade física de um meio rochoso. Desta forma são consideradas descontinuidades tanto as superfícies de juntas e fraturas quanto a foliação e o acamamento das rochas. A caracterização das descontinuidades é de grande importância para o estudo de um maciço rochoso, pois a resistência à tração ao longo de sua superfície é muito baixa.

CLASSIFI-CAÇÃO	CLASSES	PERFIL DE INTEMPERISMO	PROCESOS	MÉTODOS DE		COMPOR-TAMENTO
				ESCAVAÇÃO	PERFORAÇÃO	
SOLO RESIDUAL	SOLO VEGETAL	S1	PEDOLOGICOS INTEMPÉRICOS QUÍMICOS INCIPIENTES OU AUSENTES	LÂMINA DE AÇO ("SCRAPER", ENXADÃO, FACA)		HOMOGENEO ISOTRÓPICO
	SOLO ELUVAL (SE)			2"		
	SOLO DE ALTERAÇÃO (SA) soprado	S2		A PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM		
ROCHA	ROCHA ALTERADA MOLE (RAM)	R3	EXPLOSIVO 3"	ESCARIFICADOR (PICARETA)		HETEROGENEO ANISOTRÓPICO DEPENDENTE DO TIPO DE ROCHA
	ROCHA ALTERADA DURA (RAD)	R2		A PERCUSSÃO COM LAVAGEM DETELEFEL A LAVAGEM FIM TESTE		
	ROCHA SA (RS)			ROTATIVA		

Figura II.1 – Correlação entre os métodos de escavação e as classes de intemperismo (Vaz, 1996)

O estudo das descontinuidades envolve tanto a caracterização da superfície das descontinuidades quanto a sua distribuição espacial.

A distribuição espacial é caracterizada através do agrupamento das descontinuidades em famílias, conjuntos com orientação e natureza similares. É de interesse o número de famílias que compõem um mesmo sistema de descontinuidades, sua atitude, persistência (continuidade) e o espaçamento entre cada descontinuidade.

A caracterização da superfície das descontinuidades fornece a resistência relativa que esta apresenta ao cisalhamento. São de interesse os seguintes parâmetros:

Rugosidade – Geometria da superfície da descontinuidade. Superfícies rugosas são preferíveis a superfícies lisas e estriadas, especialmente caso não haja abertura ou preenchimento significativo.

Abertura – Distância entre as paredes de uma descontinuidade.

Alteração – Similar a caracterização do estado de alteração do maciço. Este também pode ser de difícil aferição. É comum a utilização do martelo de Schmidt.

Preenchimento – O material que constitui o preenchimento e sua espessura é fortemente impactante na caracterização do comportamento mecânico das descontinuidades. Devem ser caracterizados conforme sua natureza (constituição) e granulometria, além da espessura.

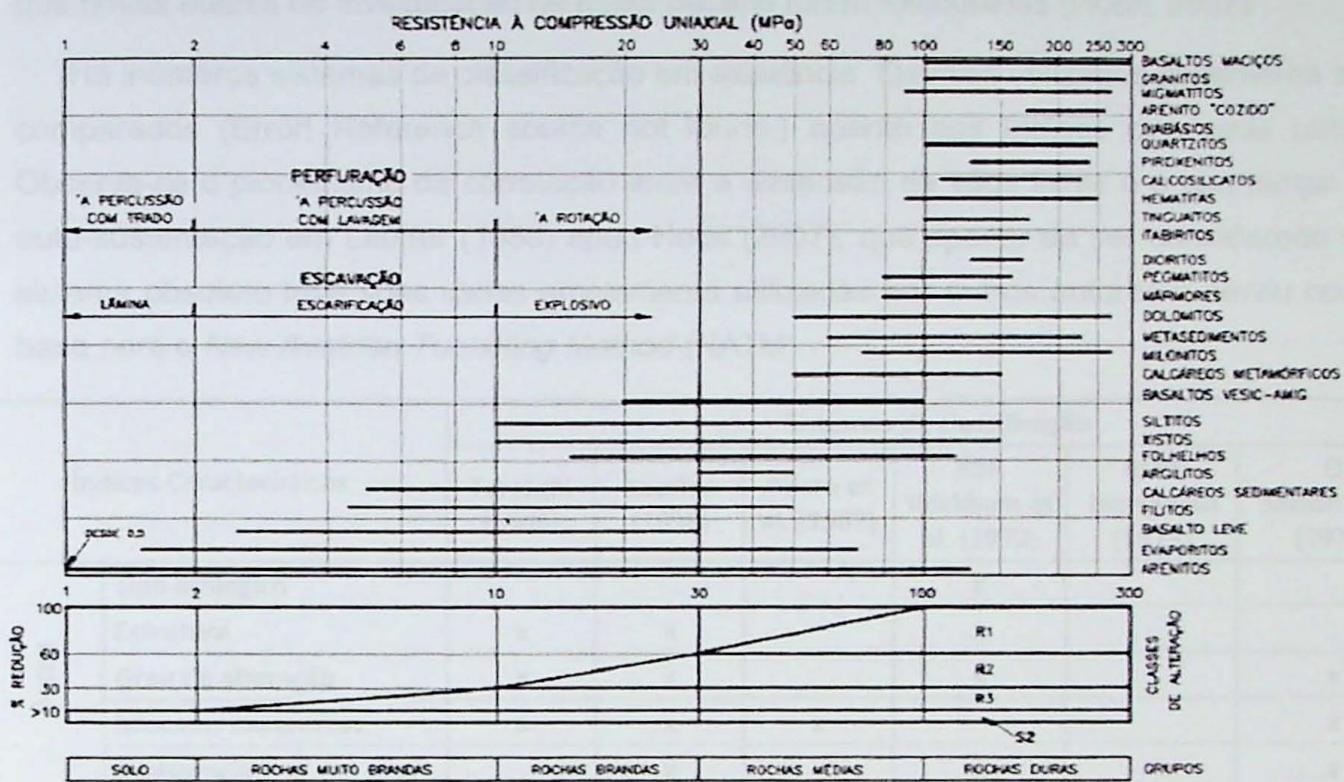


Figura II.1 – Litologias e resistência à compressão uniaxial (Vaz, 1996)

CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os sistemas de classificação de maciços rochosos são ferramentas que equacionam as características físicas de um maciço a um comportamento mecânico previsto para a análise e estimativas preliminares dos métodos de escavação e das estruturas de suporte. É fundamental que esta classificação e o projeto das estruturas sejam atualizados à medida que novas etapas de investigação de maior detalhe forem executadas (Hoek, 2007).

Há inúmeros sistemas de classificação em existência. Os mais utilizados atualmente são comparados (Error! Reference source not found.) quanto aos índices que cada utiliza. Observa-se o pioneirismo da correlação entre a dimensão de vãos livres e o seu tempo de auto-sustentação em Lauffer (1958) apud Hoek (2007), que apesar de ser considerado um sistema obsoleto teve suas idéias amplamente utilizadas por outros autores e serviu como base para o *New Austrian Tunneling Method* (NATM).

Índices Característicos		Sistemas de classificação					
		Terzaghi (1946)	Lauffer (1958)	Deere et al. (1967)	RSR Wickham et al. (1972)	RMR Bieniawski (1973)	Q Barton et al. (1974)
Rocha	Tipo litológico				x		
	Estrutura	x	x		x		
	Grau de alteração	x	x		x		x
	Minerais expansivos	x	x	x			x
	Resistência		x		x	x	x
Descontinuidades	Orientação				x	x	
	Espaçamento	x	x	x	x	x	x
	Rugosidade das paredes					x	x
	Alteração das paredes				x	x	x
	Abertura				x	x	x
	Preenchimento					x	x
	Número de famílias						x
Maciço rochoso	RQD			x		x	x
	Água	x	x		x	x	
	Tensões <i>in situ</i>	x	x	x			x
Métodos construtivos	Recomendações de procedimento	x		x		x	x
	Tempo de auto-sustentação		x			x	x
	Número total de índices	6	7	4	9	9	12
	Índices relativos a descontinuidades	1	1	1	4	6	6

Tabela III.1 – Índices característicos das principais classificações geomecânicas, modificado de Oliveira & Brito (1998)

Se nota, também, que a partir de Deere et al. (1967) e publicações internacionais nos anos 70, o RQD ganhou aceitação e tornou-se componente importante dos sistemas de classificação, sendo incorporado ao RMR e Q (Deere & Deere, 1989).

A aplicação de um sistema de classificação é uma tarefa simples que requer o adequado entendimento e utilização dos parâmetros envolvidos, nem sempre havendo toda a informação disponível de forma satisfatória (Melo, 2010), exigindo sempre certo fator de cautela e conservadorismo. Este conservadorismo comum a maioria das aplicações dos sistemas de classificação tende a superestimação dos sistemas de suporte e contenção. Para contrabalancear este efeito Bieniawski (1989) sugere o monitoramento constante das obras para a execução de ajustes do projeto às condições locais.

Para um mesmo maciço rochoso, múltiplos autores sugerem a adoção de mais de um sistema de classificação, de forma a minimizar os erros causados pelas diferentes abordagens.

III.1. RQD – Rock Quality Designation

O RQD (*Rock Quality Designation*) ou IQD (Índice de qualidade da rocha) é em sua natureza uma modificação da porcentagem de recuperação de um testemunho de sondagem rotativa.

Seu valor é a somatória do comprimento recuperado dos trechos de rocha sã, maiores do que 10 cm, dividida pelo comprimento total da manobra de sondagem. É representativo da qualidade da rocha na medida em que são descartados os trechos recuperados que apresentem rochas fortemente alteradas, fraturadas e cisalhadas (Deere & Deere, 1989).

A aplicação do RQD requer que cuidados sejam tomados durante a etapa de sondagem, com a finalidade de evitar o fraturamento do testemunho durante o procedimento de perfuração (Deere & Deere, 1989). Algumas destas são:

- O diâmetro dos tubos utilizados para a sondagem não deve ser muito pequeno, especialmente para rochas brandas, foliadas e xistosas.
- O barrilete utilizado deve ter parede dupla, de forma a reduzir as vibrações internas.
- O comprimento das manobras influencia fortemente no RQD, sendo que manobras curtas produzem maior detalhamento do comprimento das zonas de valores altos e baixos. É ideal que não ultrapasse 1,5 m, porém, para rochas muito maciças, comprimentos de 3 m são aceitáveis.
- Rochas sedimentares foliadas, em especial as argilosas, são quebradiças, e se fraturam facilmente durante a sondagem, manuseio e estoque.

III.2. Rock Mass Rating (RMR)

O sistema RMR, também conhecido como Classificação Geomecânica, surgiu em Bieniawski (1973) com a utilização de 49 casos históricos e ao longo dos anos foi atualizado adotando um total de 249 casos históricos (Oliveira & Brito e a padronização internacional da engenharia geológico que ocorreu intensamente ao redor dos anos 80. A edição mais comumente utilizada em trabalhos e a partir da qual se baseia o seguinte texto provém de Bieniawski (1989).

O procedimento de classificação RMR utiliza dos seguintes parâmetros para a classificação de um maciço rochoso:

- Resistência a compressão uniaxial
- *Rock Quality Designation* (RQD) ou Índice de Qualidade de Rocha (IQR)
- Espaçamento das descontinuidades
- Condição das descontinuidades
- Condições do nível freático
- Orientação das descontinuidades

Para a aplicação da Classificação Geomecânica o maciço rochoso é subdividido em regiões com características semelhantes quanto aos parâmetros do RMR, geralmente limitadas por grandes descontinuidades como falhas, diques ou zonas de cisalhamento. A estas regiões são aplicados pesos aos seus índices físicos conforme o apresentado na **Tabela III.2**. Estes pesos remetem a curvas de correlação do RMR e permitem a adoção de pesos intermediários.

Para a computação do valor de RMR quando houver duas ou mais zonas homogêneas em um mesmo trecho ou face de um maciço Bieniawski (1989) sugere que uma das abordagens pode ser a ponderação dos valores de RMR para cada zona com pesos proporcionais a área que estas representam em relação à área total.

O sistema RMR é de fácil aplicação e os dados necessários referentes aos parâmetros utilizados podem ser obtidos através de sondagens e mapeamento subterrâneo, também é adaptável de forma que o conceito original com aplicação principalmente em túneis e minas subterrâneas já foi extendido por diversos autores para abrangir: mineração em geral; ripabilidade; mineração em rocha sã; mineração de carvão; fundação de barragens; túneis; estabilidade de taludes e outras aplicações.

A - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO

Parâmetro			Intervalos dos valores					Faixa restrita ao uso do teste de compressão uniaxial		
1	Resistência da rocha intacta	Índice da resistência puntiforme (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Faixa restrita ao uso do teste de compressão uniaxial			
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1	
Peso		15	12	7	4	2	1	0		
2	RQD (Rock Quality Designation)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25			
	Peso		20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades		>2m	0,6 - 2m	200 - 600mm	60 - 200mm	<60mm			
	Peso		20	15	10	8	5			
4	Condição das descontinuidades (ver E)		Superfícies muito rugosas, descontínuas, sem separação, paredes sem alteração.	Superfícies pouco rugosas, separação <1mm, paredes pouco alteradas.	Superfícies estriadas ou preenchimento com espessura <5mm ou separação 1 - 5mm, contínuas.	Superfícies estriadas ou preenchimento com espessura <5mm ou separação 1 - 5mm, contínuas.	Preenchimento com espessura >5mm ou separação >5mm, contínuas.			
	Peso		30	25	20	10	0			
5	Água subterrânea	Vazão por trechos de 10m (l/min)	0	<10	10 - 25	25 - 125	>125			
		Pressão d'água nas fraturas / tensão principal	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	>0,5			
		Condições gerais	Seco	Umidecido	Úmido	Gotejando	Fluxo abundante			
Peso		15	10	7	4	0				

B - AJUSTE PARA A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES (ver F)

Orientação da direção e mergulho das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

C - CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS

Somatória dos pesos	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<21
Classes de maciços	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre

D - SIGNIFICADO DAS CLASSE

Classes de maciços	I	II	III	IV	V
--------------------	---	----	-----	----	---

Tempo médio de auto-sustentação	20 anos para vâo de 15 m	1 ano para vâo de 10 m	1 semana para vâo de 5 m	10 horas para vâo de 2,5 m	30 minutos para vâo de 1 m
Coesão do maciço rochoso (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Ângulo de atrito do maciço rochoso	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

E- CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação	Sem separação	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Sem preenchimento	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Mole < 5 mm	Mole > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Alteração	Sem alteração	Pouco alterado	Medianamente alterado	Muito alterado	Decomposto
Peso	6	5	3	1	0

F - EFEITO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES EM TÚNEIS

Direção da camada perpendicular ao eixo do túnel		Direção da camada paralela ao eixo do túnel	
Escavação no sentido do mergulho		Mergulho 45 - 90°	Mergulho 20 - 45°
Mergulho 45 - 90°	Mergulho 20 - 45°		
Muito favorável	Favorável	Muito favorável	Aceitável
Escavação no sentido contrário ao mergulho		Mergulho 0 - 20° - Qualquer direção	
Mergulho 45 - 90°	Mergulho 20 - 45°		
Aceitável	Desfavorável	Aceitável	

Tabela III.2 – Resumo do sistema RMR (Bieniawski, 1989)

III.3. Sistema Q – *Rock Tunneling Quality Index*

A partir da análise de 212 casos históricos Barton et al (1974) propôs o Sistema Q com a finalidade de quantificar as características de uma maciço rochoso e facilitar o dimensionamento das estruturas de suporte de túneis (Bieniawski, 1989). Este sistema é conhecido por ser o mais sensível à caracterização das descontinuidades, representando forte peso na pontuação final (Oliveira & Brito, 1998). O sistema Q considera os seis seguintes parâmetros:

1. RQD
2. J_n (Joint set number) - Número de famílias de fraturas
3. J_r (Joint roughness number) - Rugosidade das fraturas
4. J_a (Joint alteration number) - Grau de alteração ou preenchimento da fraturas
5. J_w - Fluxo d'água
6. SRF - Condições de estresse. Contabiliza as: Cargas desfavoráveis quando escavando através de zonas de cisalhamento e rochas com argila; Cargas que causam estresse em blocos competentes; Cargas que causam deformação em blocos pouco competentes (Hoek, 2007).

Para fins de cálculo do Q o valor mínimo do RQD deverá ser 10, mesmo que seja obtido valor inferior (Barton et al, 1974 apud Hoek, 2007).

É notado que para a caracterização dos parâmetros (J_r) e (J_a) deve ser considerada a fratura mais desfavorável ao projeto, incluso nisto a sua orientação em relação à escavação (Oliveira & Brito, 1998).

Estes parâmetros são agrupados em três quocientes, cada qual é analisado e pode ser interpretado independentemente como um parâmetro quantitativo para o comportamento do maciço rochoso, da seguinte forma:

- (RQD/J_n) Representa a estrutura geral do maciço rochoso e é uma medida simplificada do tamanho dos blocos e fragmentos de rocha no maciço.
- (J_r/J_a) Representa a resistência ao cisalhamento ao longo da fratura mais desfavorável. Superfícies rugosas e inalteradas são favoráveis enquanto que superfícies e preenchimentos argilosos são desfavoráveis.
- (J_w/SRF) Representa a tensão existente no maciço.

A seguinte expressão relaciona os quocientes para a obtenção do valor de Q:

$$Q = [RQD/J_n] * [J_r/J_a] * [J_w/SRF]$$

O valor do índice Q varia em uma escala logarítmica entre os valores 0,001 e 1000.

A aplicação do sistema Q requer a avaliação de cada parâmetro, de forma similar a aplicação do RMR. Excetuando o RQD, para o qual adota-se o próprio valor, os demais parâmetros são relacionados nas tabelas encontradas no Anexo 3.

III.4. Correlação entre RMR e Q

Com base no estudo de casos onde foram aplicados ambos os sistemas. Estas correlações devem ser adotadas com cautela, visto que os parâmetros adotados e sua forma de aplicação variam de sistema para sistema.

Para a engenharia de túneis, Bieniawski (1976) propôs a seguinte correlação:

$$\text{RMR} = 9 \ln Q + 44$$

Para túneis de mineração, o estudo de minas subterrâneas de carvão na Espanha de Abad et al. (1983) *apud* Bieniawski (1989) chegou a correlação:

$$\text{RMR} = 10,5 \ln Q + 42$$

IV. ÁREA DE ESTUDO

IV.1. Aspectos gerais

IV.1.1 Introdução, localização e acesso

A área foco dos estudos deste trabalho é a Barragem de Pirapora localizada no rio Tietê a jusante da foz do rio Juqueri, na região próxima ao município de Pirapora do Bom Jesus (SP), próximo as coordenadas UTM 23K 7411683 m N 296095 m E (Figura IV.1). A montante da barragem de Pirapora se encontra a Barragem de Edgard de Souza, e a jusante situa-se a Barragem de Rasgão e seu reservatório, que juntamente com a Barragem de Pirapora do Bom Jesus compõem a UHE Rasgão.



Figura IV.1 – Carta topográfica 1:50.000 SF-23-Y-C-III-3 IBGE (1984) e SF-23-Y-C-II-4 IBGE (1973).

O acesso à Barragem de Pirapora pode ser feito, a partir da cidade de São Paulo, pela Estrada dos Romeiros, na altura do km 52.

Construída pela empresa LIGHT (Light Serviços de Eletricidade S.A.), a Barragem de Pirapora (Foto IV.1) entrou em operação em 1956 com o objetivo de armazenamento das afluências e a elevação dos níveis d'água no rio Tietê para o funcionamento do sistema de reversão Billings-Henry Borden, visando a geração de energia elétrica.

Atualmente o principal objetivo da barragem é o controle das cheias que atingem a bacia do Alto Tietê, de forma a evitar inundações no município de Pirapora do Bom Jesus e na bacia do Médio Tietê.

Quanto ao circuito de adução, local ao qual se destinam os estudos de compartimentação, será escavado, na margem esquerda (**Foto IV.2**), em rocha com aproximadamente 200 m de extensão e 7 m de diâmetro.



Foto IV.1 Fotografia da barragem de Pirapora do Bom Jesus e o emboque de jusante pré-existente (Google 2005)

IV.1.2 Aspectos geográficos

A usina de Pirapora se encontra em uma porção mais estreita do rio, onde o seu vale é mais profundo. Nesta região o vale do rio Tietê segue com rumo predominante noroeste, com meandros fortemente condicionados por estruturas geológicas (**Figura IV.2**). Os trechos a montante e a jusante da barragem de Pirapora do Bom Jesus têm um relevo relativamente suave quebrado por linhas de morros com orientação geral aproximadamente leste-oeste.

Hidrogeograficamente a região de estudo se localiza na porção mais a oeste da bacia do Alto Tietê, que se estende das nascentes do rio Tietê no município de Salesópolis (SP) até a barragem de Rasgão próximo ao município de Pirapora do Bom Jesus, no que compõe a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (URGHI) 6.

Através do rio Tietê, a URGHI 6 exporta à URGHI 10 (Vargem Grande) cerca de 0,36 m³/s de água, número relativamente baixo se comparado aos 20 m³/s drenados pela UHE Henry Borden, porém há o sério agravante da poluição que para as águas da represa Billings variam segundo o IAP (Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público) de Ótimo a Regular enquanto que as águas do rio Tietê que passam pela barragem de Pirapora do Bom Jesus têm qualidade péssima ou ruim desde sua passagem pelo município de Mogi das Cruzes (JMR/ENGECORPS. 2005). Esta poluição é a

responsável pela característica formação de espumas nos trechos de maior velocidade do rio Tietê.



Foto IV.2 - Imagem de satélite da área de estudo (Google Earth, 2009).

IV.1.3 Geologia regional

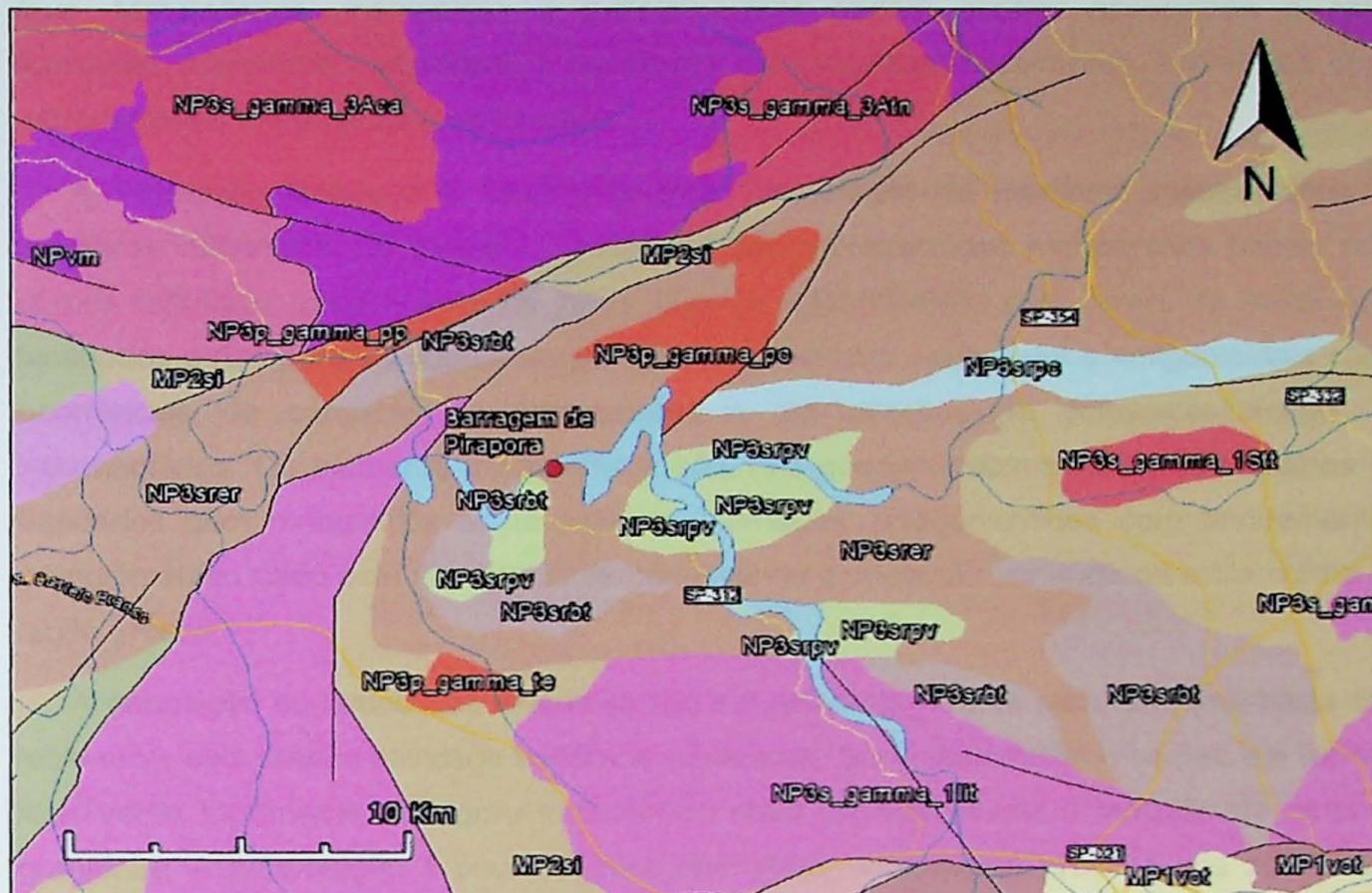
O alvo do estudo localiza-se em terrenos neoproterozóicos da Faixa de Dobramentos Ribeira, relacionados ao orógeno Socorro-Guaxupé, com suas unidades fortemente marcadas pela orientação noroeste-sudeste com diversas transcorrências dextrais associadas. Predominam na região as Formações Estrada dos Romeiros (NP3srer), Pirapora do Bom Jesus (NP3srpv, NP3srpc) e Boturuna (NP3srbt), pertencentes ao Grupo São Roque dentro do contexto tectônico do Terreno Apiaí, e os granitóides tipo A (NP3sy3A), pós-orogênicos em relação ao evento Socorro-Guaxupé (CPRM, 2006).

IV.1.3.0 Descrição das unidades

O grupo São Roque é compartimentado e descrito segundo CPRM (2006) em quatro formações: Estrada dos Romeiros (NP3srer); Pirapora do Bom Jesus (NP3srpv, NP3srpc); Boturuna (NP3srbt) e Piragibú (NP3srpi). Sendo também encontrados na região granitóides tipo A (NP3sy3A), pós-orogênicos em relação ao evento Socorro-Guaxupé.

A Formação Estrada dos Romeiros foi definida na região de Pirapora do Bom Jesus com constituição típica por metarenitos, ritmitos gradados micro-conglomeráticos e intercalações subordinadas de metapelitos. Esta formação situa-se tectonicamente sobre as rochas do

Grupo Serra do Itaberaba e apresenta contato transicional com a unidade carbonática da Formação Pirapora do Bom Jesus e brusco a transicional com a Formação Boturuna.



GRUPO SÃO ROQUE

NP3srbt	Formação Boturuna (NP3srbt)
NP3srer	Formação Estrada dos Romeiros (NP3srer)
NP3srpi	Formação Piragibú (NP3srpi)
NP3srpc	Formação Pirapora do Bom Jesus: Unidade carbonática (NP3srpc)
NP3srpv	Formação Pirapora do Bom Jesus: Unidade vulcânica (NP3srpv)

— Falha, fratura ou zona de cisalhamento indiscriminada

Figura IV.2 - Mapa geológico dos arredores da Barragem de Pirapora. Extraído de CPRM (2006)

Os metarenitos da Formação Estrada dos Romeiros são subarcóseos com passagens de quartzito fino brechado em sua base, e sobre esta, intercalações rítmicas de microconglomerados e metarenitos onde o membro metarenítico torna-se predominante em direção ao topo onde também ocorre o contato transicional para o membro metapelítico representado por ardósias e filitos.

Na Formação Pirapora do Bom Jesus são individualizáveis duas unidades, uma metavulcânica e outra carbonática. A unidade metavulcânica ocorre no topo da formação e possui geometria tabular e química tholeiítica com presença de rochas piroclásticas. Esta pilha metavulcânica apresenta ortoanfibolitos com estrutura reliquiar preservada intercalados

com talco xistos com níveis de cromititos e de hematita compacta e metacherts. Os ortoanfibolitos presentes no topo apresentam textura amigdaloidal e estruturas tipo *pillow lava*. Metarcóseos, metapelitos e metagrauvacas podem ocorrer associados a esta formação. A unidade carbonática é constituída por calcifilitos e mármore dolomíticos com estromatólitos e em certos locais oolitos.

A Formação Boturuna é constituída pela intercalação de membros metareníticos e membros vulcânicos. Os membros vulcânicos são representados nas porções basais por corpos tabulares estratificados de *pillow lavas* e ortoanfibolitos com níveis de metatufos laminados e nas porções superiores por derrames básicos vesiculares e amigdaloidais com ocorrências de camadas de metarcóseos e intercalações de vulcânicas ácidas a intermediárias. Os membros metareníticos são, nas porções intermediárias, arcoseanos e bandados com metapelitos e, no topo da Formação, ortoquartzíticos com bandamento granulométrico dado pela alternância de camadas de granulação variando de areia média a muito grossa.

A deposição do Grupo São Roque se deu em ambiente de mar raso, em uma bacia de retro-arco, com restrita atividade vulcânica subaquosa. Seu metamorfismo se deu em fácies xisto-verde localmente com grau metamórfico mais elevado devido à intrusão de corpos graníticos. A deformação é pouco intensa com maior estiramento próximo das zonas de cisalhamento e com dobras de vergência para noroeste (Bergmann. 1988 apud CPRM. 2006).

Os granitóides ocorrentes na região são pós-orogênicos com predominância de química alcalina com alto potássio. As rochas associadas variam de dioritos, quartzo-dioritos a álcaldi-quartzo sienitos e álcaldi granitos, em certos corpos apresentando textura *rapakivi* e em outros, estruturas de fluxo laminar.

IV.2. Aspectos locais

IV.2.1 Investigações realizadas

Para o estudo de superfície foram coletadas imagens aéreas da área e com o auxílio da fotointerpretação foi realizado o mapeamento geológico-geotécnico do local das obras na escala 1:500 (**Foto IV.3**) (Jensen P. D. et al, inédito).

Para a investigação de subsuperfície foram realizadas sondagens a trado, para a pesquisa de materiais de empréstimo para aterros e coleta de amostras para ensaios de laboratório, e sondagens percussivas, mistas e rotativas verticais e inclinadas, para a caracterização geológico-geotécnica dos solos e rochas dos locais das obras.

A medida do avanço das sondagens, foram realizados um total de 10 ensaios de infiltração d'água e SPT nos trechos em solo e 12 ensaios de perda d'água sob pressão nos trechos em rocha.

As sondagens a trado foram efetuadas no diâmetro de 4", até atingirem o impenetrável ao trado ou o nível d'água na área do canal de adução.

As sondagens a percussão foram efetuadas no diâmetro de 2,5", com ensaios SPT a cada metro, ensaios de infiltração e ensaios de lavagem por tempo. Foram paralisadas no impenetrável à lavagem por tempo ou ao atingir as profundidades desejadas.

As sondagens mistas e rotativas foram realizadas nos diâmetros NW (3" interno) e HW (4" interno). Suas profundidades máximas foram de 25,5 m na região do emboque de montante e 45,7 m na região do emboque de jusante.

A localização final das sondagens e a disposição das seções geológicas podem ser observadas na **Figura IV.3**. Os perfis individuais das sondagens estão dispostos no **Anexo 3**.

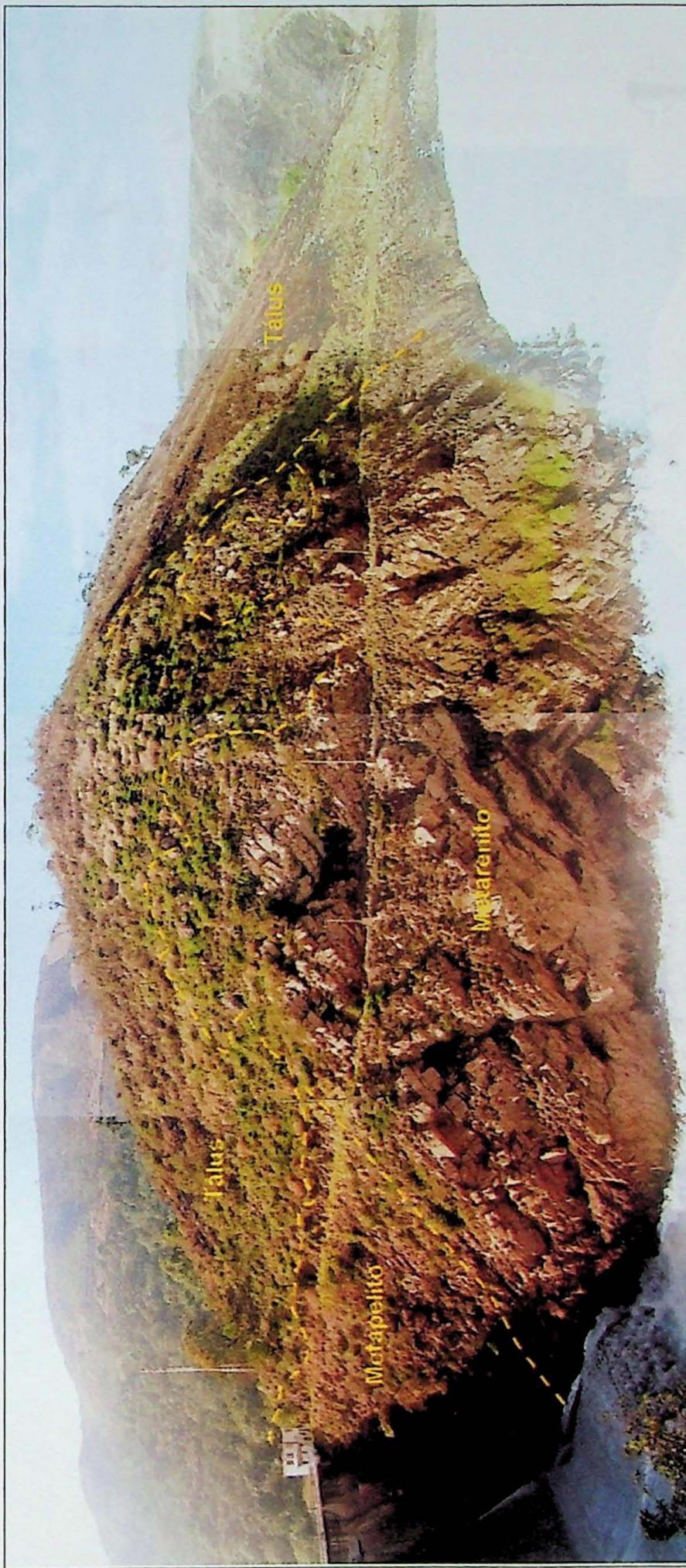


Foto IV.3 – Mapeamento de superfície realizado na margem esquerda com o auxílio de fotointerpretação (Jensen P. D. et al. inédito). Foto tirada a partir da margem direita

Figura IV.3 – Planta topográfica com local das sondagens e seções geológicas.



IV.2.2 Aspectos geológicos locais

Na área de estudo foram identificados principalmente metarenitos, metarcósios e metassiltitos, com ocorrências infrequentes de metargilitos. Estes ocorrem em sua maior parte recobertos por tálus de pequena espessura.

Através da **Foto IV.3** e do mapa geológico do **Anexo 7** observa-se a extensa cobertura de tálus na ombreira esquerda, e a espessa camada de colúvio na região próxima ao emboque de montante **Foto IV.4**. Nota-se que os metarenitos possuem maior resistência ao intemperismo e afloram melhor.

Na região do emboque de montante a espessura dos solos de alteração (SA) é maior (**Figura IV.4**), ultrapassando 10 m, enquanto na região do emboque de jusante (**Figura IV.5**) a cobertura de solos é muito delgada, praticamente aflorando a rocha. O emboque de montante se localiza, conforme foto abaixo, no pé da encosta, onde há o aterro da estrada e o tálus.

Foram realizados alguns ensaios de compressão uniaxial que permitiram, juntamente com a correlação entre os tipos litológicos e a classe de alteração do maciço de Vaz (1996), a determinação do intervalo de resistências a compressão para os tipos litológicos encontrados nas seções dos túneis (Jensen P. D. et al., inédito). São adotados para as rochas pouco alteradas: 30 – 70 MPa para os metassiltitos e 50 – 150 MPa para os metarenitos. Segundo Vaz (1996), as rochas alteradas moles (RAM) tem resistência inferior a 20 MPa.



Foto IV.4 – Vista geral da região de montante (Jensen P. D. et al., inédito)

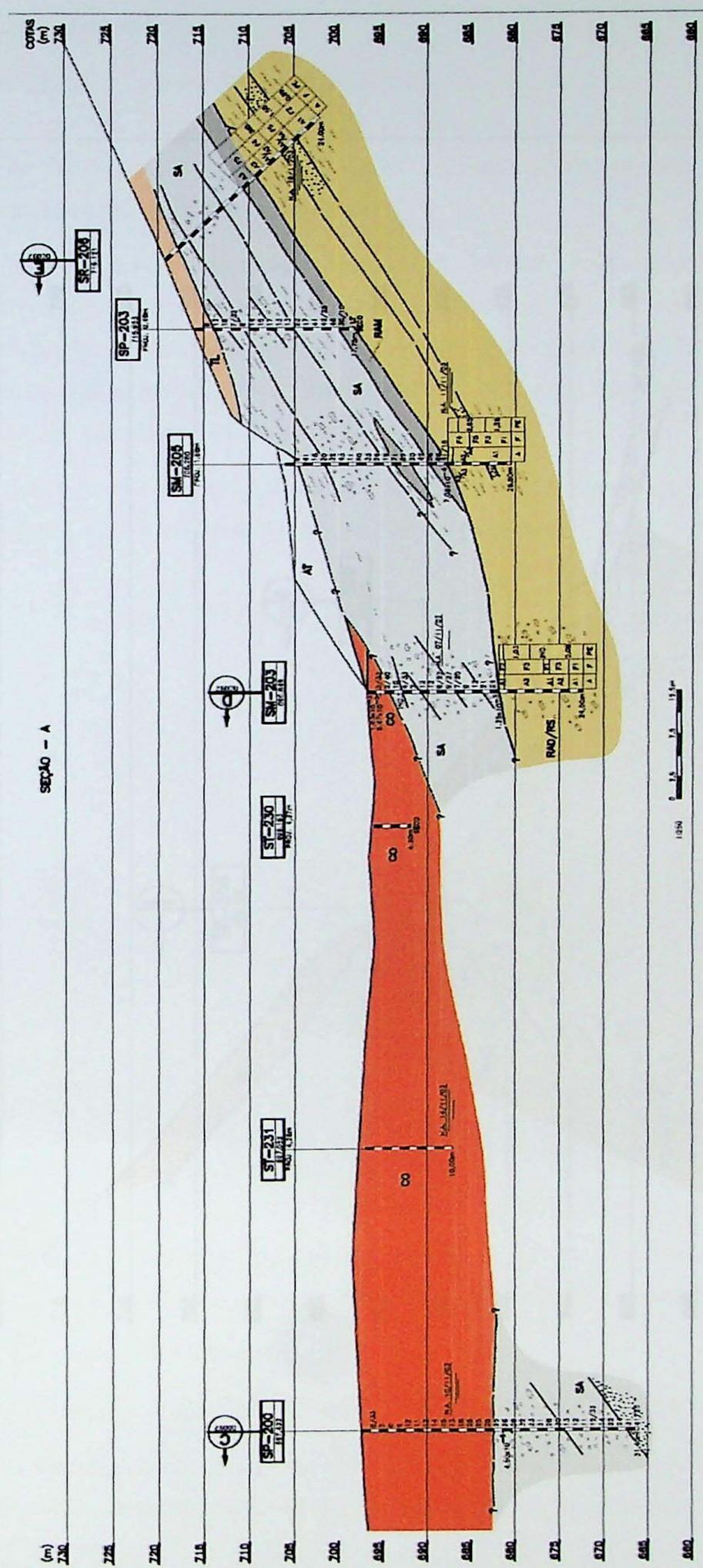


Figura IV.4 - Seção geológica A.

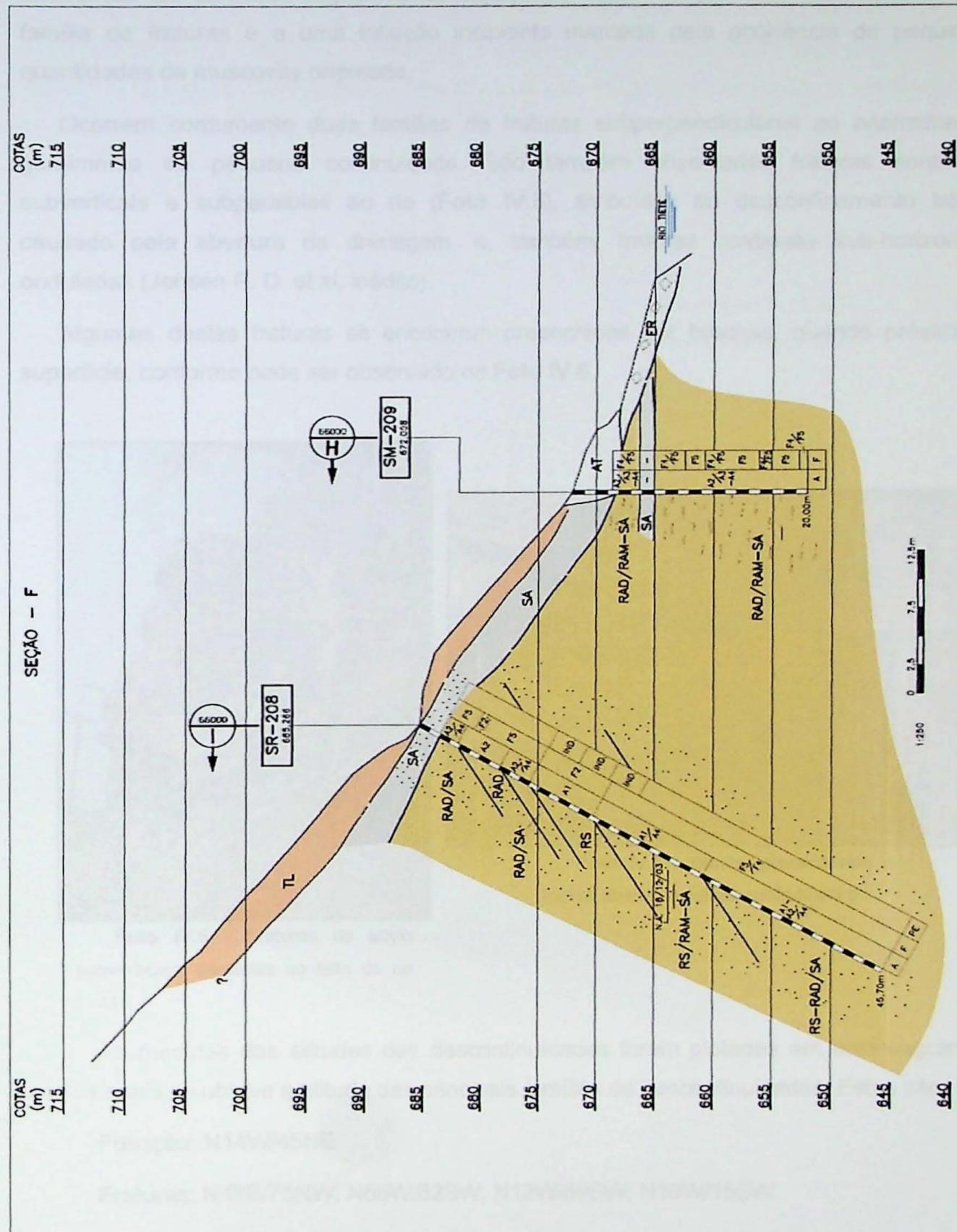


Figura IV.5 - Secção geológica F.

IV.2.3 Aspectos estruturais

A estrutura principal no maciço rochoso é a estratificação sedimentar, marcada pela alternância de camadas regularmente espaçadas. Esta foliação está associada a uma família de fraturas e a uma foliação incipiente marcada pela ocorrência de pequenas quantidades de muscovita orientada.

Ocorrem comumente duas famílias de fraturas subperpendiculares ao acamamento, geralmente de pequena continuidade. São também observadas fraturas contínuas subverticais e subparalelas ao rio (Foto IV.5), atribuídas ao desconfinamento lateral causado pela abertura da drenagem, e, também, fraturas contínuas sub-horizontais onduladas (Jensen P. D. et al, inédito).

Algumas destas fraturas se encontram preenchidas por brechas, quando próximo a superfície, conforme pode ser observado na Foto IV.6.

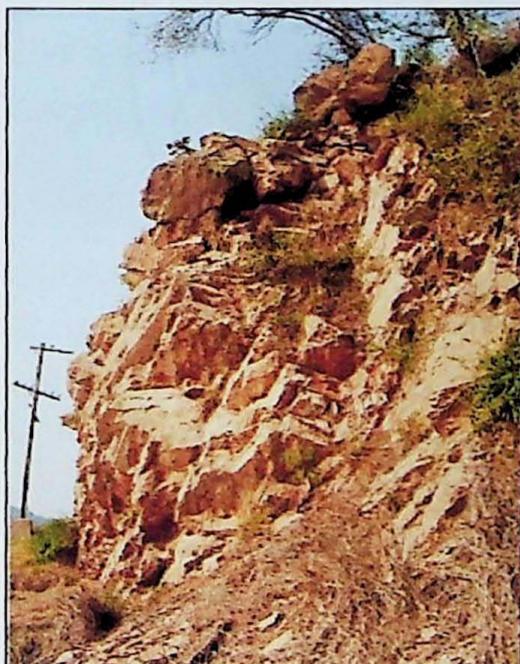


Foto IV.5 - Fraturas de alívio subverticais, paralelas ao leito do rio Tietê

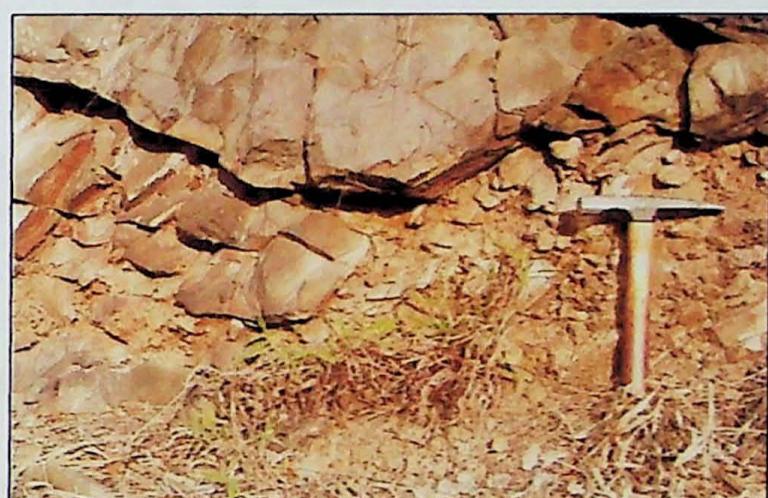


Foto IV.6 – Brecha preenchendo fratura aberta ondulada subhorizontal

As medidas das atitudes das descontinuidades foram plotadas em estereogramas com os quais se obteve a atitude das principais famílias de descontinuidades. Estas são:

Foliação: N14W/45NE

Fraturas: N46E/75NW; N68W/62SW; N12W/69SW; N18W/15SW

Sendo, como observado anteriormente, a foliação a descontinuidade mais marcante. Nota-se que as duas primeiras famílias de fraturas possuem pequena continuidade.

A orientação das descontinuidades apresenta alguma variação devido à presença de dobramento regional e de pequenas dobras, como observado em alguns testemunhos de sondagem.

A análise dos estereogramas (Figura IV.6) revela que, conforme Bieniawski (1989) e o apresentado na Tabela III.2 (Item F), o eixo do túnel a montante com escavação no sentido SW, estará desfavorável a foliação, e o eixo do túnel a jusante com escavação no sentido SE, estará favorável a foliação.

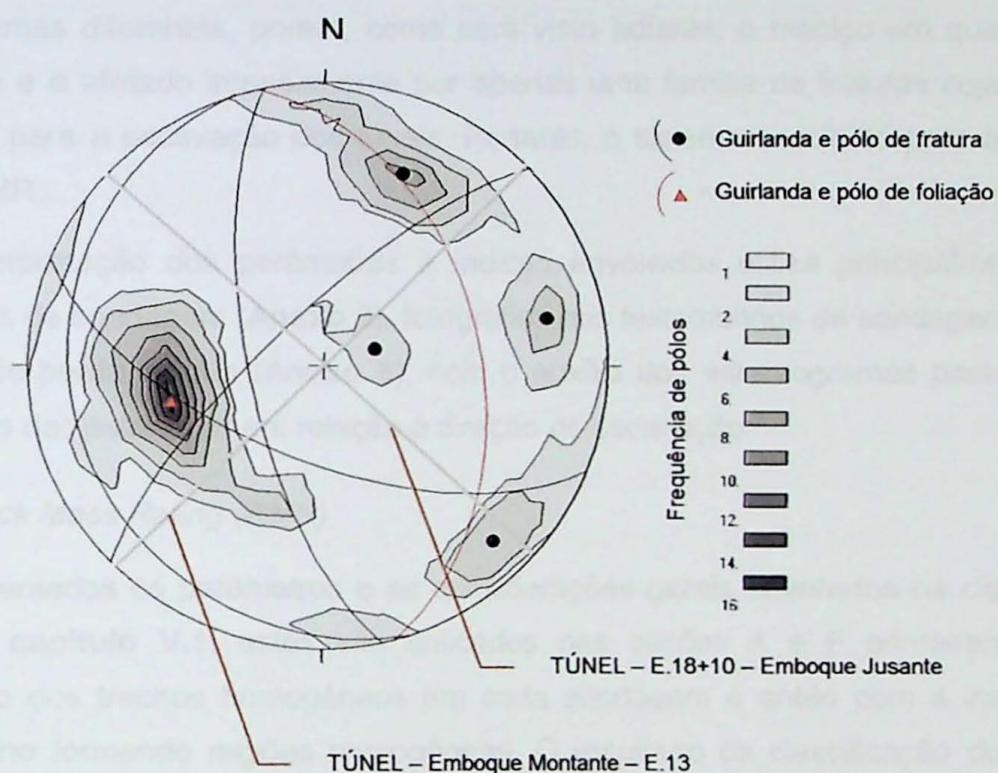


Figura IV.6 - Estereograma de igual área com a freqüência de pólos das descontinuidades, guirlandas das atitudes das principais famílias de descontinuidades e eixos do túnel (Jensen P. D. et al, inédito)

IV.3. Classificação do maciço

Para fins de aplicação dos sistemas de classificação de maciços rochosos, são utilizadas as seções A e F com orientação longitudinal em relação a escavação do túnel, localizadas conforme a **Figura IV.3** nas regiões de emboque. Estas seções são representativas da variação das classes de maciço e, portanto, dos tratamentos envolvidos ao longo da escavação de cada seção do túnel.

Autores como Hoek (2007) sugerem que um maciço seja classificado por pelo menos dois sistemas diferentes, porém, como será visto adiante, o maciço em questão têm boa qualidade e é afetado intensamente por apenas uma família de fraturas cuja orientação é relevante para a escavação dos túneis. Portanto, o sistema escolhido para a classificação será o RMR.

A interpretação dos parâmetros e índices envolvidos utiliza principalmente dos *logs* individuais de sondagem (**Anexo 3**), fotografias dos testemunhos de sondagem (**Anexo 5**) e ensaios de perda d'água (**Anexo 6**), com o auxílio dos estereogramas para a análise da orientação das estruturas em relação a direção de escavação.

IV.3.1 Rock Mass Rating (RMR)

Apresentados os parâmetros e as considerações gerais envolvidos na classificação do RMR no **capítulo V.1**, estes são aplicados nas seções A e F primeiramente com a separação dos trechos homogêneos em cada sondagem e então com a interpolação de cada trecho formando regiões homogêneas. O resultado da classificação dos trechos da região de montante e jusante são apresentados no **Anexo 8**.

V. CONSIDERAÇÕES E CONCLUSÃO

O procedimento de perfuração de uma sondagem involuntariamente causa o fraturamento dos testemunhos. Isto acarreta no aumento do fraturamento medido e na queda do RQD, especialmente em rocha fortemente foliada, como apontado em Deere & Deere (1989). De forma similar, a perfuração inclinada também pode aumentar o fraturamento de rochas foliadas conforme o ângulo de perfuração em relação a orientação da foliação. Por estas razões deve-se esperar que o RQD real seja significantemente maior do que o obtido nos testemunhos e, portanto, a classe das áreas mais penalizadas pelo espaçamento entre as fraturas e o RQD seja maior.

Algumas sondagens continham trechos com vazios possivelmente causados pela dissolução da rocha. Geralmente a presença de vazios é severamente impactante para a caracterização das descontinuidades, porém neste caso os vazios são relativamente pequenos e não apresentam continuidade, e portanto o desconto aplicado a pontuação das descontinuidades foi pequeno, quando houve.

O ajuste para a orientação das descontinuidades foi feito com o uso dos estereogramas, sendo adotado o critério de Bieniawski (1989). O resultado foi um ajuste desfavorável (-5 pontos) para o trecho de montante e favorável para o trecho de jusante (-2 pontos). Para alguns trechos de metarenitos, com foliação menos marcante, não foi aplicada penalidade.

Com estas considerações levantadas conclui-se que a estimativa realizada para o valor de RMR é muito conservadora, e podemos com segurança aumentar a pontuação RMR, para uso na estimativa dos tratamentos, dos trechos mais penalizados pelo RQD de forma que o maciço como um todo tenha classe mínima III e em média acima de II, para a região dos emboques.

A porção mais interna do maciço, por apresentar espessa cobertura de rocha, deve apresentar classe ainda maior. Não sendo observado através da fotointerpretação e nem do mapeamento de superfície nenhuma zona de falhas atravessando a porção central do maciço, podemos assumir que esta contém rochas de classe II ou I.

Desta forma, podem ser estimados os tratamentos para as escavações com o auxílio da tabela guia de Bieniawski (1989) (Anexo 9). Adotadas as considerações discutidas acima e desconsiderando-se para este trabalho o tratamento das porções de solos (cambotas, pregagens e outros), estima-se que para o tratamento dos túneis sejam utilizados principalmente chumbadores esparsos com alguns locais de aplicações sistemáticas.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE. 1983. *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos*. São Paulo, ABGE/CBMR. 132 p.
- ABGE. 1990. *Diretrizes para a execução de sondagens*. São Paulo, 3:45 p.
- ABGE. 2013. *Manual de sondagens*. São Paulo, 5: 214 p.
- ABNT. 1986a. *Sondagem a trado – Procedimento*. Rio de Janeiro, NBR 9603:1986.
- ABNT. 1986b. *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas*. Rio de Janeiro, NBR 9604:1986.
- ABNT. 1995. *Rochas e solos*. Rio de Janeiro, NBR 6502:1995.
- ABNT. 2001. *Execução de sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, NBR 6484:2001.
- Barton N., Lien R., Lunde J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 4:189-236 p.
- Base S/A. 2003. *Região de Pirapora do Bom Jesus – São Paulo*. Foto aérea. São Paulo, escala 1:20.000.
- Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S.Afr. Inst. Civil*, 12:335-344 p.
- Bieniawski. Z.T. 1979. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. In: International Congress Rock Mechanics, 4, Montreaux, 8-41 p.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley-Interscience. 272 p.
- CPRM. 2006. Mapa geológico do Estado de São Paulo escala 1:750.000. v 2.
- Deere D.U. & Deere D.W. 1989. Rock Quality Designation (RQD) after twenty years. US Army corps of engineers. 101 p.
- Deere D.U., Hendron A.J.Jr., Patton F.D. & Cording E., 1967. Design of surface and near – surface construction in rock. In: *failure and breakage of rock*. C. Fairhurst ed. Society of Mining Engineers of AIME, New York, 237-302 pp.
- IAEG. 1979. *Classification of rocks and soils engineering geological mapping*. Bull. IAEG. 24:364-371 p.
- IAEG. 1981. *Rock and soil description and classification for engineering geological mapping*. Bull. IAEG, 24:235-274 pp.
- IBGE. 1973. *Carta do Brasil*. SF-23-Y-C-II-4, Cabreúva, escala 1:50.000.

- IBGE. 1984. *Carta do Brasil*. SF-23-Y-C-III-3. Santana de Pamaíba, escala 1:50.000.
- IPT. 1984. *Estudos geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens)*. São Paulo, Relatório Técnico 19569.
- ISRM. 1978. Suggested methods for the quantitative descriptions of discontinuities in rock masses. *Intl. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.* 15:319-388 pp.
- Google Earth. 2009. *Região de Pirapora do Bom Jesus*. Imagem de satélite © DigitalGlobe 2009, 3/4/2009.
- Guidicini G. et al. 1972. Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. *In: Semana Paulista de Geologia Aplicada*, 4, São Paulo, Anais, 3:285-331 p.
- Hoek E. 1998. *Rock Engineering. The Application of Modern Techniques to Underground Design*. São Paulo, CBMR, CBT, ABMS, 267p.
- Hoek E. 2007 ed. *Practical Rock Engineering*. Disponível em: http://www.rockscience.com/education/hoeks_corner. Acessado em: 13/07/2013.
- Jensen P. D. et al. Inédito. Memorial das obras de engenharia. Relatório interno, THEMAG Engenharia e Gerenciamento LTDA, 2004.
- JMR/ENGECORPS. 2005. Relatório síntese do plano estadual de recursos hídricos 2004/2007. São Paulo, Brasil, URGHI 6, 6 p.
- Melo, M. M. 2010. Caracterização e compartimentação geológica e geomecânica de maciço basáltico heterogêneo, aplicados a engenharia. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Oliveira A.M. S & Brito S.N.A (Eds). 1998. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), 586p.
- Stacey T.R. e Page C.A. 1986. *Practical handbook for underground Rock Mechanics*. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 144 p.
- Terzaghi K. 1946. Rock defects and loads on tunnel supports. *In: Proctor, R. V. e White T. L. Rock Tunneling with Steel Supports*. Youngstown: Commercial Shearing and Stamping Co, 271 p.:17-99.
- Vaz L.F. 1996. Classificação genética de solos e horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. *Solos e Rochas*, São Paulo, 19:117-136.
- Wickham G.E. et al. 1972. Ground support prediction model. *In: Transit and Tunneling Conference*, New York, 1, proceedings, 43-64 p.

**ANEXO 1 – Parâmetros para classificação
de sondagens**

ALTERAÇÃO		
R1 (A1)	RS - Rocha Sã	<p>Sã ou praticamente sã.</p> <p>Alteração mineralógica nula ou incipiente.</p> <p>Cor original intacta.</p> <p>Somente escavável a fogo, perfuração somente com rotativa.</p>
R2 (A2)	RAD - Rocha Alterada Dura	<p>Alteração mineralógica perceptível.</p> <p>Cores esmaecidas e pequenas transformações físico-químicas.</p> <p>Somente escavável a fogo, perfuração somente com rotativa.</p>
R3 (A3)	RAM - Rocha Alterada Mole	<p>Alteração mineralógica acentuada.</p> <p>Cores parcialmente modificadas e intensas transformações físico-químicas.</p> <p>Escavável a picareta ou escarificador, perfuração com trépano e lavagem (ver restrição para rochas brandas em Vaz, 1996).</p>
S2 (A4)	SA - Solo de Alteração	<p>Alteração mineralógica praticamente completa.</p> <p>Cores totalmente modificadas e transformações físico-químicas completas, exceto nos minerais resistentes.</p> <p>Escavável a enxadão (corta com lâmina), perfuração à percussão.</p>
S1 (A4)	SE - Solo Eluvial	<p>Alteração mineralógica completa.</p> <p>Cores totalmente modificadas e transformações físico-químicas completas.</p> <p>Escavável a enxadão (corta com lâmina), perfuração à percussão.</p>
COERÊNCIA		
C1	Coerente	<p>Quebra com dificuldade ao golpe do martelo formando poucos fragmentos de bordas cortantes.</p> <p>Superfície dificilmente ou apenas levemente riscada por lâmina de aço.</p> <p>Características mecânicas elevadas.</p>
C2	Medianamente Coerente	<p>Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo em vários fragmentos com bordas que podem ser quebradas pela pressão dos dedos.</p> <p>A lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento.</p> <p>Características mecânicas boas.</p>
C3	Pouco Coerente	<p>Quebra facilmente ao golpe do martelo, produzindo muitos fragmentos que podem ser partidos manualmente.</p> <p>A lâmina de aço produz sulcos profundos na superfície do fragmento.</p> <p>Características mecânicas baixas.</p>
C4	Incoerente	<p>Esfarela ao golpe do martelo e desagrega sob a pressão dos dedos.</p> <p>Pode ser cortado por lâminas de aço.</p> <p>Friável.</p> <p>Características mecânicas muito baixas.</p>
FRATURAMENTO		
DENOMINAÇÃO		NÚMERO DE FRATURAS POR METRO
F1	Muito pouco fraturada	0 a 1
F2	Pouco fraturada	2 a 5
F3	Medianamente fraturada	6 a 10
F4	Muito fraturada	11 a 20
F5	Extremamente fraturada	Em fragmentos

ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES					
H	Horizontal	Descontinuidades horizontais			
SH	Sub-Horizontal	Com mergulho de 0° a 20°			
I	Inclinada	Com mergulho de 20° a 70°			
SV	Sub-Vertical	Com mergulho de 70° a 90°			
TIPOS DE SUPERFÍCIE E PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES					
COM CONTATO ROCHA x ROCHA			SEM CONTATO ROCHA x ROCHA		
D1	Rugosa	Superfícies irregulares, os testemunhos se encaixam naturalmente (fratura travada)	PO		Descontinuidades com suspeita de preenchimento (os testemunhos não se encaixam)
D2	Estriada	Superfície com estriadas, o deslizamento é mais fácil em uma direção	P1 (5)	Granular	Descontinuidades preenchidas por material granular incoerente (indicada espessura em mm)
D3	Plana	Superfícies planas, o deslizamento é fácil em qualquer direção	P2 (5)	Misto	Descontinuidades preenchidas por material granular e argiloso (indicada espessura em mm)
D4	Sedosa	Superfícies sedosas ou "talcosas" ao tato	P3 (5)	Argiloso	Descontinuidades preenchidas por material argiloso (indicada espessura em mm)
			Pox – película oxidada		
			Pa – paredes alteradas		

ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)	
PORCENTAGEM	QUALIDADE DA ROCHA
100 – 91	Excelente
90 – 76	Boa
75 – 51	Regular
50 – 26	Pobre
25 – 0	Muito Pobre

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA			
H1	Muito Baixa	-	Menos que 0,1 l/min.m.kg/cm ²
H2	Baixa	-	De 0,1 a 1,0 l/min.m.kg/cm ²
H3	Média	-	De 1,0 a 5,0 l/min.m.kg/cm ²
H4	Alta	-	De 5,0 a 10,0 l/min.m.kg/cm ²
H5	Muito Alta	-	Maior que 10,0 l/min.m.kg/cm ²

ENSAIOS SPT		
SOLO	CONSISTÊNCIA OU COMPACIDADE	NÚMERO DE GOLPES/30cm FINAIS
Areias e Siltos Arenosos	Fofa	≤ 4
	Pouco compacta	5 a 8
	Medianamente compacta	9 a 18
	Compacta	19 a 40
	Muito compacta	> 40
Argilas e Siltos Argilosos	Muito mole	≤ 2
	Mole	3 a 5
	Média	6 a 10
	Rija	11 a 19
	Dura	> 19

NOTAS:

Critérios de impenetrável na sondagem a percussão, com base nos ensaios SPT

Para os 1^{os} 15 cm – Relação 5 golpes/1cm, com um mínimo de 20 golpes.

Para os 2^{os} 15 cm – Relação 2 golpes/1cm, com um mínimo de 30 golpes.

Para os 30cm finais - ≥ 50 golpes/30cm.

Critérios de impenetrável na sondagem à percussão, com base no trépano de lavagem

A sondagem deve ser dada por encerrada quando, no ensaio de avanço da perfuração por circulação de água, forem obtidos avanços inferiores a 50 mm em cada período de 10 min para um ensaio total de 30 min.

Quando, após a realização de quatro ensaios consecutivos, não for alcançada a profundidade de execução do SPT.

ANEXO 2 – Tabelas de classificação RMR

A - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO

Parâmetro			Intervalos dos valores					
1	Resistência da rocha intacta	Índice da resistência puntiforme (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Faixa restrita ao uso do teste de compressão uniaxial	
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5 <1
	Peso	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (Rock Quality Designation)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25	
	Peso	20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2m	0,6 - 2m	200 - 600mm	60 - 200mm	<60mm	
	Peso	20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (ver E)		Superfícies muito rugosas, descontínuas, sem separação, paredes sem alteração.	Superfícies pouco rugosas, separação <1mm, paredes pouco alteradas.	Superfícies pouco alteradas, separação <1mm, paredes alteradas.	Superfícies estriadas ou preenchimento com espessura <5mm ou separação 1 - 5mm, contínuas.	Preenchimento com espessura >5mm ou separação >5mm, contínuas.	
	Peso	30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Vazão por trechos de 10m (l/min)	0	<10	10 - 25	25 - 125	>125	
		Pressão d'água nas fraturas / tensão principal	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	>0,5	
		Condições gerais	Seco	Umidecido	Úmido	Gotejando	Fluxo abundante	
	Peso	15	10	7	4	0		

B - AJUSTE PARA A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES (ver F)

Orientação da direção e mergulho das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

C - CLASSES DE MACIÇOS ROCHOSOS

Somatória dos pesos	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<21
Classes de maciços	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre

D - SIGNIFICADO DAS CLASSES

Classes de maciços	I	II	III	IV	V
Tempo médio de auto-sustentação	20 anos para vão de 15 m	1 ano para vão de 10 m	1 semana para vão de 5 m	10 horas para vão de 2,5 m	30 minutos para vão de 1 m
Coesão do maciço rochoso (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Ângulo de atrito do maciço rochoso	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

E- CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação	Sem separação	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Sem preenchimento	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Mole < 5 mm	Mole > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Alteração	Sem alteração	Pouco alterado	Medianamente alterado	Muito alterado	Decomposto
Peso	6	5	3	1	0

Resumo do sistema RMR (Bieniawski, 1989)

**ANEXO 3 – Tabelas de classificação do
sistema Q**

Jn – ÍNDICE DAS FAMÍLIAS DE FRATURAS

Número de grupos de fraturas	Jn
A. Maciço, nenhuma ou poucas fraturas presentes	0,5 - 1,0
B. Uma família de fraturas	2
C. Uma família de fraturas mais fraturas esparsas	3
D. Duas famílias de fraturas	4
E. Duas famílias de fraturas mais fraturas esparsas	6
F. Três famílias de fraturas	9
G. Três famílias de fraturas mais fraturas esparsas	12
H. Quatro ou mais famílias de fraturas, fraturas aleatórias, maciço muito fraturado	15
J. Rocha fragmentada, aspecto terroso	20

Jr – ÍNDICE DA RUGOSIDADE DAS FRATURAS

Tipo de rugosidade das fraturas	Jr	Notas:
a. Contato entre as paredes		
b. Contato entre as paredes com espaçamento inferior a 10 cm		
A. Fraturas descontínuas	4	1. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio das famílias de fraturas for maior do que 3 m.
B. Paredes rugosas, irregulares ou onduladas	3	
C. Paredes suaves e onduladas	2	
D. Paredes estriadas e onduladas	1,5	
E. Paredes planas. Rugosas ou irregulares	1,5	
F. Paredes lisas e planas	1	
G. Paredes estriadas e planas	0,5	
c. Sem contato entre as paredes		
H. Zonas com espesso preenchimento argiloso	1	2. Para fraturas planares e estriadas com lineações orientadas segundo a direção de mínima resistência, pode ser adotado Jr = 0,5
J. Zonas com espesso preenchimento granular	1	

J_a – ÍNDICE DA ALTERAÇÃO DAS FRATURAS

Alteração das fraturas	J _a
a. Contato entre as paredes	
A. Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis	0,75
B. Paredes não alteradas, cobertura apenas por películas	1
C. Paredes ligeiramente alteradas, películas compactas, partículas arenosas, sem argila	2
D. Preenchimentos silto-argilosos ou areno-argilosos, pequena fração de argila	3
E. Preenchimentos argilosos com pequenas quantidades de argilas expansivas (máximo de 1 - 2 mm)	4
b. Contato entre as paredes com espaçamento inferior a 10 cm	
F. Partículas arenosas, sem argila	4
G. Preenchimentos argilosos contínuos fortemente consolidados, com espessura < 5mm	6
H. Preenchimentos argilosos contínuos medianamente ou pouco consolidados, com espessura < 5 mm	8
I. Preenchimentos argilosos expansivos contínuos, com espessura < 5 mm. O valor de Já varia conforme a expansividade da argila e do acesso a água	8 - 12
c. Sem contato entre as paredes	
J.	6
K. Zonas ou camadas com rochas fragmentadas e argila (varia conforme as condições dos itens G, H e I)	8
L.	8 - 12
M. Zonas ou camadas com preenchimento silto-argiloso ou areno-argiloso, pequena fração de argila	5
N.	10 - 13
O. Zonas ou camadas espessas de argila (varia conforme as condições dos itens G, H e J)	6 - 24
P.	6 - 24

J_w - PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NAS FRATURAS

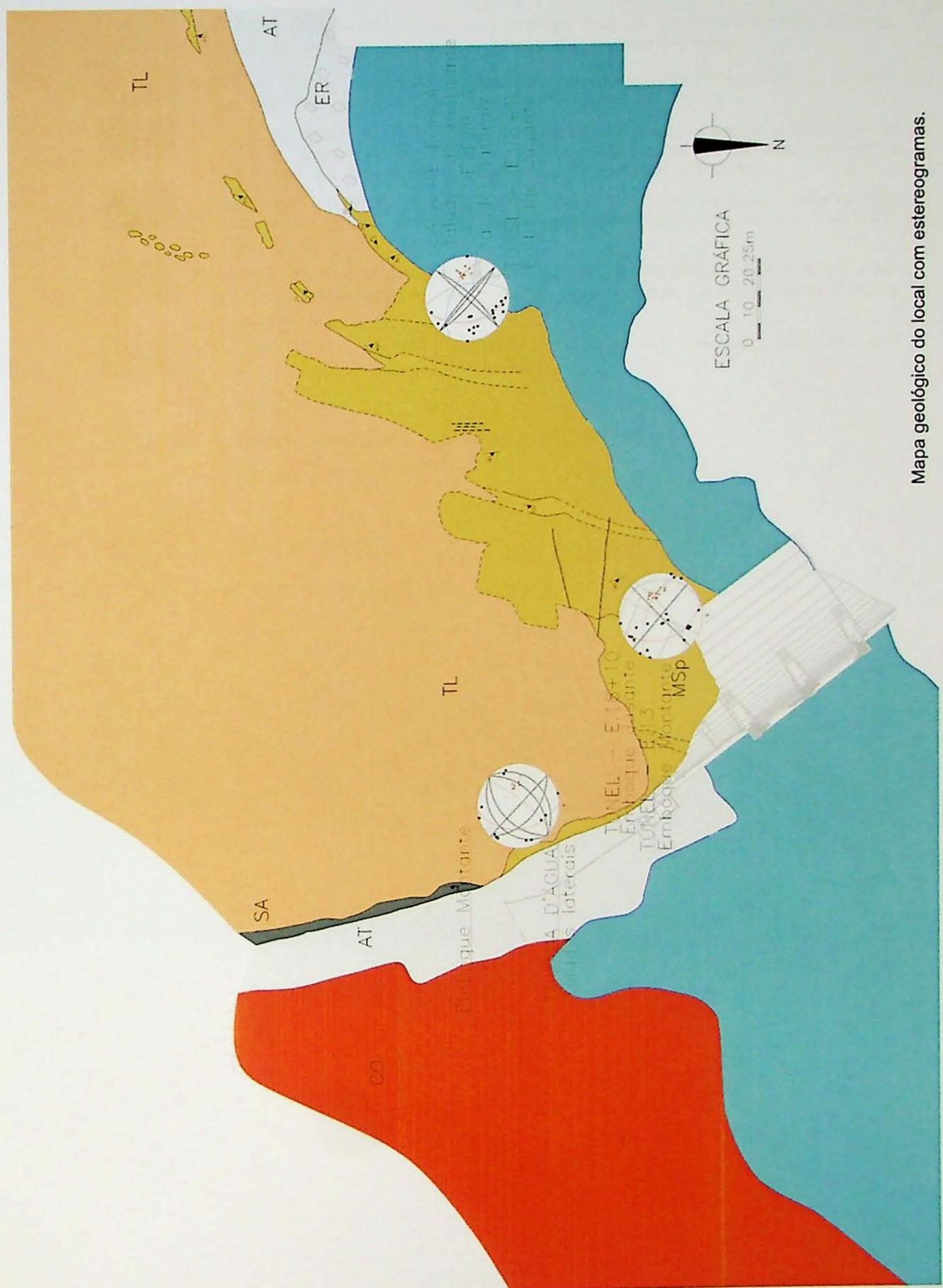
Percolação de água	J _w	Pressão d'água aprox. (kgf/cm ²)
A. Escavações secas ou fluxo < 5 L/m localmente	1	< 1
B. Fluxo ou pressão médios, lavagem ocasional do preenchimento das descontinuidades	0,66	1,0 - 2,5
C. Fluxo ou pressão elevados em rocha competente com fraturas sem preenchimento	0,5	2,5 - 10,0
D. Fluxo ou pressão elevados	0,33	2,5 - 10,0
E. Fluxo excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, que decaem com o tempo	0,2 - 0,1	> 10
F. Fluxo ou pressão excepcionalmente elevados	0,1 - 0,05	> 10

SRF - FATOR DE REDUÇÃO DE TENSÕES

Fator de redução	SRF		
a. Zonas de fraqueza interseccionando a escavação que podem causar o desprendimento de blocos durante a escavação			
A. Múltiplas ocorrências de zonas de fraturas contendo argilas ou rocha quimicamente deteriorada, maciço rochoso frouxo ao redor, todas as profundidades			10
B. Zonas de fraqueza individuais contendo argila ou rocha quimicamente deteriorada, profundidade da escavação < 50 m			5
C. Zonas de fraqueza individuais contendo argila ou rocha quimicamente deteriorada, profundidade da escavação > 50 m			2,5
D. Múltiplas zonas de cisalhamento em rocha competente (sem argila), maciço rochoso frouxo ao redor (qualquer profundidade)			7,5
E. Zonas de cisalhamento individuais em rocha competente (sem argila), profundidade da escavação < 50 m			5
F. Zonas de cisalhamento individuais em rocha competente (sem argila), profundidade da escavação > 50 m			2,5
G. Fraturas abertas e soltas, rocha muito fraturada, todas as profundidades			5
b. Rocha competente, problemas de tensões na rocha			
H. Tensões baixas, próximo a superfície	> 200	> 13	2,5
I. Tensões médias	200 - 10	13 - 0,66	1
J. Tensões altas, estruturas rochosas muito fechadas (geralmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável a estabilidade das paredes)	10 - 5	0,66 - 0,33	0,5 - 2
K. Moderadas explosões de rochas (rocha maciça)	5 - 2,5	0,33 - 0,16	5 - 10
L. Intensas explosões de rochas (rocha maciça)	< 2,5	< 0,16	10 - 20
c. Rocha comprimida (<i>squeezing rock</i>), fluxo plástico em rocha incompetente sob a influência de alta pressão			
M. Pressão moderada de compressão			5 - 10
N. Pressão elevada de compressão			10 - 20
d. Rochas dilatantes, dilatamento químico dependente da presença de água			
O. Pressão moderada de dilatação			5 - 10
P. Pressão alta de dilatação			10 - 15

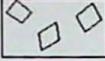
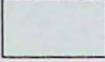
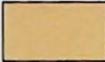
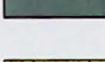
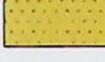
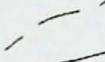
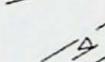
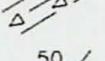
Resumo do sistema Q (Barton et al., 1974 apud Hoek, 2007)

ANEXO 7 – Mapa geológico e legenda



Mapa geológico do local com estereogramas.

LEGENDA

-  – ENROCAMENTO (ER) – blocos de metassedimentos.
-  – ATERRA (AT) – silte argiloso ou arenoso, marrom amarelado e argila arenosa, marrom, com fragmentos e blocos de metassedimentos.
-  – TÁLUS (TL) – fragmentos angulosos de metassedimentos com 3 a 10cm de diâmetro, envoltos por matriz silto-arenosa, marrom.
-  – COLÚVIO (CO) – Argila siltosa, argila siltosa pouco arenosa e argila pouco arenosa, marrom avermelhada, com grânulos e fragmentos de metassedimentos. Presença de blocos e fragmentos de metarcósio na base.
-  – SOLO DE ALTERAÇÃO DE METAPELITOS (SA) – Silte areno-argiloso e silte argiloso, amarelo e róseo, laminado, localmente com fragmentos de rocha alterada mole (RAM).
-  – METASSEMENTOS (MS) – METARENITOS E METARCÓSIOS (MSa) médios com porções brechóides e intercalações subordinadas de metarenitos finos e metapelitos.
-  – METASSEMENTOS (MS) – METAPELITOS (MSp) com intercalações subordinadas de metarenitos e metarcósios finos.
-  – CONTATO GEOLÓGICO DEFINIDO
-  – CONTATO GEOLÓGICO APROXIMADO OU INFERIDO
-  – FRATURAS PRINCIPAIS
-  – ZONA BRECHADA
-  – ATITUDE DE FOLIAÇÃO COM INDICAÇÃO DO MERGULHO

ANEXO 8 – Classificação RMR

CLASSIFICAÇÃO RMR

Estrutura/Local: Emboque montante

Seção A

PARÂMETROS	Peso máximo	Valor e peso em cada sondagem									
		SM-203 (14,98 a 18,50)	SM-203 (18,50 a 21,00)	SM-203 (21,00 a 22,95)	SM-203 (22,95 a 24,50)	SM-205 (18,30 a 22,00)	SM-205 (22,00 a 23,52)	SM-205 (23,52 a 25,50)	SM-206 (11,00 a 14,00)	SR-206 (14,00 a 17,90)	SR-206 (17,90 a 20,40)
RCU (MPa)	15	100	100	100	130	50	100	130	5	50	100
RQD	20	9	9	9	12	6	9	12	1	6	9
Espaçamento descontinuidades (mm)	60 - 200	60 - 200	60 - 200	60 - 200	> 2 m	<60 mm	60 - 200	> 2 m	< 60 mm	< 60 mm	200 - 600 mm
Condição das descontinuidades	8	8	8	20	5	8	20	5	6	5	10
Agua subterrânea	30	25	25	25	30	18	25	25	20	11	25
RMR	100	63	59	63	92	41	65	87	39	31	42
Ajuste orientação descontinuidades (túneis)	-12	0	0	0	0	-5	0	-5	-5	0	-5
Soma das notas	-	63	59	63	92	36	65	82	34	26	42
Classe	-	II	III	II	I	IV	II	I	IV	III	II

CLASSIFICAÇÃO RMR								
			Estrutura/Local: Emboque iusante					
			Séção F					
			Valor e peso em cada sondagem					
PARÂMETROS	Peso máximo	SR-208 (2,00 a 10,92)	SR-208 (10,92 a 17,30)	SR-208 (17,30 a 28,20)	SR-208 (28,20 a 35,20)	SM-209 (3,45 a 5,75)	SM-209 (6,45 a 20,00)	
RCU (MPa)	15	100	130	130	130	30	50	
RQD	20	9	12	12	12	3	6	
Espaçamento descontinuidades (mm)	20	<25	90 - 100	<25	<25	<25	<25	
Condição das descontinuidades	30	5	15	5	5	5	5	
Água subterrânea	15	seco	Fluxo abundante	Gotejando	Gotejando a úmido	Gotejando a úmido	Gotejando a úmido	
RMR	100	42	77	54	49	26	44	
Ajuste orientação descontinuidades (túneis)	-12	0	0	0	0	-2	-2	
Soma das notas	-	42	77	54	49	24	42	
Classe	-	III	II	III	IV	III	III	

ANEXO 9 – Tratamentos RMR

Guia para a escavação e suporte de túneis em rocha de acordo com o sistema RMR

Classe do maciço	Escavação	Suportes		
		Chumbadores	Concreto projetado	Vigas de aço
Rocha muito boa I RMR:81 - 100	Seção completa, avanços de 3 m	Geralmente, não há necessidade de apoio algum, exceto ocasional		
Rocha boa II RMR:61 - 80	Seção completa, avanços entre 1,0 - 1,5 m. Suporte completo a 20 m da frente.	Localmente, chumbadores na coroa com 3 m de comprimento e espaçamento de 2,5 m, ocasional tela metálica	50 mm na coroa, quando necessário	Nenhuma
Rocha razoável III RMR: 41 - 60	Galeria superior e bancada, avanços entre 1,5 - 3,0 m na galeria superior. Iniciar suporte após cada detonação. Suporte completo a 10 m da frente.	Chumbadores sistemáticos com 4 m de comprimento e espaçamento entre 1,5 e 2 m na coroa e nas paredes, com tela metálica na coroa	50 - 100 mm na coroa e 30 mm nas laterais	Nenhuma
Rocha ruim IV RMR: 21 - 40	Galeria superior e bancada com avanço de 1,0 - 1,5 m na galeria superior. Instalação de suportes concomitante com a escavação a 10 m da frente.	Chumbadores sistemáticos com 4 - 5 m de comprimento e espaçamento entre 1 e 1,5 m na coroa e paredes com tela metálica	100 - 150 mm na coroa e 100 mm nas laterais	Vigas leves a médias, espaçadas em 1,5 m, onde for necessário
Rocha muito ruim V RMR: < 20	Múltiplas frentes, avanços entre 0,5 - 1,5 m na galeria superior. Instalação de suportes concomitantemente com a escavação. Concreto projetado assim que possível após a detonação.	Chumbadores sistemáticos com 5 - 6 m de comprimento, espaçados 1 - 1,5 m na coroa e paredes com tela metálica. Inversão dos chumbadores.	150 - 200 mm na coroa, 150 mm nas laterais e 50 mm na seção	Vigas médias a pesadas espaçadas 0,75 m.

