

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**“CONTRIBUIÇÃO À CLASSIFICAÇÃO  
GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS  
UTILIZANDO O SISTEMA RMR”**

**Talita de Oliveira Muzzi**

**Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares  
Co-Orientador: Luiz Ferreira Vaz**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-07/42)**

**SÃO PAULO  
2007**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024332

**“CONTRIBUIÇÃO À CLASSIFICAÇÃO  
GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS  
UTILIZANDO O SISTEMA RMR”**

**Talita de Oliveira Muzzi**



**Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares  
Co-Orientador: Luiz Ferreira Vaz**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-07/42)**

**SÃO PAULO  
2007**



TF  
mqay  
TO.c

UNIVERSITY OF CALIFORNIA  
INSTITUTIONAL RESEARCH

THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA  
INSTITUTIONAL RESEARCH  
THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA



THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

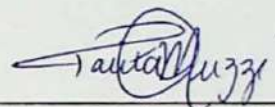
UNIVERSITY OF CALIFORNIA  
INSTITUTIONAL RESEARCH

UNIVERSITY OF CALIFORNIA  
INSTITUTIONAL RESEARCH

UNIVERSITY OF CALIFORNIA  
INSTITUTIONAL RESEARCH

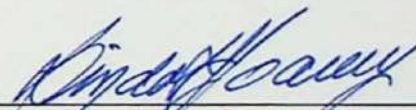
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Em referência a Monografia do Trabalho de Formatura 2007 (TF-07/42) **“Contribuição à classificação geomecânica de maciços rochosos utilizando o sistema RMR”** estão de acordo:



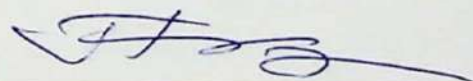
---

**Aluna:** Talita de Oliveira Muzzi  
Instituto de Geociências



---

**Orientador:** Prof. Dr. Lindolfo Soares  
Escola Politécnica – Engenharia de Minas



---

**Co-orientador:** Luiz Ferreira Vaz  
Professor convidado IG/UNICAMP  
Themag Engenharia Ltda



**EPÍGRAFE**

**“Somos mais pais do nosso futuro do que filhos do nosso passado.”**

**(Miguel de Unamuno)**

# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

### AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por Sua constante presença em minha vida.

À todos de minha querida família, sem os quais eu não seria como sou hoje. À meus pais, Arlene e Cabral, toda a minha admiração, amor e respeito. Aos meus irmãos, Rodrigo e Tenile, agradeço o apoio e carinho de sempre, as infinitas risadas e até mesmo as brigas! "Não poderia ter melhores irmãos!". Acrescento aqui, o meu mais novo irmão Paulo César, cujas palavras são sempre tão animadoras, otimistas e cheias de entusiasmo. À bisavó mais coruja do mundo (Vó Terezinha) e a minha pepita de ouro, Pietra, que mesmo me deixando exausta, me faz ficar hipnotizada ao observá-la.

Ao Saulo que esteve presente em toda a minha graduação, torcendo por mim, meu carinhoso e apertado abraço. Obrigado por todas as dicas, pelas revisões da monografia e por ser a pessoa que sabe como me fazer seguir adiante.

Sou muito grata à Themag por me proporcionar tanto aprendizado, mas destaco duas pessoas especiais: Vaz e Marilda, verdadeiros mestres. Estes não são apenas companheiros de trabalho, são grande parte de meu crescimento.

"Vaz, obrigada pelas orientações de sempre, por mostrar o melhor caminho, pelos sábados corrigindo o trabalho, pelos almoços e boas conversas".

"Marilda, obrigada pelos infinitos ensinamentos, pela compreensão e carinho que sinto ser recíproco".

Aos geólogos Edmundo, Tays, Silvia e, especialmente, Ivan, cuja convivência é um enorme prazer, agradeço todas as instruções e lições do dia-a-dia e, gosto muito de saber que se tornaram meus grandes amigos.

Ao orientador Prof. Dr. Lindolfo, que foi quem me apresentou e me fez gostar da Geologia de Engenharia.

"Estagiários!!! Eu nunca me esqueceria de vocês, mesmo como a Alba diz, sendo a *chefe de estagiários* (risos)". Daniel, Diego, Nikolai e Magali, todos os momentos foram bons e únicos, seja na Themag, no Estagiários Grill ou no barzinho relaxando ao lado de pessoas tão queridas como o Cláudio, o Nonato e a Alba.

À todos da minha turma de faculdade, aquele brinde que costumamos fazer: "Que nossos filhos tenham ... ..".

As imagens dizem tudo.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



SÃO PAULO  
2007



## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. Introdução .....	1
1.1. Considerações Iniciais .....	1
1.2. Justificativas .....	2
2. Objetivos .....	3
3. Trabalhos Prévios .....	3
3.1. Evolução dos Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos .....	4
3.2. O Sistema RMR.....	10
3.3. O Maciço Rochoso e a Alteração Intempérica .....	15
3.4. A Elaboração de uma Classificação .....	19
4. Materiais e Métodos .....	20
5. Desenvolvimento do Trabalho .....	20
6. Definição dos Parâmetros a Serem Utilizados e Interpretações Preliminares.....	23
6.1. Considerações Preliminares .....	23
6.1.1. Parâmetros a Serem Utilizados nas Classificações de Sondagens.....	23
6.1.2. Parâmetros do Sistema RMR e Avaliações Críticas Preliminares .....	24
7. Estudos de Casos .....	29
7.1. Estudo de Caso Nº 1 .....	29
7.1.1 Síntese da Geologia Regional e Local .....	30
7.1.2. Classificação de Sondagens e Seção Geológica .....	32
7.2. Estudo de Caso Nº 2 .....	34
7.2.1. Síntese da Geologia Regional e Local .....	35
7.2.2. Classificação de Sondagens e Seção Geológica .....	35
7.3. Estudo de Caso Nº 3 .....	37
7.3.1. Síntese da Geologia Regional e Local .....	38
7.3.2. Classificação de Sondagens e Seção Geológica .....	39
7.3.3. Mapeamentos das Frentes de Escavação .....	41
8. Classificação Geomecânica RMR nos Trechos Seleccionados.....	42
8.1. Estudo de Caso Nº 1 .....	43
8.2. Estudo de Caso Nº 2 .....	43
8.3. Estudo de Caso Nº 3 .....	44
9. Discussão dos Resultados .....	46
9.1. Aplicação do Sistema RMR em Rochas Brandas e Duras .....	46
9.2. Aplicação do Sistema RMR em Sondagens e em Superfícies de Escavação ..	49



10. Proposições Preliminares .....	51
11. Validação das Alternativas de Modificações .....	59
12. Conclusões.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Etapas do levantamento bibliográfico.....	4
Tabela 2: Principais classificações geomecânicas (BIENIAWSKI, 1989).....	5
Tabela 3: Índices característicos das principais classificações geomecânicas (SERRA, E. & OJIMA, L.M., 1998) .....	5
Tabela 4: Classificação geomecânica de Bieniawski – RMR (BIENIAWSKI, 1989). ..	12
Tabela 5: Classificação da condição das descontinuidades – RMR (BIENIAWSKI, 1989) .....	12
Tabela 6: Efeito da orientação das descontinuidades – RMR (BIENIAWSKI, 1989) ..	13
Tabela 7: Classes de maciço – RMR (BIENIAWSKI, 1989) .....	14
Tabela 8: Recomendações dos sistemas de contenção de maciços rochosos (BIENIAWSKI, 1976) .....	15
Tabela 9: Cronograma das atividades.....	22
Tabela 10: Agrupamento dos parâmetros usualmente utilizados em diversas classificações (VAZ, 1982) .....	24
Tabela 11: Porcentagem de influência dos parâmetros considerados no Sistema RMR.....	25
Tabela 12: Graus de coerência (GUIDICINI <i>et al.</i> , 1972) .....	26
Tabela 13: Estimativa de RCU com base na reação ao martelo para os grupos de rocha (VAZ, 1996) .....	27
Tabela 14: Definição dos trechos de estudo.....	42
Tabela 15: Classificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem (Arenito Aquidauana) .....	43
Tabela 16: Classificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem (Diabásio Serra Geral) .....	43
Tabela 17: Classificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem (Gnaisses do embasamento cristalino da Bacia São Paulo) .....	44
Tabela 18: Classificação Geomecânica RMR para as frentes de escavação (Gnaisses do embasamento cristalino da Bacia São Paulo) .....	45



Tabela 19: Resumo da classificação geomecânica nos testemunhos de sondagens dos estudos de caso 1 e 2.....	47
Tabela 20: Resumo das recomendações para contenção de maciços rochosos (BIENIAWSKI, 1989) .....	47
Tabela 21: Resumo da classificação geomecânica nos testemunhos de sondagens e frentes de escavação do estudo de caso 3.....	50
Tabela 22: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas ígneas (Alternativa 1).....	53
Tabela 23: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas brandas (Alternativa 1).....	54
Tabela 24: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas ígneas (Alternativa 2).....	56
Tabela 25: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas metamórficas duras (Alternativa 2).....	57
Tabela 26: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas brandas (Alternativa 2).....	58
Tabela 27: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 1.....	59
Tabela 28: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 2.....	59
Tabela 29: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 3.....	60
Tabela 30: Reclassificação Geomecânica RMR para as frentes de escavação do Estudo de Caso Nº 3.....	60
Tabela 31: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 1.....	60
Tabela 32: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 2.....	61
Tabela 33: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 3.....	61

Tabela 34: Reclassificação Geomecânica RMR para as frentes de escavação do Estudo de Caso Nº 3.....	61
Tabela 35: Resumo comparativo dos parâmetros considerados na classificação de Bieniawski e nas alternativas propostas.....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efeito da orientação do pólo da descontinuidade para a classificação RMR - Modificado por Francis (1991) <i>apud</i> Lins P.G. (2001).....	13
Figura 2: Relação entre vão livre e tempo de auto-sustentação (BIENIAWSKI, 1976) .....	14
Figura 3: Perfil de intemperismo para regiões tropicais (VAZ, 1996) .....	16
Figura 4: Planta de locação das sondagens SM-01 e SM-02 - (Escala 1:9300).....	30
Figura 5: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná adaptado por Milani <i>et. al.</i> (1993) .....	31
Figura 6: Seção geológico-geotécnica do estudo de caso nº 1 - (Escala Vertical 1:800 e Horizontal 1: 1850).....	33
Figura 7: Planta de locação das sondagens SM-03 e SM-04 - (Escala 1: 16000)...	34
Figura 8: Seção geológico-geotécnica do estudo de caso nº 2 - (Escala Vertical 1:800 e Horizontal 1: 3700) .....	36
Figura 9: Planta de locação das sondagens SM-05, SM-06 (Escala 1: 500) .....	37
Figura 10: Coluna litoestratigráfica da Bacia de São Paulo (RICCOMINI, 1989).....	39
Figura 11: Seção geológico-geotécnica do estudo de caso nº 3 - (Escala Vertical 1:200 e Horizontal 1: 500).....	40
Figura 12: Mapeamento da frente de escavação próximo à sondagem SM-05 – (Escala 1:100) .....	41
Figura 13: Mapeamento da frente de escavação próximo à sondagem SM-06 – (Escala 1:100).....	41



## LISTA DE ANEXOS

### ANEXOS – PARTE I

#### FIGURAS E TABELAS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Anexo 1: Classificação de Terzaghi – 1946 (HOEK E BROWN , 1980)

Anexo 2: Classificação de Lauffer – 1958 (OJIMA, 1982)

Anexo 3: Sistema proposto por Lauffer baseado no tempo de auto-sustentação para um certo vão de escavação livre (BIENIAWSKI ,1976)

Anexo 4: Procedimentos para a determinação do "*Rock Quality Designation – RQD*" (DEERE, 1964)

Anexo 5.1: Parâmetro A da classificação de Wickham – 1972 (REDONDO, 2003)

Anexo 5.2: Parâmetro B da classificação de Wickham – 1972 (REDONDO, 2003)

Anexo 5.3: Parâmetro C da classificação de Wickham – 1972 (REDONDO, 2003)

Anexo 6.1: Designação da qualidade de rocha de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.2: Índice das famílias de juntas "Jn" de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.3: Índice de rugosidade das juntas "Jr" de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.4: Grau de alteração das descontinuidades de rocha de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.5: Índice das condições hidrogeológicas "Jw" de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.6: Fator de redução de tensões "SRF" de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.7: Índice de segurança "ESR" para diferentes obras subterrâneas, de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 6.8: Classes de suporte definidas para o Sistema Q (BARTON, 1974)

Anexo 7: Classificação GSI – "*Geological Strength Index*" (HOEK, 2000)



## **ANEXOS – PARTE II**

### **CRITÉRIOS E TABELAS DA CLASSIFICAÇÃO DE SONDAGENS**

Anexo 8.1: Parâmetros para classificação de sondagens rotativas e a percussão

Anexo 8.2: (Continuação): Parâmetros para classificação de sondagens rotativas e a percussão

Anexo 9: Classificação da sondagem SM-01

Anexo 10: Classificação da sondagem SM-02

Anexo 11: Classificação da sondagem SM-03

Anexo 12: Classificação da sondagem SM-04

Anexo 13: Classificação da sondagem SM-05

Anexo 14: Classificação da sondagem SM-06

## **ANEXOS – PARTE III**

### **PERFIS DE SONDAGENS**

Anexo 15: Perfil da sondagem SM-01

Anexo 16: Perfil da sondagem SM-02

Anexo 17: Perfil da sondagem SM-03

Anexo 18: Perfil da sondagem SM-04

Anexo 19: Perfil da sondagem SM-05

Anexo 20: Perfil da sondagem SM-06

## **ANEXOS – PARTE IV**

### **FOTOS DOS TESTEMUNHOS E FRENTES DE ESCAVAÇÃO NOS TRECHOS SELECIONADOS PARA A APLICAÇÃO DO SISTEMA RMR**

Anexo 21: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-01 no trecho selecionado

Anexo 22: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-02 no trecho selecionado

Anexo 23: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-03 no trecho selecionado

Anexo 24: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-04 no trecho selecionado

Anexo 25: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-05 no trecho selecionado

Anexo 26: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-06 no trecho selecionado

Anexo 27: Fotos da frente de escavação na área da SM-05

Anexo 28: Foto da frente de escavação na área da SM-06



## RESUMO

Este trabalho consta de uma avaliação da classificação geomecânica RMR em diferentes tipos de maciços rochosos.

A análise da classificação de Bieniawski revela que o sistema não apresenta a quantificação adequada para o parâmetro RCU (Resistência à Compressão Uniaxial), enfatiza mais os parâmetros ligados às descontinuidades e não está adaptada para certos tipos litológicos.

Através de estudos de casos, com a aplicação da classificação em testemunhos de sondagens e, eventualmente, em frentes de escavação, verificou-se que para condições específicas, o Sistema RMR não traduz efetivamente as condições do maciço.

Dessa forma, foram avaliadas, conceitualmente, duas alternativas de modificação do Sistema RMR, levando em conta o tipo litológico e a alteração intempérica.

Ambas as propostas mostraram-se eficazes, sendo uma delas mais interessante devido à sua simplicidade e facilidade de utilização.

Em síntese, pode-se concluir que o Sistema RMR responde adequadamente para rochas duras, foliadas ou não, mas necessita adaptações quando utilizado em maciços rochosos brandos.

## ABSTRACT

This paper assesses the RMR geomechanical classification for different types of rock masses.

The analysis of the classification of Bieniawski shows that the system does not provide the proper quantification for the parameter uniaxial compressive strength, emphasize the discontinuities parameters and is not well adapted to some rock types.

Through case studies, with the classification in cores from borehole and excavation surfaces, it was found that for specific conditions, the RMR System do not effectively reflects rock mass properties.

Thus, two conceptual alternatives were proposed to change the RMR System, considering the rock type and weathering.

Both proposals have proved effective, however, one became more interesting due to the simplicity and ease of use.

In summary, RMR System responds adequately to hard rocks, with or without structures, but requires adjustments when used in weak rock masses.



## 1. Introdução

### 1.1. Considerações Iniciais

Os túneis e as obras subterrâneas têm adquirido importância crescente no planejamento e gestão do espaço, tanto em áreas urbanas como em obras lineares e de estocagem subterrânea.

A concepção, o projeto e a execução de um túnel é resultado da colaboração da Geologia de Engenharia com a Engenharia Civil, não sendo fácil caracterizar uma delimitação precisa entre essas áreas.

Segundo Ruiz, M.D. & Guidicini, G. (1998), a Geologia de Engenharia é um ramo aplicado da Geociências, que pode ser definida como *"a ciência dedicada à investigação, estudo e solução dos problemas de engenharia e meio ambiente, decorrentes da interação entre a Geologia e os trabalhos e atividades do homem, bem como à previsão e desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de acidentes geológicos"*, conceito este, expresso também nos estatutos da Associação Internacional de Geologia de Engenharia. Inerente a esse conceito, cabe à Geologia de Engenharia a caracterização e classificação dos maciços naturais, sejam rochosos ou terrosos.

A caracterização geológico-geotécnica compreende a descrição das propriedades e características do maciço, enquanto a classificação geomecânica organiza e hierarquiza essas características, a fim de dividir o maciço em um certo número de grupos ou classes, de modo que haja, direta ou indiretamente, uma previsão do comportamento geomecânico do maciço face às solicitações da obra.

Entre essas solicitações, no caso de obras subterrâneas em maciços rochosos, podemos ter: o método de escavação a ser utilizado; o avanço da escavação; a estimativa do tempo de auto-sustentação do maciço; a indicação dos tipos de sistemas de suporte e de revestimento final, entre outras.

Na literatura, existem inúmeras classificações geomecânicas para obras subterrâneas, no entanto, apenas duas são mais utilizadas atualmente:

- *Rock Mass Quality* ou *Q-System* (Q), elaborado em 1974 por Barton, Lien e Lunde, do *Norwegian Geotechnical Institute* (NGI), (BARTON et al., 1974);



- *Rock Mass Rating (RMR)*, elaborado em 1972-1973 por Bieniawski, do *Council for Scientific and Industrial Research (CSIR)* da África do Sul (BIENIAWSKI, 1973);

Entre essas classificações, o Sistema RMR é considerado o mais simples e de fácil utilização.

Para a elaboração do Sistema RMR, Bieniawski analisou mais de duas centenas de casos em obras subterrâneas, principalmente em países de clima temperado. Com o passar do tempo, o Sistema RMR foi sendo sucessivamente refinado, à medida que foi sendo incluído um maior número de casos. A versão mais atual e que será abordada neste trabalho é a de 1989.

Embora sejam adequadas em suas aplicações originais, especialmente para situações similares aos casos históricos para as quais foram desenvolvidas, considerável cautela deve ser exercida ao aplicar classificações de maciço rochoso, uma vez que as propriedades da rocha variam de um lugar para o outro (HOEK, 2000).

## **1.2. Justificativas**

A construção de obras subterrâneas exige um conhecimento aprofundado sobre as características dos maciços rochosos, para que não surjam situações imprevistas. Dessa forma, foi necessário o desenvolvimento de ferramentas, entre as quais se destacam as classificações geomecânicas, que possibilitam analisar e antecipar o comportamento do maciço.

Segundo Vaz (1982), o desenvolvimento de uma classificação universal tem sido procurado, porém sem sucesso. A classificação universal é dificultada pela heterogeneidade e anisotropia dos maciços rochosos, ainda sujeitos à variáveis de comportamento aleatório, tais como alteração diferencial, espessura e tipo de preenchimento, comportamento espacial de falhamentos, espessuras das zonas cisalhadas, etc.

Segundo Francis, F.O. & Rocha, H.C. (1998), devem ser diferenciadas as escavações subterrâneas em rochas brandas e duras. No primeiro caso, o comportamento geomecânico é mais influenciado pelas discontinuidades do que pelas características da rocha. Para as rochas brandas, a situação é oposta, sendo o



comportamento geomecânico condicionado, principalmente, pela resistência do maciço.

Uma adequada classificação geomecânica, habilita a definição de processos de construção mais econômicos e mais seguros, e também tipologias de suporte provisório e definitivo, evitando-se assim, gastos desnecessários, atrasos na obra e eventuais acidentes.

Cabe aqui lembrar que, o tempo gasto na adequada caracterização e classificação de um maciço rochoso, é muito inferior ao gasto em soluções para situações não previstas, que podem ocorrer no decorrer das escavações. Além disso, os custos financeiros são insignificantes em comparação ao custo da obra e a eventuais prejuízos, quer pessoais e/ou materiais, causados por acidentes.

## **2. Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma análise crítica do Sistema RMR de classificação geomecânica de maciços rochosos e propor adaptações, com o intuito de torná-lo mais representativo das características de maciços rochosos constituído por rochas brandas e sob efeito de alteração intempérica.

## **3. Trabalhos Prévios**

O levantamento bibliográfico foi realizado em quatro etapas como descrito abaixo e na Tabela 1.

- A primeira etapa do levantamento bibliográfico referiu-se à evolução dos diversos sistemas de classificação de maciços rochosos, a fim de fornecer um panorama histórico geral sobre o assunto.
- A segunda etapa abordou especificamente o Sistema RMR. Para essa fase, foram reunidos os artigos publicados por Bieniawski com a finalidade de se entender o método de classificação desenvolvido por ele.
- A terceira etapa do levantamento bibliográfico concentrou-se na descrição do maciço rochoso, no tocante à alteração intempérica.



- A quarta e última etapa do levantamento bibliográfico consistiu em artigos relacionados à elaboração e adaptações de classificações.

Tabela 1: Etapas do levantamento bibliográfico

Etapa 1	Artigos que relatam a evolução dos sistemas de classificação de maciços rochosos
Etapa 2	Artigos do próprio autor, Bieniawski, com as explanações sobre o método de classificação desenvolvido
Etapa 3	Artigos que concentram-se na descrição do maciço rochoso, no tocante à alteração intempérica
Etapa 4	Artigos que discorram sobre a elaboração e adaptações das classificações

### **3.1. Evolução dos Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos**

A elaboração de classificações geomecânicas tem sido recorrentes desde a década de 40 em consequência ao grande número de construção de obras subterrâneas e, também, do reconhecimento da importância de certos fatores anteriormente não considerados.

Originalmente, as classificações foram concebidas exclusivamente para aplicações em obras subterrâneas, embora atualmente, sejam utilizadas para diversos fins, sem a perda do vínculo com os objetivos originais.

A Tabela 2 apresenta uma lista das principais classificações geomecânicas para obras subterrâneas, com comentários que ilustram a evolução dos sistemas de classificação. A Tabela 3 mostra os índices característicos pertinentes às diversas classificações disponíveis.



Tabela 2: Principais classificações geomecânicas (BIENIAWSKI, 1989)

Classificação	Autor e Data	Origem	Aplicações Originais	Observações
Carga de rocha	Terzaghi (1946)	EUA	Túneis com suportes metálicos	Amplo emprego nos EUA por 40 anos; inadequada para os métodos modernos de execução de túneis (ancoragens e concreto projetado);
Tempo de auto-sustentação	Lauffer (1958)	Áustria	Túneis	Introduziu o conceito de vãos livres sem suporte e seu tempo de auto-sustentação, em função da qualidade de maciço; muito conservadora para aplicação nos métodos;
RQD	Deere <i>et. al.</i> (1967)	EUA	Descrição de testemunhos e túneis	Simples descrição das condições dos testemunhos de sondagens rotativas; parte integrante dos sistemas modernos de classificação; não considera condição de superfície de juntas e materiais de preenchimento; muito sensível aos efeitos de orientação dos testemunhos;
RSR	Wickham <i>et. al.</i> (1972)	EUA	Túneis com suportes metálicos	Introduziu as avaliações numéricas e ponderações para correlacionar a qualidade do maciço com dimensões das escavações e suportes necessários; base para os sistemas subsequentes mais empregados do nível internacional;
Sistema RMR	Bieniawski (1973)	África do Sul	Túneis e minas	Evolução dos sistemas anteriores; amplamente alterado em relação a versão original; desenvolvido com base em 49 casos históricos. Versão atualizada conta com 268 casos reais (BIENIAWSKI, 1989);
Sistema Q	Barton <i>et. al.</i> (1974)	Noruega	Túneis e cavidades amplas	Baseado no método do RQD; introdução de quatro parâmetros adicionais: número e condição das juntas, condição de água subterrânea, tensões nas vizinhanças da escavação; desenvolvido com base em mais de 200 casos reais;

Tabela 3: Índices característicos das principais classificações geomecânicas (SERRA, E. & OJIMA, L.M., 1998)

Índices característicos	Terzaghi (1946)	Lauffer (1958)	Deere <i>et. al.</i> (1967)	Wickham <i>et. al.</i> (1972)	Bieniawski (1973)	Barton <i>et. al.</i> (1974)
I- Rocha						
litologia				x		
estrutura	x	x		x		
grau de alteração	x	x		x		x
minerais expansivos	x	x	x			x
resistência		x		x	x	x
II- Descontinuidades						
orientação				x	x	
espaçamento	x	x	x	x	x	x
rugosidades das paredes					x	x
alteração das paredes				x	x	x
abertura				x	x	x
preenchimento					x	x
número de famílias						x
III- Maciço Rochoso						
RQD			x		x	x
velocidade de ondas elásticas						
água	x	x		x	x	x
tensões "in situ"	x	x	x			x
IV- Métodos Construtivos						
(recomendações de procedimento)	sim	não	sim	não	sim	sim
Número total de índices	6	7	4	9	9	12
Índices relativos à descontinuidades	1	1	1	4	6	6



A primeira referência ao uso de classificação de maciço rochoso foi feita por Terzaghi em 1946, citado em Hoek & Brown (1980), para o qual se definia o espaçamento de cambotas em rocha sã com graus variáveis de fraturamento. Terzaghi considerou a estrutura da descontinuidade do maciço rochoso, ordenando-os qualitativamente em nove categorias, indicando para cada classe, a solicitação do maciço e o suporte mais adequado, sendo que a natureza do suporte restringia-se apenas a cambotas metálicas (Anexo 1 – Parte I).

Segundo Vaz (1982), a proposta de Terzaghi, não pode ser considerada um sistema de classificação, por ser demasiada específica e limitada. Entretanto, seu sucesso foi enorme, uma vez que, em conexão, Terzaghi estabeleceu as bases para o cálculo de estabilidade de obras subterrâneas, até hoje ainda utilizadas.

Cecil (1970) *apud* Bieniawski (1989), chega à conclusão de que a classificação de Terzaghi, em geral, permitia uma evolução objetiva da qualidade da rocha, mas não fornecia nenhuma informação quantitativa referente às propriedades do maciço rochoso.

Lauffer, encontrado em Ojima (1982), considerou uma classificação com quatro grupos principais, que podem ser subdivididos e relacionados com os suportes provisórios: rocha estável, rocha frágil, rocha friável e rocha sujeita à grandes pressões (Anexo 2 – Parte I).

Outro aspecto de considerável importância é que Lauffer propôs um sistema baseado no tempo de auto-sustentação para um certo vão de escavação livre, relacionando-o com a qualidade do maciço rochoso do espaço escavado (Anexo 3 – Parte I).

Lauffer baseou-se no trabalho "Geologia de Túnel" escrito por Stini *apud* Bieniawski (1989), considerado o pai da "Escola Austríaca" de túneis e da mecânica de rochas. Stini enfatizava a importância dos defeitos na estrutura do maciço rochoso.

A classificação original de Lauffer sofreu inúmeras modificações no decorrer dos anos, propostas por engenheiros austríacos, notavelmente por Pacher *et al.* (1974) *apud* Redondo (2003), que conduziu ao desenvolvimento do "New Austrian Tunneling Method" (NATM), introduzindo o conceito de Lauffer nesse método de escavação.

O NATM foi originalmente concebido para rochas brandas, considerando que parte dos esforços produzidos pela escavação do túnel é absorvido pelo maciço, redistribuindo e reduzindo as tensões induzidas pela escavação (FRANCIS, F.O. & ROCHA, H.C., 1998)



Outras informações sobre o método NATM, que influenciaram o desenvolvimento dos mais recentes sistemas de classificação de maciços rochosos, dentre eles o RQD, podem ser encontradas em Bieniawski (1989) e Hoek (2000).

Em 1964, Deere introduz o conceito de "*Rock Quality Designation*" (RQD), além de definir classes de maciço em função dos valores de RQD.

Com o intuito de fornecer uma avaliação quantitativa da qualidade do maciço rochoso, a partir de testemunhos obtidos por sondagens rotativas, o RQD é definido como o percentual de segmentos intactos de rocha com comprimento superior a 10 cm, em relação ao comprimento total da perfuração ou trecho considerado (Anexo 4 – Parte I).

Até então, os métodos tradicionais para classificar e projetar túneis em rocha eram os métodos empíricos de Terzaghi e Lauffer. Com isso, o RQD, apresentado como índice de qualidade não subjetivo e quantitativo, teve grande aceitação no meio técnico, sendo utilizado por muito tempo como índice para nortear projetos de revestimento de túneis em rocha.

Segundo Assis (2001), o RQD busca representar a qualidade da rocha, a partir do exame dos testemunhos de sondagem, motivo pela qual o processo de amostragem, a perfuração e o manuseio das amostras devem ser cuidadosos.

Embora o RQD seja um índice simples e barato, não é suficiente para produzir uma descrição adequada do maciço rochoso quando considerado sozinho, por não considerar a orientação das descontinuidades e suas características, tais como preenchimento e alteração. Essencialmente, este é um parâmetro prático, baseado na medida de intervalos de testemunhos de rocha em um furo de sondagem (DEERE, D.U. & DEERE, D.W., 1988).

Em 1972, Wickham apresenta uma classificação com vistas à previsão do suporte e à definição do revestimento necessário em túneis, baseando-se num conceito chamado RSR – "*Rock Structure Rating*". O valor de RSR de um dado maciço é obtido a partir da quantificação de três parâmetros A, B e C.

O parâmetro A é um parâmetro geológico, B um parâmetro geométrico, com o efeito das descontinuidades em relação ao provável eixo do túnel e C, um parâmetro que considera o efeito da água subterrânea com relação às condições das descontinuidades (REDONDO, 2003) - (Anexos 5.1 a 5.3 – Parte I).

A somatória dos valores parciais de A, B e C fornece um valor de RSR cujo máximo é 100.



Para a previsão do suporte, o autor estudou projetos de túneis, verificando as características geológicas, dimensões do túnel, métodos de escavação, suportes utilizados e outras informações pertinentes. Estabeleceu um índice RR, que representa a relação entre o espaçamento teórico calculado para um determinado perfil de uma cambota e o espaçamento utilizado nos túneis estudados, multiplicados por 100 (OJIMA, 1982).

Baseado nos casos estudados, o autor correlacionou o valor RSR com o índice RR. Aos índices RR variando de 0 a 100 correspondem valores de RSR de 80 a 19, que indicam os limites superior e inferior dos tipos de maciços considerados. Desde que o índice RR está relacionado com a solicitação exercida pelo maciço, o valor RSR também pode ser expresso em termos daquela solicitação, por vários diâmetros de túneis. Segundo Ojima (1982), embora essa classificação tivesse sido inicialmente elaborada para revestimentos com cambotas metálicas, pode ser estendida ao uso de ancoragens e concreto projetado.

Embora não seja muito utilizada, o trabalho de Wickham *et al.* (1972) foi muito significativo para o desenvolvimento das duas classificações mais utilizadas atualmente, RMR e Q.

Barton *et al.* (1974) propôs um índice denominado "*Tunnelling Quality*" (Anexos 6.1 a 6.8 – Parte I), para a determinação das características do maciço rochoso e o suporte requerido. Os parâmetros considerados em sua classificação são os seguintes:

RQD – Índice de qualidade de rocha;

Jn – Índice de influência do número de famílias de fraturas;

Jr – Índice de rugosidade das fraturas;

Ja – Índice de alteração das paredes de fraturas;

Jw – Índice de influência da ação da água subterrânea;

SRF – Índice de influência do estado de tensões do maciço;

A qualidade do maciço rochoso é obtida a partir do produto dos três seguintes quocientes, que serão utilizados na Expressão 1.



RQD/Jn – dimensões dos blocos;

Jr/Ja – resistência ao cisalhamento entre blocos;

Jw/SRF – tensão existente nos maciços rochosos;

Expressão 1: 
$$Q = (RQD/Jn) \times (Jr/Ja) \times (Jw/SRF)$$

O valor de Q pode variar entre 0,001 e 1000, sendo o maciço classificado em nove classes. A classificação apresenta ainda um método empírico de estimar a carga e 38 categorias de suporte, conforme o índice Q e as dimensões da obra. A natureza do suporte varia desde ancoragens ocasionais até concreto moldado com reforço de armação, tendo como termos intermediários, o concreto projetado com ou sem malha metálica.

Tanto a classificação de Barton como a de Bieniawski são amplamente utilizadas. Ambos os métodos, incluem parâmetros geológicos, geométricos e de projetos em engenharia, na obtenção de um valor quantitativo, de modo que descreveriam a qualidade geomecânica do maciço estudado. No entanto, segundo Assis (2001), o Sistema Q não considera a orientação das descontinuidades com respeito à obra.

De acordo com Vaz (1982), por ser muito detalhada, a classificação de Barton é mais difícil de manusear e conseqüentemente, pouco prática. Bieniawski apresentou um sistema mais simples e acessível, que teve grande aceitação.

Bieniawski iniciou a elaboração do sistema *Rock Mass Rating* (RMR) durante os anos de 1972 e 1973 (BIENIAWSKI, 1973). Mas é em 1976, que ele faz, com pormenores, a publicação de "*Rock Mass Classification in Rock Engineering*", tendo por base uma vasta experiência colhida em obras subterrâneas (BIENIAWSKI, 1976).

Com o passar do tempo, novas informações foram adicionadas ao Sistema RMR, com significativas mudanças resultantes da análise de um maior número de casos práticos. A última versão foi apresentada por Bieniawski em 1989.

Em resumo, segundo Oliveira (2000), a classificação geomecânica de Bieniawski é realizada mediante a atribuição de pesos a cada um dos seis parâmetros escolhidos como critérios de classificação.

A soma dos pesos, cujo valor máximo é 100, constitui um índice, usualmente designado RMR, que corresponde a uma das cinco classes de qualidade de maciço.



Utilizando-se um ábaco com as classes de maciço em conjugação com o tamanho da seção de escavação do túnel, é obtido o período de estabilidade sem suporte, isto é, o maior período além do qual haverá colapso se não forem colocados suportes primários. Este tipo de ábaco foi preconizado pela primeira vez por Lauffer.

Ainda em relação a cada classe, é feita uma estimativa da coesão e ângulo de atrito do maciço e, também, apresentados os tipos de suportes primários que podem ser utilizados.

Bieniawski (1976), após analisar 111 casos históricos de túneis em diferentes países, sendo 62 na Escandinávia, 28 na África do Sul e 21 nos Estados Unidos, Canadá e Austrália, propôs uma correlação entre os sistemas de classificação geomecânica RMR e Q. Surgiram com o tempo, novas correlações, baseadas nessa primeira, podendo ser encontradas em Bieniawski (1989).

Hoek (1980) apresentou o Sistema GSI – "*Geological Strength Index*" destinado a avaliar a resistência de maciços fraturados. O autor considera que, neste caso, além da resistência dos blocos que constituem o maciço, o comportamento geomecânico é controlado pelas condições de superfície (rugosidade, alteração, etc) das fraturas. Trata-se, portanto, de um índice específico para maciços fraturados, que pode ser facilmente obtido no campo ou então por correlação com o sistema RMR (Anexo 7 – Parte I).

Segundo Assis (2001), convém observar que, a utilização dessas correlações entre sistemas de classificação geomecânica deve ser feita com precaução, pois os parâmetros adotados e a maneira como os mesmos são combinados para chegar ao resultado diferem caso a caso. Além disso, os significados geomecânicos e geotécnicos de classes homônimas pertencentes a sistemas distintos não são necessariamente correspondentes.

### **3.2. O Sistema RMR**

O Sistema de Classificação Geomecânica RMR, segundo Bieniawski (1989), tem por objetivo:

- Caracterizar os parâmetros condicionantes do comportamento dos maciços rochosos;



- Compartmentar uma formação rochosa em classes de maciço com qualidades distintas;
- Fornecer parâmetros para a compreensão das características de cada classe de maciço;
- Prover dados quantitativos para o projeto geomecânico;
- Servir como referência à comunicação de dados na própria obra e obras distintas.

A classificação é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros que Bieniawski considerou contribuir mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos. A somatória dos pesos atribuídos a cada um dos parâmetros constitui um índice, usualmente designado por RMR, ao qual corresponde a uma das cinco classes de qualidade de maciços. Os parâmetros utilizados estão listados a seguir:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. RQD ("*Rock Quality Designation*");
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Influência da água;
6. Orientação relativa das descontinuidades/escavação.

A Tabela 4 permite determinar os pesos relativos aos cinco primeiros parâmetros considerados. O peso relativo à condição das descontinuidades (parâmetro 4) pode ser determinado através da Tabela 5, se houver a possibilidade de se realizar uma caracterização detalhada das descontinuidades. Neste caso, o valor do peso é determinado através da soma dos cinco parâmetros característicos referidos nesta tabela. No caso de não haver dados suficientes para utilizar essa tabela, deverá ser escolhida uma descrição na Tabela 5 mais próxima da realidade.

A orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação (parâmetro 6) traduz-se em um peso que constitui um fator corretor da somatória e é



determinado através da Tabela 6. Esse peso pode também ser obtido com o auxílio da Figura 1, proposta por Francis (1991) *apud* Lins, P. G. (2001).

A Figura 1 mostra um diagrama que permite, tendo-se a projeção do pólo, auxiliar na determinação da importância da orientação relativa no sistema RMR. O diagrama foi elaborado tendo em vista um túnel escavado no sentido Oeste para Leste. Para túneis escavados com outros sentidos, o diagrama deverá ser rotacionado.

Tabela 4: Classificação geomecânica de Bieniawski – RMR (BIENIAWSKI, 1989)

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Carga Puntiforme	>10 MPa	4-10MPa	2-4MPa	1-2MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 5)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm		
	Pesos		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento de túnel	nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relação pressão de água x tensão principal máxima	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	completamente seco	água intersticial	úmido	gotejamento	fluxo abundante		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Tabela 5: Classificação da condição das descontinuidades – RMR (BIENIAWSKI, 1989)

Comprimento da descontinuidades (persistência)	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1m	0,1 - 1,0m	1-5m	>5m
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro <5mm	Duro >5mm	Mole <5mm	Mole >5mm
Peso	6	4	2	2	0
Alteração	Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0



Tabela 6: Efeito da orientação das descontinuidades – RMR (BIENIAWSKI, 1989)

Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°		
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°			
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°					
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável		
Orientação das descontinuidades				Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas		0	-2	-5	-10	-12	
	Fundações		0	-2	-7	-15	-25	
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60	

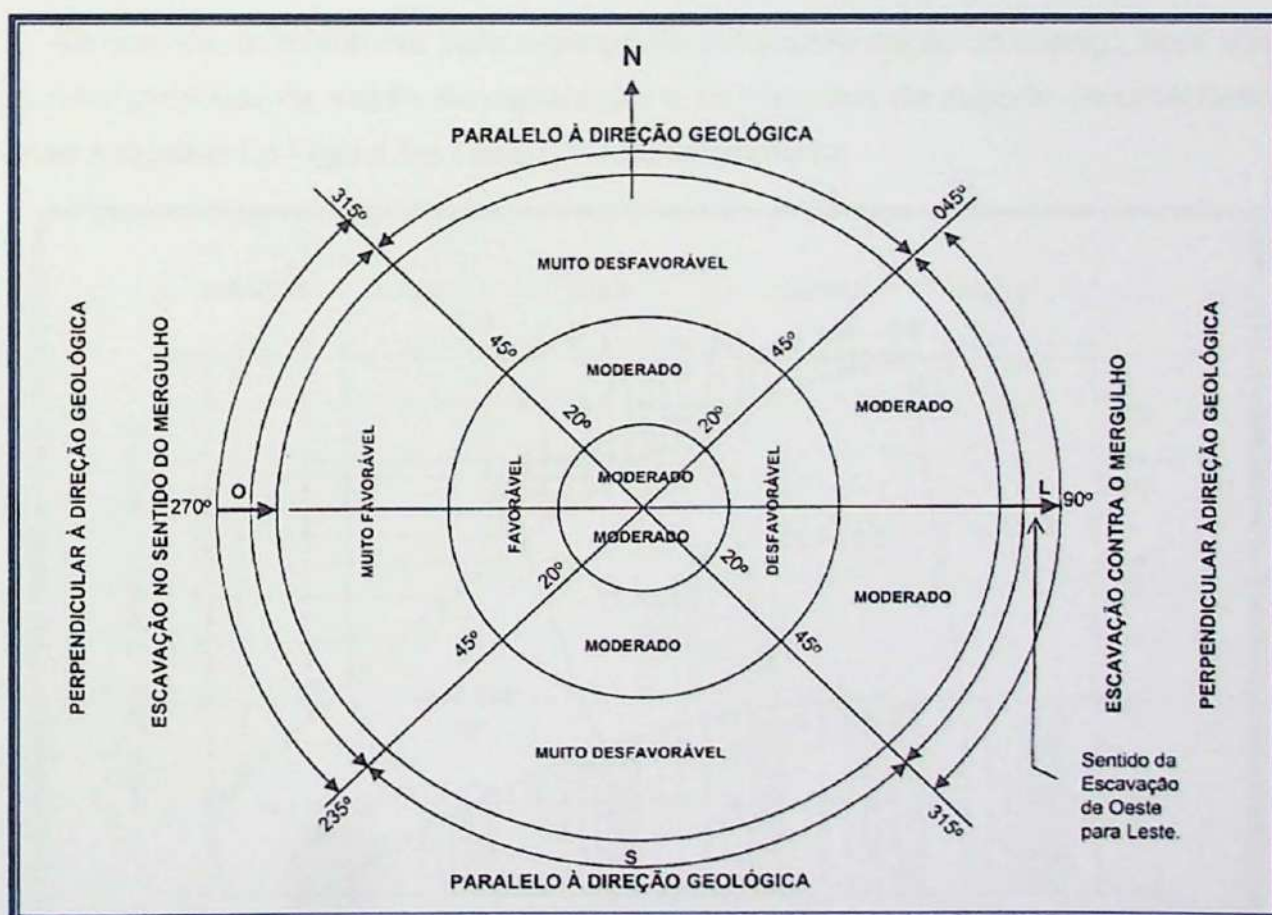


Figura 1: Efeito da orientação do pólo da descontinuidade para a classificação RMR - Modificado por Francis (1991) *apud* Lins P.G. (2001).



A Tabela 7 classifica o maciço rochoso em cinco classes de acordo com o valor do índice RMR, dando ainda indicações do tempo médio de auto-sustentação para vãos não revestidos em túneis. São também fornecidas estimativas relativas às características resistentes do maciço rochoso, nomeadamente, a coesão e o ângulo de atrito.

Tabela 7: Classes de maciço – RMR (BIENIAWSKI, 1989)

Peso total	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio sem suporte	20 anos para 15m de vão	1 ano para 10m de vão	1 semana para 5m de vão	10 horas para 2,5m de vão	30 minutos para 1m de vão
Coesão da massa rochosa (KPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Os valores de referência para o tempo de auto-sustentação do maciço, bem como as características da seção de escavação e os métodos de suporte recomendados, estão indicados na Figura 2 e Tabela 8, respectivamente.

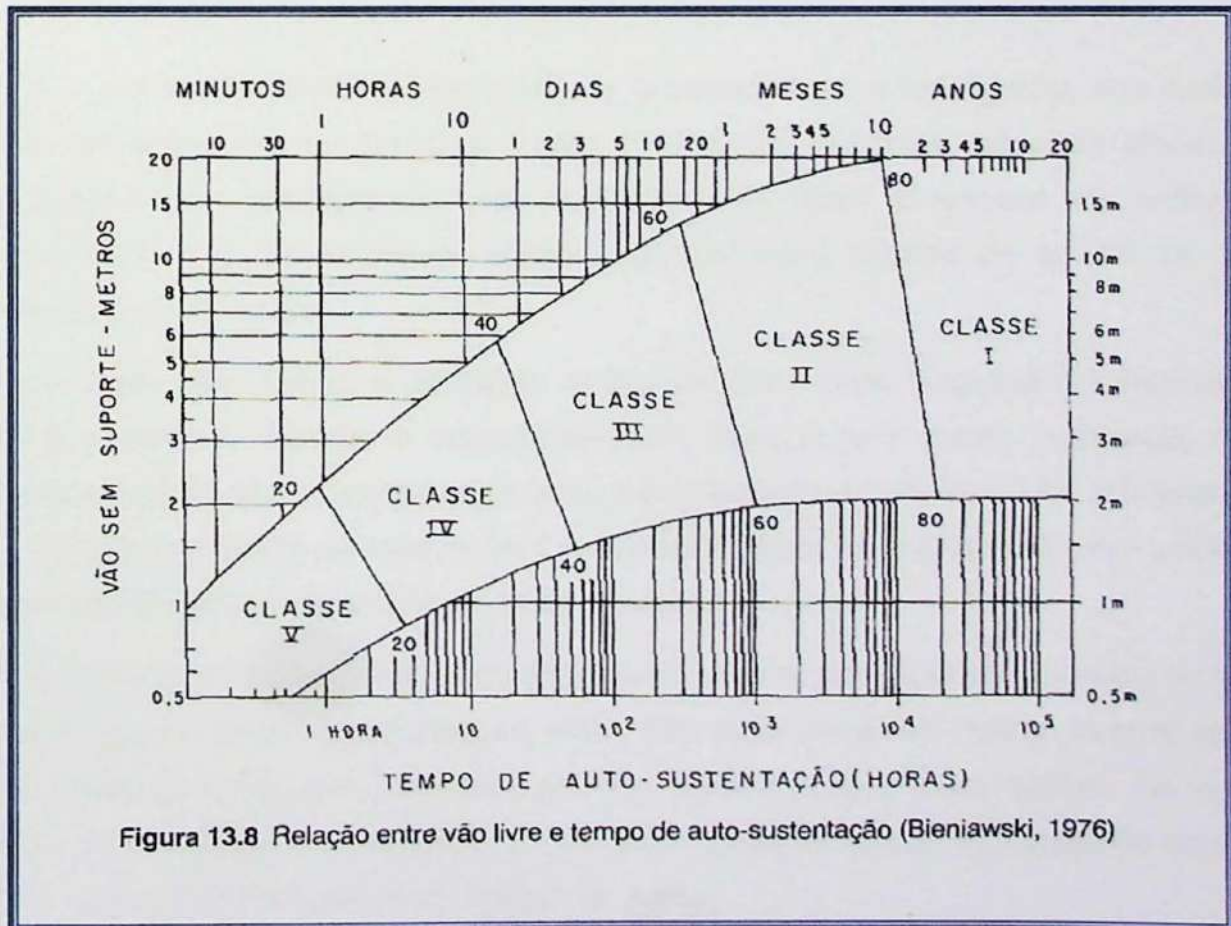


Figura 2: Relação entre vão livre e tempo de auto-sustentação (BIENIAWSKI, 1976)



Tabela 8: Recomendações dos sistemas de contenção de maciços rochosos (BIENIAWSKI, 1976)

Classe Geomecânica RMR	Escavação	Ancoragens	Suporte (concreto projetado)	Cambotas
81 a 100	Seção Total; 3m de avanço	Geralmente não requer suporte com a exceção de ancoragens ocasionais		
61 a 80	Seção total; 1 a 1,5m de avanço; suporte completo a 20m da frente	Ancoragens com 3m de comprimento, espaçadas de 2,5m, ocasionalmente com malha em certas zonas do teto	50mm no teto quando necessário	Nenhum
41 a 60	Seção parcial (frente e rebaixo); 1,5 a 3m de avanço, início do suporte após cada fogo; suporte completo a 10m	Ancoragens sistemáticas com 4m de comprimento espaçadas de 2m nas paredes e tetos, com malha no teto	50 a 100mm no teto e 30mm nas paredes	Nenhum
21 a 40	Seção parcial (frente e rebaixo); 1 a 1,5m de avanço, instalação do suporte concomitantemente com a escavação	Ancoragens sistemáticas com 4 a 5m de comprimento, espaçadas de 1 a 1,5m com malha no teto e paredes	100 a 200mm no teto e 100mm nas paredes	Cambotas leves espaçadas de 1,5m
<20	Seções múltiplas; 0,5 a 1,5m de avanço; instalação do suporte concomitantemente com a escavação; concreto projetado logo após o fogo	Ancoragens sistemáticas com 5 a 6m de comprimento, espaçadas de 1 a 1,5m com malha no teto e paredes. Ancoragem na soleira	150 a 250mm no teto e 150mm nas paredes	Cambotas médias a pesadas de 0,75m. Fechamento na soleira

### 3.3. O Maciço Rochoso e a Alteração Intempérica

A maioria dos perfis de intemperismo apresentados na bibliografia, dos quais o mais conhecido é o de Deere e Patton (1971) são definidos utilizando processos pedogênicos ou intempéricos nos horizontes de solo; processos de alteração mineralógica nos horizontes de rocha e porcentagem relativa de solo/rocha, nos horizontes de transição.

Segundo Vaz (1996), a utilização desses critérios torna subjetiva a identificação dos horizontes e dificulta a reprodutibilidade. Para reduzir esses problemas, Vaz propõe um perfil de intemperismo padrão, cujos horizontes principais são definidos em função dos processos de escavação e perfuração. Esse perfil (Figura 3) será adotado neste trabalho para a descrição do grau de alteração da rocha.

Nota-se que os horizontes estão identificados por siglas e por classes para facilitar o emprego em perfis de sondagens. Além dos solos residuais podem ocorrer solos transportados, como por exemplo, aluvião, colúvio, tálus, entre outros. Os solos transportados também devem ser identificados e caracterizados, com o auxílio de uma análise das condições geomorfológicas da região.



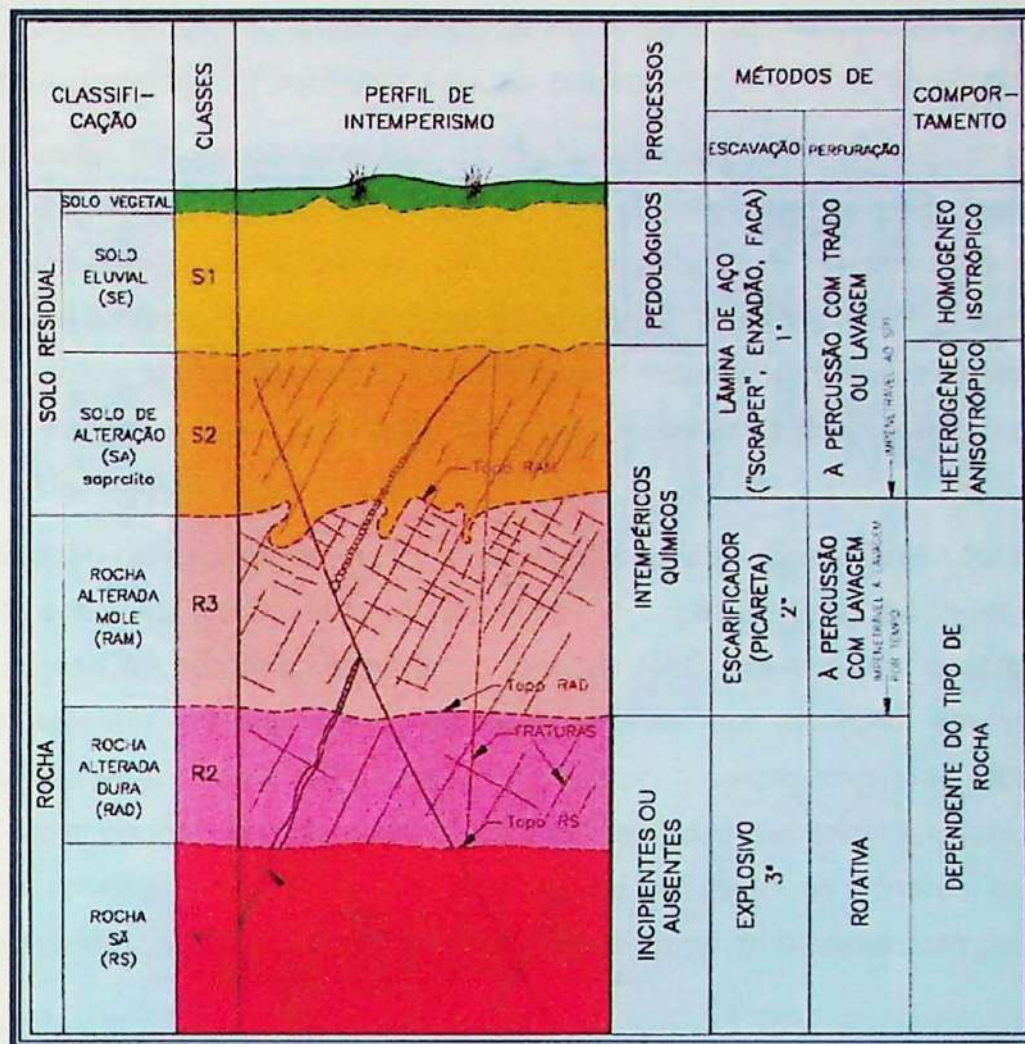


Figura 3: Perfil de intemperismo para regiões tropicais (VAZ, 1996)

O horizonte S1 foi chamado de solo eluvial (SE) para caracterizar a camada superficial do solo residual cuja diferenciação foi feita através de processos pedogenéticos. Este mesmo horizonte foi chamado por outros autores de solo residual maduro ou de solo laterítico. Em geral, o solo eluvial é homogêneo em relação a cor, granulometria e composição mineralógica. Pode apresentar alguma heterogeneidade, em função da evolução pedogênica, porém, para obras civis, seu comportamento será de um material homogêneo e isotrópico.

O horizonte S2, denominado solo de alteração (SA), caracteriza a camada que ainda se encontra em processo de alteração intempérica, onde os processos pedogênicos são incipientes ou muito limitados. O solo de alteração é sempre heterogêneo em relação à cor, textura e composição mineralógica, pois é decorrência da disposição original da rocha matriz. Estruturas presentes na rocha encontram-se preservadas no solo de alteração.



Três horizontes de rocha são identificáveis a partir dos respectivos processos de escavação e perfuração. Posteriormente, as zonas de transição serão abordadas.

O horizonte R3 foi denominado de rocha alterada mole (RAM), uma vez que somente pode ser escavado, manualmente, com picareta ou com o bico do martelo de geólogo, ou então, mecanicamente, com escarificador. Nas sondagens à percussão, esse material é perfurado pelo processo de lavagem. Quando o perfil de intemperismo é muito evoluído, a espessura de RAM pode ser superior a 10m. Os minerais, nesse horizonte, encontram-se fortemente alterados e descoloridos, sendo incipiente a transformação para minerais de solo.

A utilização de explosivos marca a separação entre rocha alterada mole (RAM) e rocha alterada dura (RAD). Nas rochas duras, o impenetrável à lavagem por tempo das sondagens à percussão identifica o topo de RAD. No entanto, esse critério não deve ser aplicado isoladamente, pois pode ocorrer, por exemplo, um matacão de rocha sã num horizonte de solo. Dessa forma, para a determinação do topo de rocha alterada dura podem ser necessários outros métodos de investigação, tais como sondagens rotativas e sísmicas. Em geral, nesse horizonte, os minerais apresentam-se levemente descoloridos, mais notavelmente ao longo de fraturas com passagem de água.

A distinção entre rocha alterada dura (RAD) e rocha sã (RS) é feita através da alteração mineralógica já que os processos de escavação com explosivo e de perfuração com rotativa são os mesmos para ambos os tipos. O horizonte RS apresenta minerais sãos ou praticamente sãos, com suas cores e resistências originais ou pouco afetadas.

Segundo Vaz (1996), as zonas de transição estão presentes em todas as interfaces dos horizontes do perfil de intemperismo. Porém, na maioria das vezes, essas zonas de transição são pouco espessas e, para efeitos práticos, não necessitam ser individualizadas. Em casos, menos usuais, o contato entre os horizontes é brusco. A exceção ocorre na interface RAM e RAD, onde são freqüentes zonas de transição mais espessas, muitas vezes contendo matacões e intercalações de materiais em diferentes estágios de alteração, principalmente quando se tratam de rochas duras.

Essas zonas ocorrem em perfis de intemperismo pouco evoluídos, seja devido à rápida denundação em terrenos sujeitos à erosão acentuada, seja devido à redução do efeito do intemperismo químico, em climas secos ou frios. Nesses casos, o horizonte de RAM pode estar ausente ou inexpressivo, sendo substituído por uma zona de contatos muito irregulares, constituída por matacões e blocos de rocha "in



*situ*", imersos em solo (SA) ou por zonas de solo entremeadas na rocha, que pode apresentar-se como RAM, RAD ou RS.

As zonas de transição também ocorrem em rochas duras, com fraturamento ou xistosidade subverticais, quando a alteração fica condicionada por essas estruturas e o topo rochoso torna-se muito irregular, com aspecto serrilhado pela alternância de zonas verticais de solo de alteração e rocha em diferentes estágios de alteração.

De acordo com Prestes *et al.* (1994) *apud* Vaz (1996), fraturas de alívio também podem condicionar a alteração e promover o aparecimento de zonas de transição, neste caso, abaixo do topo de RAD.

No caso de rochas brandas, mesmo em perfis de intemperismo pouco evoluídos, zonas de transição com solo e rocha, geralmente não ocorrem. Entretanto, nessas rochas o topo de rocha alterada dura não pode ser fixado pelo impenetrável à lavagem por tempo. A ação da água de circulação, somada à torção da ferramenta de lavagem, provoca a desagregação da RAD, fazendo com que a sondagem avance abaixo do topo de RAD. Neste caso, recomenda-se que a perfuração seja interrompida no impenetrável ao SPT, prosseguindo com a perfuração rotativa, com os cuidados usuais para a recuperação de rochas moles.

Nas zonas de transição com solo e matacões, a separação dos horizontes através do critério do método de perfuração não é aplicável, pois os matacões e blocos de rocha podem interromper o processo de lavagem por tempo que define o topo de RAD. Entretanto, o critério do processo de escavação permanece utilizável uma vez que, parte da zona de transição, com matacões e blocos menores, pode ser removida com escarificação e parte somente com explosivos. O emprego de sondagens rotativas também permitirá identificar e caracterizar as zonas de transição.

As zonas de transição, quando forem espessas ou apresentarem interesse específico, devem ser tratadas como feições discretas, cuja sistemática de caracterização dependerá da finalidade dos estudos. Em geral, o procedimento utilizado para a caracterização das zonas de transição baseia-se na identificação da porcentagem relativa de solo e rocha e no tamanho dos matacões ou blocos de rocha.



### **3.4. A Elaboração de uma Classificação**

Sabe-se que a aplicação do sistema de classificação deve ser adaptada à cada fase da obra, ou seja, às investigações disponíveis em cada etapa. De um modo geral, a elaboração de uma classificação segundo Serra, E. & Ojima, L.M. (1998), deve contemplar os seguintes requisitos:

- Objetividade, o critério adotado deve ter apenas um significado;
- Confiabilidade, fornecer dados verificáveis e reproduzíveis dentro de uma margem de erro aceitável;
- Validade, os dados devem ser compatíveis com aqueles obtidos por algum outro método independente;
- Sensitividade, o método deve reproduzir diferenciações mensuráveis em unidade compatível com a natureza do fenômeno e
- Utilidade e simplicidade operacional.

De acordo com Ojima (1982), a análise detalhada das classificações existentes sempre permite apontar alguma deficiência. Mesmo quando elaboradas a partir de banco de dados extensos, como é o caso dos Sistemas RMR e Q, essas deficiências persistem. Os próprios autores dessas e de outras classificações sempre recomendam a utilização simultânea de dois sistemas.

A razão para esse comportamento está associada à variabilidade dos maciços rochosos cujo comportamento depende da rocha matriz e das descontinuidades, além de elementos discretos, como falhas e contatos. No caso de climas tropicais, a maior intensidade da alteração mineralógica introduz um efeito adicional na variabilidade dos maciços.

Por esse motivo, alguns autores recomendam adaptações nas classificações existentes para cada tipo de maciço de forma a reduzir o nível de incerteza na sua aplicação.



## **4. Materiais e Métodos**

Os parâmetros considerados nas diversas classificações existentes foram dispostos em tabelas para a visualização das informações. Nesta etapa, foram também identificados na bibliografia especializada, artigos contendo uma descrição satisfatória do maciço rochoso, em particular, no tocante à alteração intempérica.

As atividades práticas basearam-se na classificação dos testemunhos de sondagens para a elaboração de perfis de sondagens (Anexo – Parte III) e seções geológicas e, principalmente, na aplicação do sistema RMR para os trechos de interesse, ou seja, na área de influência do túnel.

Os testemunhos foram selecionados de modo que fossem representativos de tipos litológicos disponíveis nos arquivos de empresas de perfuração e de proprietários de obras.

Dessa forma, foram estudados três casos, constituído por arenito no estudo de caso nº 1, diabásio no estudo de caso nº 2 e gnaiss no estudo de caso nº 3.

A aplicação do sistema foi realizada juntamente com uma minuciosa classificação dos graus de alteração intempérica. Os testemunhos de sondagem foram documentados por meio de fotografias.

No estudo de caso nº 3 foi possível utilizar testemunhos de sondagens provenientes de obras subterrâneas executadas, no qual foi comparada a classificação obtida nas sondagens com aquela encontrada nos mapeamentos das frentes de escavação.

A análise dos resultados permitiu a identificação de anomalias e a realização de análises críticas do sistema de classificação. A partir daí, iniciou-se o processo de proposições preliminares de adaptações na classificação geomecânica RMR.

Após a análise e a incorporação das adaptações, as alternativas conceituais de classificação geomecânica foram validadas nos mesmos casos estudados.

Todas as informações e os dados coletados foram documentados e arquivados.

## **5. Desenvolvimento do Trabalho**

A Tabela 9 apresenta um resumo do cronograma das atividades, comparando o que foi proposto no Projeto Inicial do Trabalho de Formatura, juntamente com as



modificações apresentadas no Relatório de Progresso e com o período efetivamente utilizado para a realização das atividades.

Conforme os dados demonstrados na Tabela 9, as etapas de levantamento e revisão bibliográfica tiveram início em meados de janeiro. No entanto, o término desta etapa foi inicialmente proposto para o mês de abril, quando na verdade, só se finalizou no fim do mês de maio, devido ao grande volume de trabalhos selecionados e a opção de se dividir o processo de revisão bibliográfica em quatro diferentes etapas, conforme um assunto específico.

A duração do período para a escolha dos projetos e dos testemunhos de sondagem não foi alterada, permanecendo por cerca de um mês. Apesar de não ter se dado ao longo de todo o mês de abril, conforme proposto anteriormente, esta etapa se iniciou na segunda semana de abril, terminando no meio do mês de maio. Isto não acarretou quaisquer conseqüências para o andamento do Trabalho de Formatura, já que a revisão bibliográfica ainda estava sendo realizada, e os trabalhos práticos só poderiam ser iniciados com a base teórica já consolidada.

Inicialmente o trabalho previa a avaliação dos efeitos da alteração intempérica na aplicação do Sistema RMR. Entretanto, face à dificuldade para a obtenção de trechos significativos de testemunhos de sondagem representativos de horizontes de alteração definidos, optou-se por avaliar a aplicação do sistema em rochas brandas e duras, provenientes do mesmo local. O efeito da alteração intempérica foi considerado apenas no estudo de caso nº 3, mesmo assim indiretamente, pois foram comparados dados de aplicação do Sistema RMR em testemunhos e respectivos trechos de túnel.

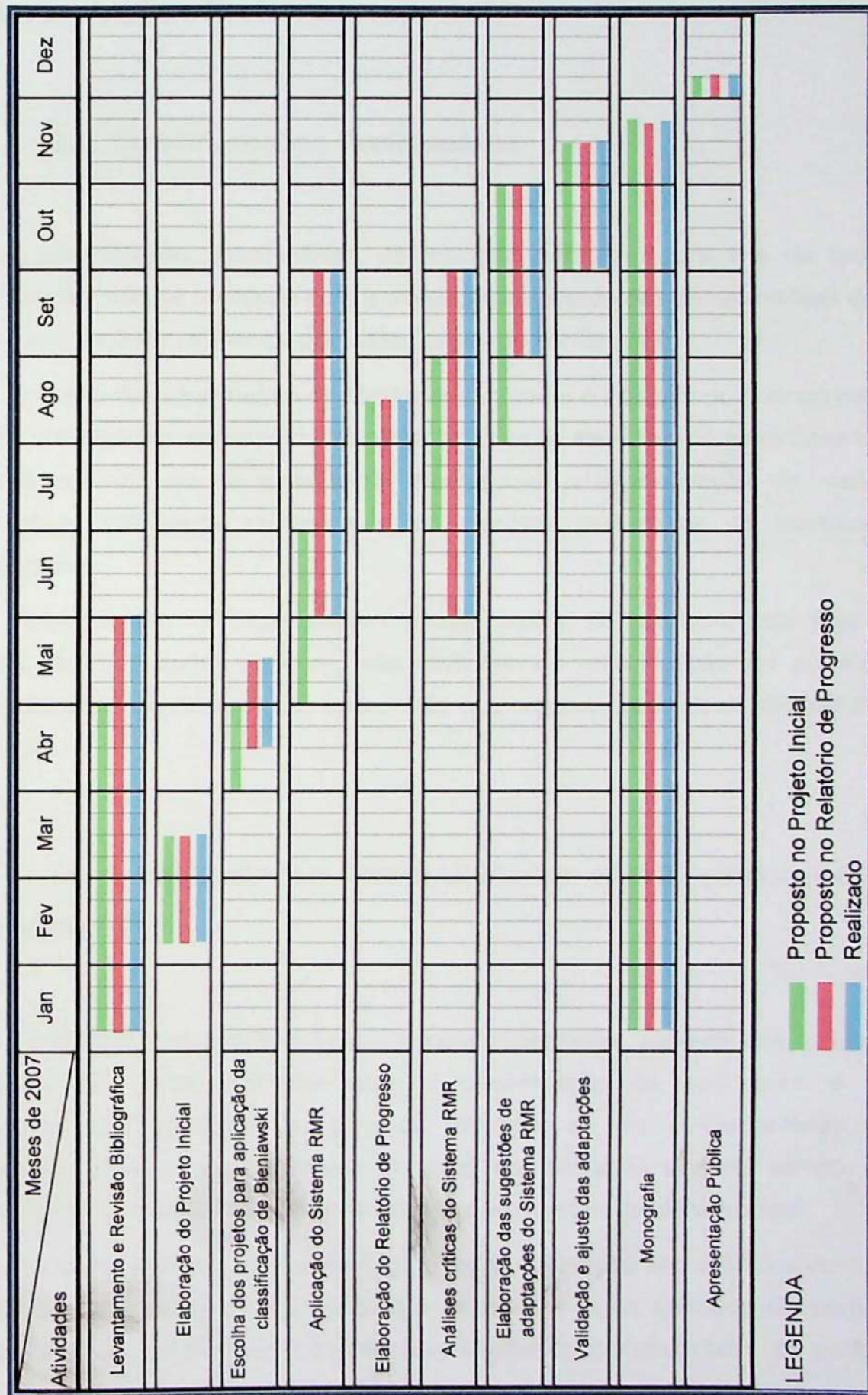
As atividades práticas foram iniciadas a partir de junho. Nota-se que as maiores modificações do cronograma ocorreram nesta fase, pois as análises críticas do Sistema RMR foram desenvolvidas concomitantemente com a aplicação prática do sistema nos testemunhos de sondagem e nas frentes de escavação. Neste sentido, aumentou-se o período para a realização dessas atividades, tendo em vista constituírem a base principal de dados para este trabalho.

A partir de setembro, houve conhecimento suficiente para iniciar a elaboração das adaptações do Sistema RMR e no final de outubro, foram realizadas as validações e ajustes.

A monografia final foi confeccionada durante todo o ano, conjuntamente com as atividades descritas acima. Os períodos de elaboração dos relatórios inicial e de progresso foram mantidos e cumpridos.



Tabela 9: Cronograma das atividades





## **6. Definição dos Parâmetros a Serem Utilizados e Interpretações Preliminares**

### **6.1. Considerações Preliminares**

A classificação geomecânica de maciços rochosos, para fins de projetos de escavação, não se confunde com a descrição detalhada das características do maciço rochoso, também conhecida por classificação de sondagens.

No caso de classificação de sondagens, o nome é adotado pois vários parâmetros são considerados, como será visto adiante. Quando se tratam de superfícies rochosas, sejam naturais ou de escavação, emprega-se a denominação de mapeamento geológico, em geral, utilizando-se os mesmos parâmetros da classificação de sondagens.

Dessa forma, as classificações geomecânicas de maciços, seja pelo Sistema RMR, ou por outro qualquer, são distintas da classificação de sondagens ou mapeamento de superfícies, apesar de que alguns parâmetros são utilizados em comum.

#### **6.1.1. Parâmetros a Serem Utilizados nas Classificações de Sondagens**

De acordo com a metodologia proposta inicialmente, sabe-se que a classificação geomecânica será realizada após a classificação da sondagem e de uma caracterização detalhada do grau de alteração da rocha. Os critérios a serem utilizados para a caracterização do grau de alteração baseiam-se no perfil de intemperismo desenvolvido por Vaz (1996) para regiões de clima tropical.

Conforme indicado na Figura 3, os graus de alteração são definidos em função da alteração mineralógica, dos processos envolvidos e os métodos de perfuração e escavação. A utilização de critérios associados às características de perfuração e



escavação facilita a reprodução e diminui, a níveis aceitáveis, a avaliação subjetiva do parâmetro alteração.

Em anexo (Anexos 8.1 e 8.2) encontram-se as tabelas com os critérios que foram utilizados nas classificações dos testemunhos de sondagem.

Apesar do sistema RMR aplicar-se apenas aos trechos de rocha, a classificação das sondagens, mostrada em Anexos – Parte II, compreendeu também os trechos em solo.

### 6.1.2. Parâmetros do Sistema RMR e Avaliações Críticas Preliminares

Após a revisão bibliográfica efetuada, observou-se a possibilidade de se tecer alguns comentários em relação à classificação do sistema RMR apresentado no item 3.2..

Primeiramente, de forma geral, pode-se fazer um agrupamento dos parâmetros (Tabela 10) usualmente utilizados nas diversas classificações geomecânicas existentes, sendo que somente os destacados em cinza são utilizados no Sistema RMR.

Tabela 10: Agrupamento dos parâmetros usualmente utilizados em diversas classificações (VAZ, 1982)

ROCHA	Tipo litológico
	Estruturas internas (xistosidade, estratificação)
	Alteração intempérica
	Minerais expansivos
	Resistência (compressão simples, compressão pontiforme, qualitativa)
DESCONTINUIDADES	Orientação
	Espaçamento
	Superfície das paredes (lisa, rugosa, plana)
	Alteração das paredes
	Abertura
	Preenchimento
MACIÇO ROCHOSO	Número de famílias
	RQD
	Velocidade de propagação
	Água
REGIONAIS	Tensões virgens
	Estruturas externas de porte (falhas, diques, contatos, dobras)



A seguir, a Tabela 11 demonstra a porcentagem de influência dos parâmetros considerados no Sistema RMR (VAZ, 1982)

Tabela 11: Porcentagem de influência dos parâmetros considerados no Sistema RMR

Grupo de Parâmetros	Sistema RMR
Rocha	15
Descontinuidades	50+12
Rocha e descontinuidades	20
Maciço rochoso	15

Muitos autores afirmam que as características de qualidade de maciços rochosos são fundamentalmente conseqüências do seu estado de alteração e fraturamento.

A classificação RMR considera um peso muito maior para os parâmetros ligados às descontinuidades (62 pontos) do que para os parâmetros ligados à rocha (15 pontos). Adicionalmente, se considerarmos que o RQD é um parâmetro que abrange, simultaneamente, o estado de alteração da rocha e o espaçamento das fraturas, com um peso de 20 pontos, pode-se dividir este valor ao meio e passar então a considerar 72 pontos totais para as descontinuidades e 25 pontos para os parâmetros ligados à rocha.

Com a análise dos parâmetros, pode-se dizer que a influência do grupo de rocha depende principalmente da alteração intempérica e da resistência, sendo esta última também dependente da alteração.

A classificação de Bieniawski foi formulada utilizando-se dados de países de clima temperado, nos quais, a alteração da rocha é pouco importante, afetando a apenas alguns metros na parte superior do maciço. No Brasil e demais países tropicais, a alteração atinge grandes profundidades, funcionando fraturas e falhas como verdadeiros condutos de água.

A alteração da rocha afeta diretamente sua resistência, além de promover transformações mineralógicas, gerando argilominerais. Por outro lado, quando a rocha está alterada, as superfícies das fraturas também estão, afetando o conjunto das propriedades mecânicas do maciço rochoso, sendo plenamente justificável atribuir maior peso às propriedades da rocha em regiões de clima tropical.



Exemplificando, numa região de clima frio ou de clima seco, a alteração é menos intensa e, conseqüentemente as rochas são mais resistentes, aumentando a importância das descontinuidades que, praticamente passam a governar a estabilidade da obra. Considerando como exemplo, rocha ígnea ou metamórfica de alto grau, nas condições climáticas dominantes no Brasil, isto é clima quente e úmido, o papel da alteração é importante.

Por outro lado, tratando-se de uma rocha branda, tal como o arenito, há grandes dificuldades em se reconhecer o estado de alteração da rocha, uma vez que o fenômeno nem sempre se manifesta por modificações cromáticas da rocha ou no brilho dos minerais. Nestes casos, recorre-se ao parâmetro coerência (SERRA, E. & OJIMA, L.M. , 1998).

A coerência é definida com base em propriedades de tenacidade, dureza e friabilidade da rocha (Tabela 12). É caracterizada tátil-visualmente, através da apreciação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (GUIDICINI *et al.*, 1972).

Tabela 12: Graus de coerência (GUIDICINI *et al.*, 1972)

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

Simultaneamente, pode ser utilizado o perfil de intemperismo proposto por Vaz (1969, 1996), o qual classifica os horizontes de alteração em função das suas características para escavação e perfuração com sondagens (ver item 3.3), dessa forma considerando o grau de alteração e a coerência.

Após a análise geral da classificação, pode-se individualizar os parâmetros considerados no Sistema RMR e abordar algumas críticas e/ou dificuldades na obtenção desses valores.



a) *Resistência à Compressão Uniaxial (RCU)*

Este parâmetro é mais representativo quando obtido por meio de ensaios laboratoriais, porém nem sempre esses ensaios estão disponíveis ou abrangem todos os litotipos encontrados.

Em regiões tropicais, a RCU sofre redução apreciável com o intemperismo e nem sempre é possível obter amostras adequadas para a execução dos ensaios sobre rochas alteradas.

Como alternativa, o próprio Sistema RMR admite o uso de esclerômetros, com o qual o valor de RCU pode ser estimado por meio de medidas de resistência a compressão puntiforme. As leituras com esclerômetros, entretanto, geralmente apresentam dispersão elevada, requerendo muitas medidas para se obter uma média representativa.

O valor de RCU também pode ser estimado considerando a reação ao martelo de geólogo e outros procedimentos, utilizando-se tabelas de correlação como as de Hoek (1980).

Neste trabalho foram utilizados resultados de ensaios de laboratório juntamente com os procedimentos indicados na Tabela 13 para estimar a RCU.

Tabela 13: Estimativa de RCU com base na reação ao martelo para os grupos de rocha (VAZ, 1996)

GRUPO	RCU(MPa)	REAÇÃO AO MARTELO (*1)
DURAS	>100	vários golpes para partir; para RCU >200, somente lascas e som de sino.
MÉDIAS	30 a 100	um ou dois golpes para partir; para RCU <50, a ponta do martelo penetra levemente e a lâmina do canivete raspa.
BRANDAS	10 a 30	um golpe fragmenta, ponta do martelo penetra facilmente, lâmina do canivete risca mas não corta.
MUITO BRANDAS	2 a 10	um golpe esmigalha; ponta do martelo penetra até 2 cm, lâmina do canivete corta superficialmente.
(*1) Reações para rochas intactas em amostras de mão		



*b) RQD – "Rock Quality Designation"*

O segundo parâmetro a avaliar é o RQD (*Rock Quality Designation*), de fácil obtenção em testemunhos de sondagens, no entanto, difícil de ser obtido em frentes de escavação. Neste caso, durante o mapeamento da frente pode-se estimar um valor aproximado de RQD com base no espaçamento das fraturas do maciço rochoso.

Em relação aos testemunhos de sondagens, deve-se levar em consideração que existem dois métodos para a obtenção do RQD: por manobra ou por isofraturamento (IQR). Para este estudo, escolheu-se o método do isofraturamento, que consiste basicamente nos mesmos critérios, porém considera, ao invés da manobra, trechos em que o espaçamento das descontinuidades é homogêneo.

*c) Parâmetros relacionados às descontinuidades*

O terceiro parâmetro do Sistema RMR é o espaçamento das descontinuidades. A rigor, parte do parâmetro RQD e o parâmetro espaçamento médio das juntas procuram refletir uma única condição, referente à densidade volumétrica das descontinuidades, ou seja, o estado de compartimentação do maciço. Parece, portanto, haver na classificação uma dupla pontuação decorrente de um mesmo fator.

Restam ainda os parâmetros relativos às condições das descontinuidades e ao ajuste devido a orientação das descontinuidades em relação à escavação.

A condição das descontinuidades pode ser obtida tanto em testemunhos de sondagens como nas frentes de escavação, através de uma descrição minuciosa das fraturas. Quanto aos testemunhos de sondagens, observa-se a possibilidade de remoção do preenchimento pela água de circulação.

Para a correção devido à orientação das descontinuidades, foi adotada a nota (-5), admitindo-se condições razoáveis.

*d) Parâmetro água*

A presença de água é um fator que geralmente só pode ser observado na frente de escavação. Sendo assim, quando um projeto de obra subterrânea ainda se



encontra na fase de projeto básico, no qual a classificação geomecânica é baseada nas informações das sondagens, o parâmetro água é definido em função de resultados de ensaios de perda d'água, dados piezométricos ou pela densidade do fraturamento e suas respectivas condições.

## **7. Estudos de Casos**

Foram considerados três casos em maciços rochosos de arenito, diabásio e gnaisse.

Para os maciços de arenito e diabásio foram classificados os testemunhos de duas sondagens para cada um dos estudos de caso. Em se tratando do maciço de gnaisse, foram classificados os testemunhos de sondagens e a frente de escavação do túnel em duas seções próximas das sondagens.

### **7.1. Estudo de Caso Nº 1**

O primeiro estudo de caso foi efetuado a partir de dados de investigações geológico-geotécnicas para o projeto de um aproveitamento hidrelétrico que prevê a execução de uma barragem no rio Araguaia, com circuito de adução até a casa de força por meio de um túnel.

Foram selecionadas duas sondagens (SM-01 e SM-02) efetuadas na área a ser atravessada pelo túnel. Essas sondagens são mistas, verticais, atravessaram o arenito Aquidauana e atingiram profundidades de 30,3 metros (SM-01) e de 111,05 metros (SM-02). A Figura 4 apresenta a planta de locação das sondagens selecionadas.

Os estudos ainda se encontram na fase de projeto, portanto, não há como comparar os dados das sondagens com os mapeamentos da frente de escavação, uma vez que o túnel não está em sua fase executiva.



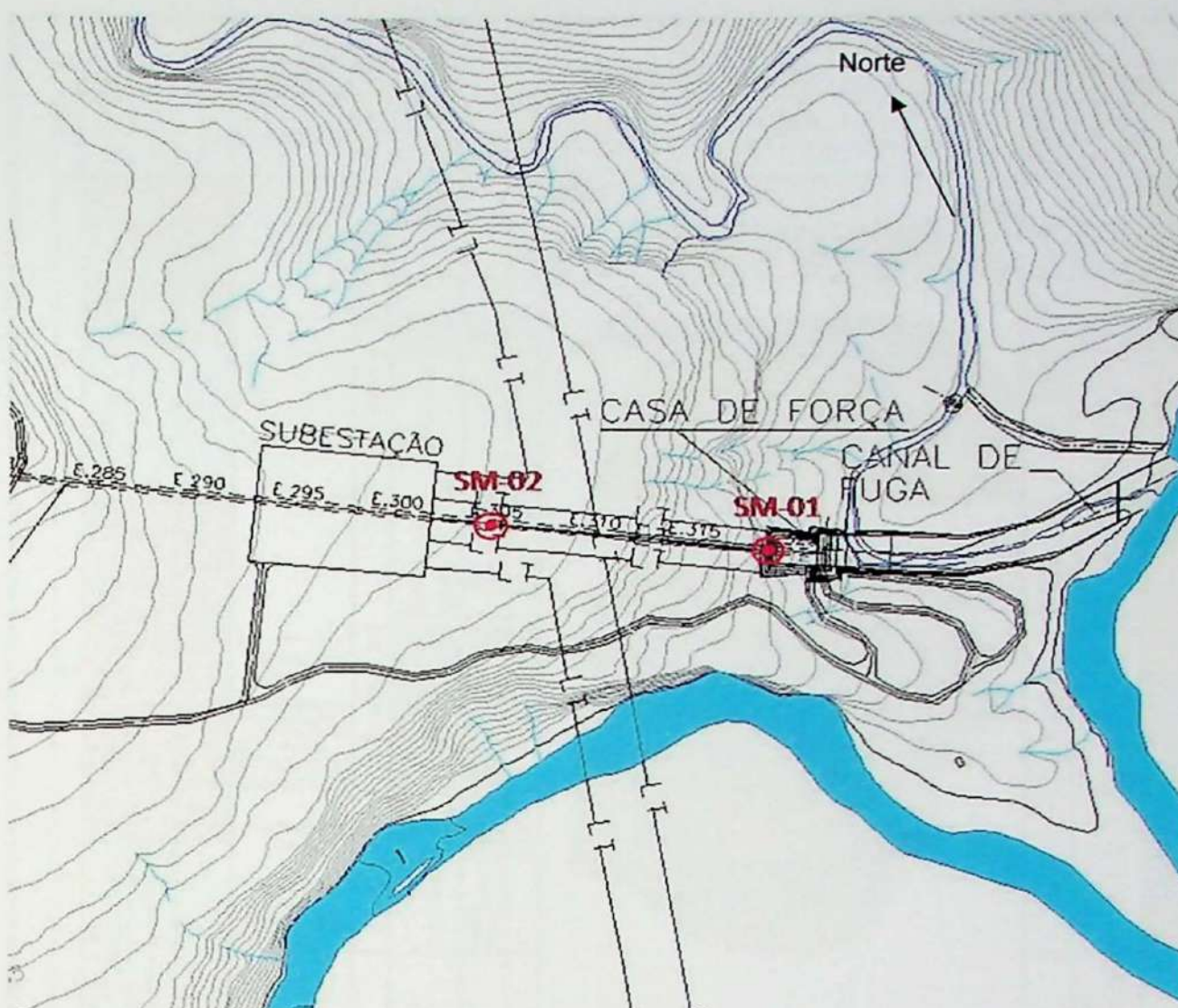


Figura 4: Planta de locação das sondagens SM-01 e SM-02 - (Escala aproximada 1: 9300)

### 7.1.1 Síntese da Geologia Regional e Local

O túnel será implantado em terrenos da Bacia do Paraná, com rochas sedimentares paleozóicas, atribuídas às Formações Aquidauana e Irati, intercaladas a rochas ígneas intrusivas (diabásios) de idade juro-cretácea, atribuídas à Formação Serra Geral.

A estas rochas se sobrepõem solos residuais e transportados (terraços fluviais, aluviões, coluviões e depósitos de tálus) de idade quaternária. A Figura 5 apresenta a coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (MILANI *et al.*, 1993).



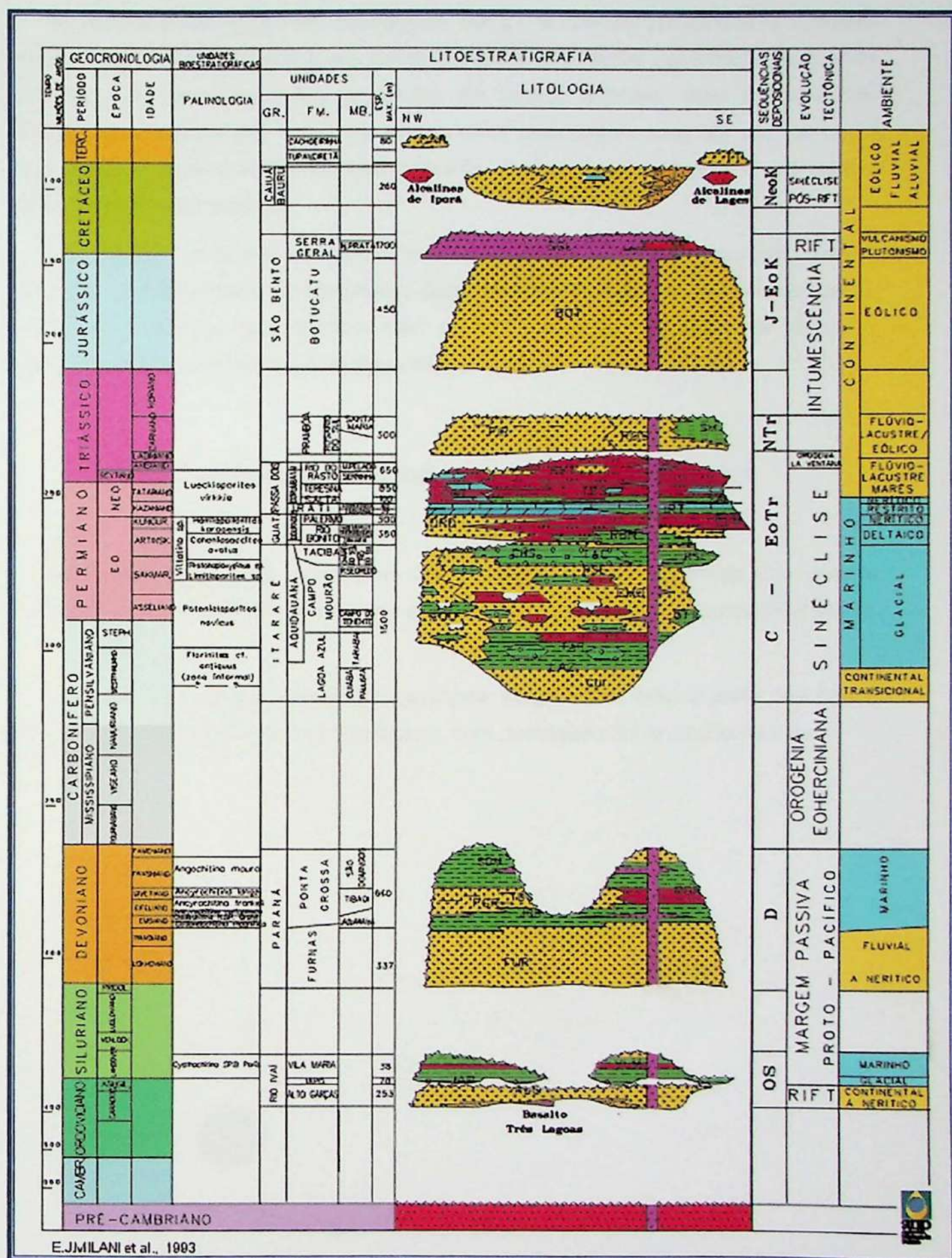


Figura 5: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná adaptado por Milani et al. (1993)



No trecho onde estão as sondagens SM-01 e SM-02 predomina a unidade Aquidauana, correspondente a um espesso pacote sedimentar constituído de arenito vermelho, de granulação fina a média, de matriz argilosa, com intercalações milimétricas de carbonato e com lentes de siltito e/ou argilito com até um metro de espessura. O acamamento, quando presente, é pouco pronunciado e, em geral, apresenta estrutura maciça.

Esta rocha apresenta-se medianamente coerente a pouco coerente, pouco fraturada e praticamente impermeável, conforme revelado pelos ensaios de perda d'água sob pressão que, mesmo com pressões efetivas elevadas, de até 35,5 Kgf/cm<sup>2</sup>, mostraram absorções de água nulas.

### **7.1.2. Classificação de Sondagens e Seção Geológica**

As classificações das sondagens SM-01 e SM-02 encontram-se em anexos (Anexos 9 e 10 – Parte II), assim como os respectivos perfis de sondagem (Anexos 15 e 16 – Parte III).

A Figura 6 apresenta uma seção geológica simplificada, feita a partir dos dados obtidos com a classificação das sondagens, com destaque para o trecho do túnel.



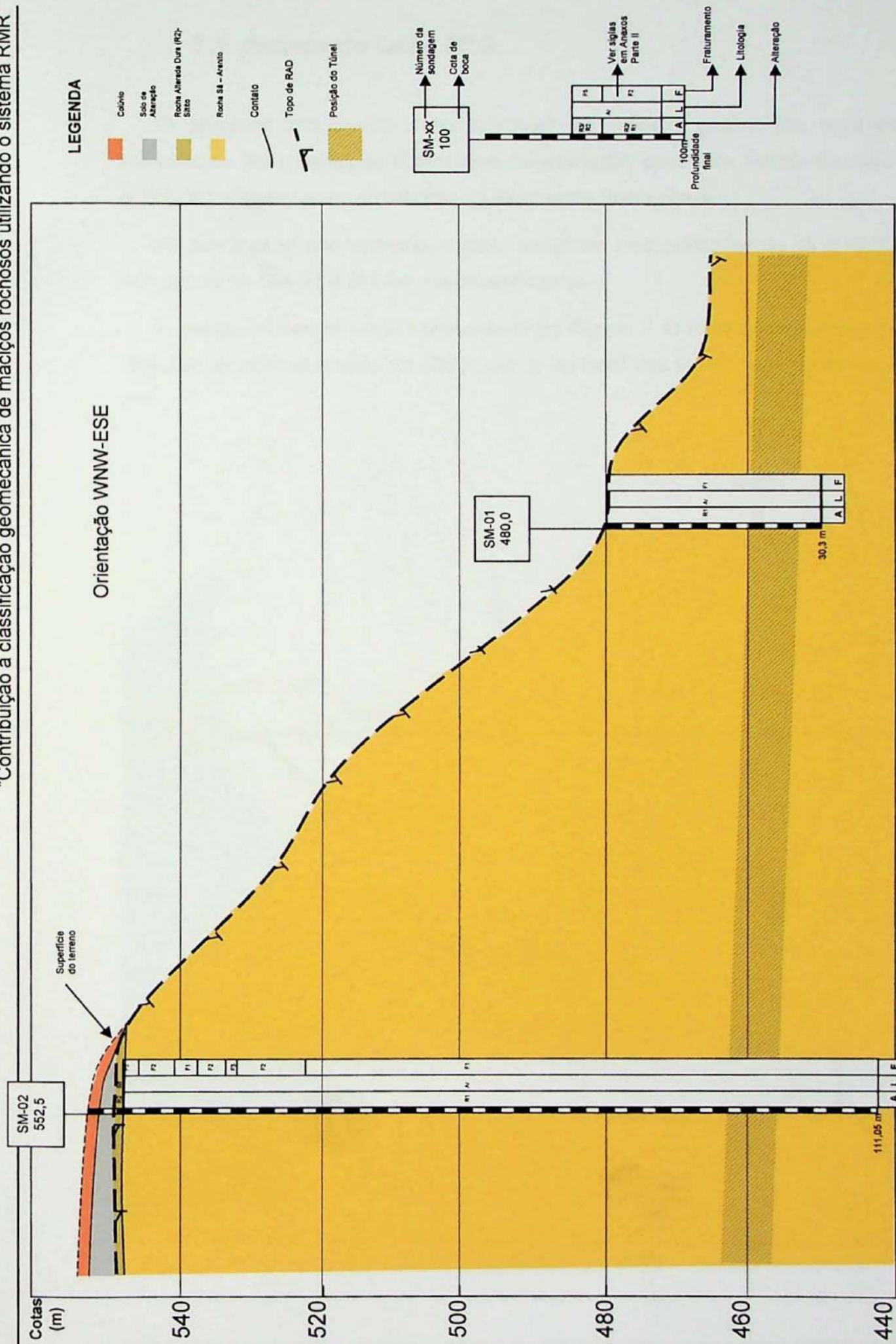


Figura 6: Seção geológico-geotécnica do estudo de caso nº 1 (Escala Vertical 1:800 e Horizontal 1:1850)



## 7.2. Estudo de Caso Nº 2

O segundo estudo de caso refere-se ao mesmo projeto de aproveitamento hidrelétrico. No entanto, as sondagens selecionadas para este estudo de caso (SM-03 e SM-04) atravessaram o diabásio da Formação Serra Geral.

As sondagens são verticais, mistas, atingiram profundidades de 85 e 80,02 metros nos casos da SM-03 e SM-04, respectivamente.

A planta de locação está apresentada na Figura 7. O local dessas sondagens está distante aproximadamente de 5000 metros do local das sondagens do estudo de caso nº1.

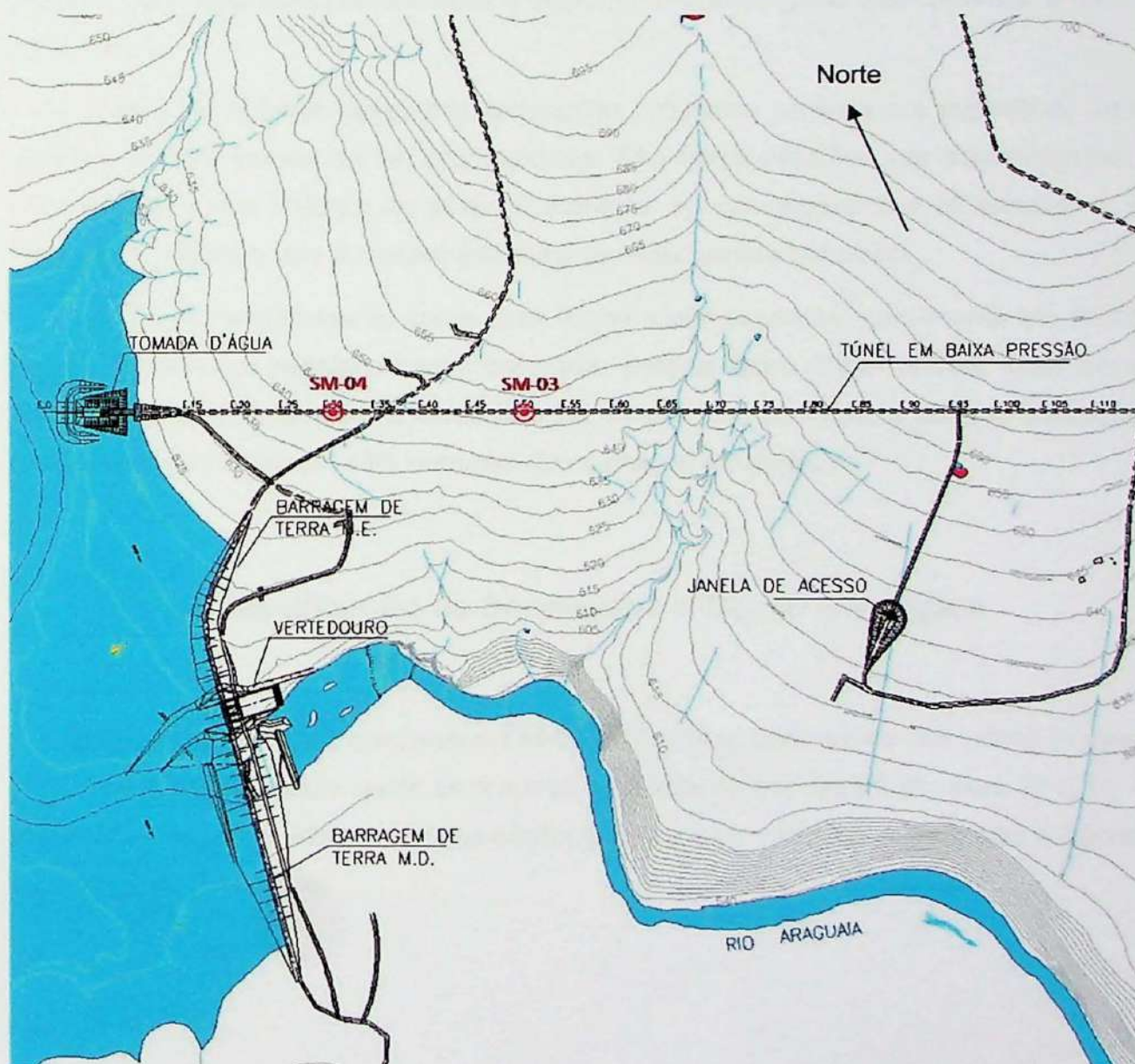


Figura 7: Planta de locação das sondagens SM-03 e SM-04 - (Escala aproximada 1: 16000)



### **7.2.1. Síntese da Geologia Regional e Local**

Como visto no item 7.1.1., o túnel será implantado em terrenos da Bacia do Paraná, cuja coluna estratigráfica foi apresentada na Figura 5. Localmente ocorrem dois sills de diabásio, denominados inferior e médio, em função de sua posição topográfica.

O sill médio localiza-se acima dos folhelhos da Formação Irati, em cotas superiores a 655 metros. O sill inferior, investigado pelas sondagens selecionadas, ocorre entre as cotas 495 e 580 metros, com espessura aproximada de 85 metros. O contato inferior do sill com a brecha calcária inferior da Formação Irati está situado na cota 543 metros e seu topo está parcialmente erodido. O mergulho geral das camadas é de 2° para o Sul.

O corpo de diabásio apresenta disjunções colunares abertas em superfície, mas seladas ou não instaladas em profundidade. São freqüentes fraturas subhorizontais, correspondentes a fraturas de alívio. Entretanto, as sondagens que atravessaram o diabásio, revelaram que o mesmo encontra-se muito pouco fraturado.

O diabásio caracteriza-se como uma rocha muito coerente, geralmente sã, muito pouco fraturada a medianamente fraturada, praticamente impermeável, com boas características geomecânicas. Quando o sill encontra-se alterado, o solo de alteração é caracterizado como um silte arenoso, de coloração amarelada.

### **7.2.2. Classificação de Sondagens e Seção Geológica**

As classificações das sondagens SM-03 e SM-04 encontram-se em anexo (Anexo 11 e 12 – Parte II), assim como os respectivos perfis de sondagem (Anexos 17 e 18 – Parte III). A Figura 8 apresenta uma seção geológica simplificada, sendo que o trecho do túnel está destacado.



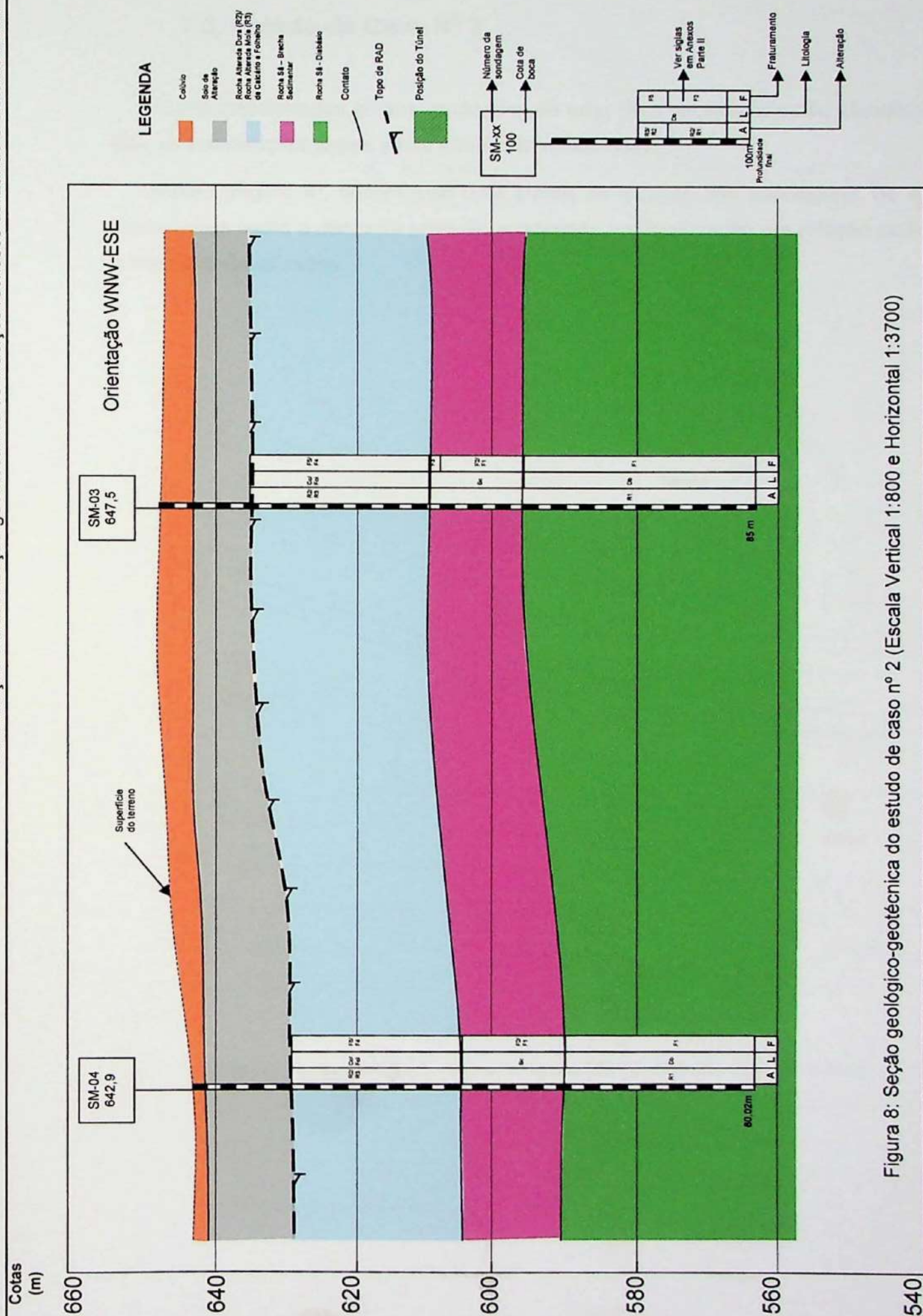


Figura 8: Seção geológico-geotécnica do estudo de caso nº 2 (Escala Vertical 1:800 e Horizontal 1:3700)



### 7.3. Estudo de Caso Nº 3

Foram selecionadas quatro sondagens de uma obra subterrânea não identificada, pois as autorizações legais ainda não foram concedidas.

Abaixo (Figura 9), encontra-se uma planta de locação das sondagens, no qual, informações como a distância entre as sondagens e a localização em relação ao túnel podem ser visualizadas.

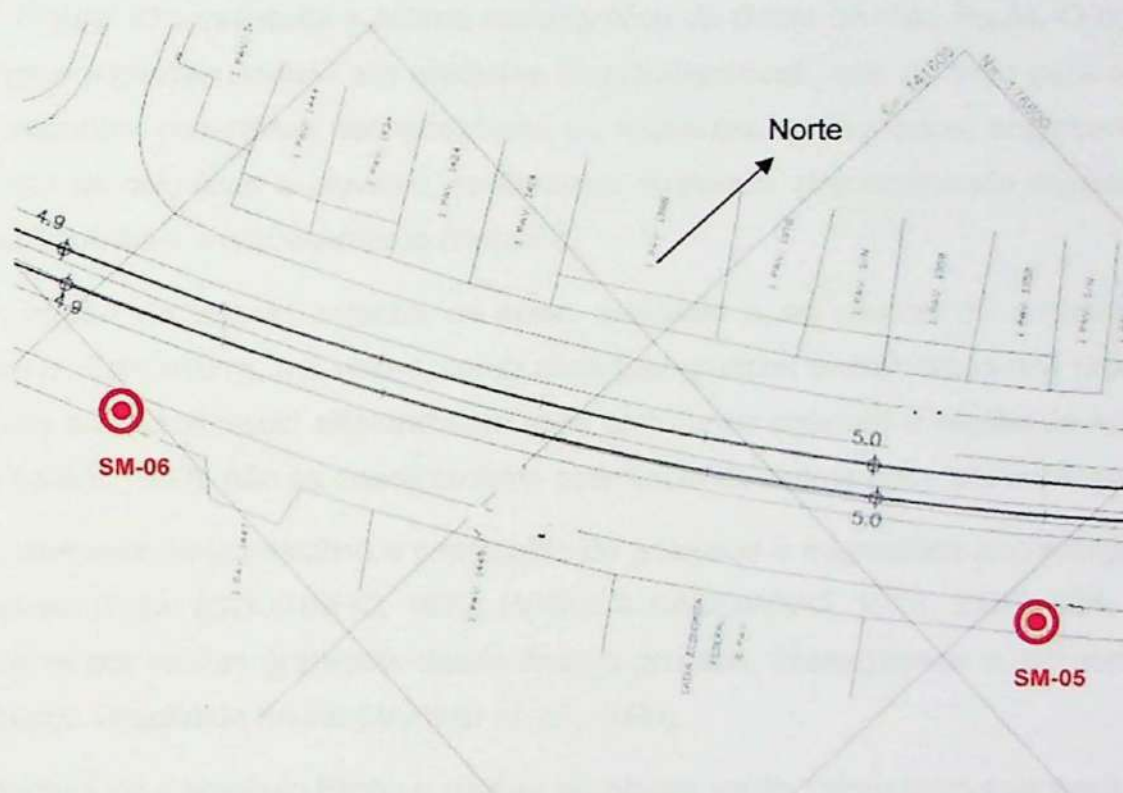


Figura 9: Planta de locação das sondagens SM-05, SM-06 - (Escala 1: 500)



Os furos consistem em sondagens mistas, combinando percussão para os trechos de solo e rotativa para os trechos de rocha. As sondagens SM-05 e SM-06 são mistas, verticais, com profundidades de 45,04 no caso da SM-05 e 44 metros no caso da SM-06.

Neste estudo de caso foi possível comparar os resultados obtidos com as sondagens e com o mapeamento das frentes de escavação.

### **7.3.1. Síntese da Geologia Regional e Local**

A Figura 10 representa a coluna estratigráfica da Bacia de São Paulo. O contexto geológico regional consiste em unidades litoestratigráficas, que do topo para a base, compreendem coberturas neocenozóicas ou depósitos quaternários, englobando um conjunto de coluviões e aluviões, sedimentos terciários, predominando depósitos do Grupo Taubaté e o embasamento cristalino.

A região de estudo engloba os solos residuais e as rochas do embasamento cristalino. Este ocorre, por vezes, como altos topográficos preservados dos processos erosivos e/ou tectônicos, aflorando em altos estruturais próximo à região de interesse (EMPLASA, 1980), não se descartando a ocorrência de outros altos em subsuperfície.

O embasamento cristalino é constituído de gnaisses e migmatitos subordinados do Complexo Embu (COUTINHO, 1972; HASUI & SADOWSKI, 1976; EMLASA, 1980), intrudidos por rochas graníticas desde finas a grossas, homogêneas e até porfíricas do Maciço Granitóide Ibiúna (JANASI *et. al.*, 1990).

Rochas do Complexo Embu e rochas graníticas estão freqüentemente transpostas por falhas associadas às zonas de cisalhamento gerando protomilonitos (blastomilonitos), milonitos até ultramilonitos (filonitos), todos eles com proeminente foliação concordante com a estruturação regional ENE-WSW.

Zonas de cisalhamento compreendem um grande número de falhas concentradas em feixes que produzem milonitização e cataclase das rochas. Esses feixes de falhas transpõem rochas pré-cambrianas, gerando migmatitos e gnaisses graníticos com texturas cataclástica e milonítica ou produzindo nas rochas granitóides orientação e/ou foliação e blastomilonitos subordinados (EMPLASA, 1980).



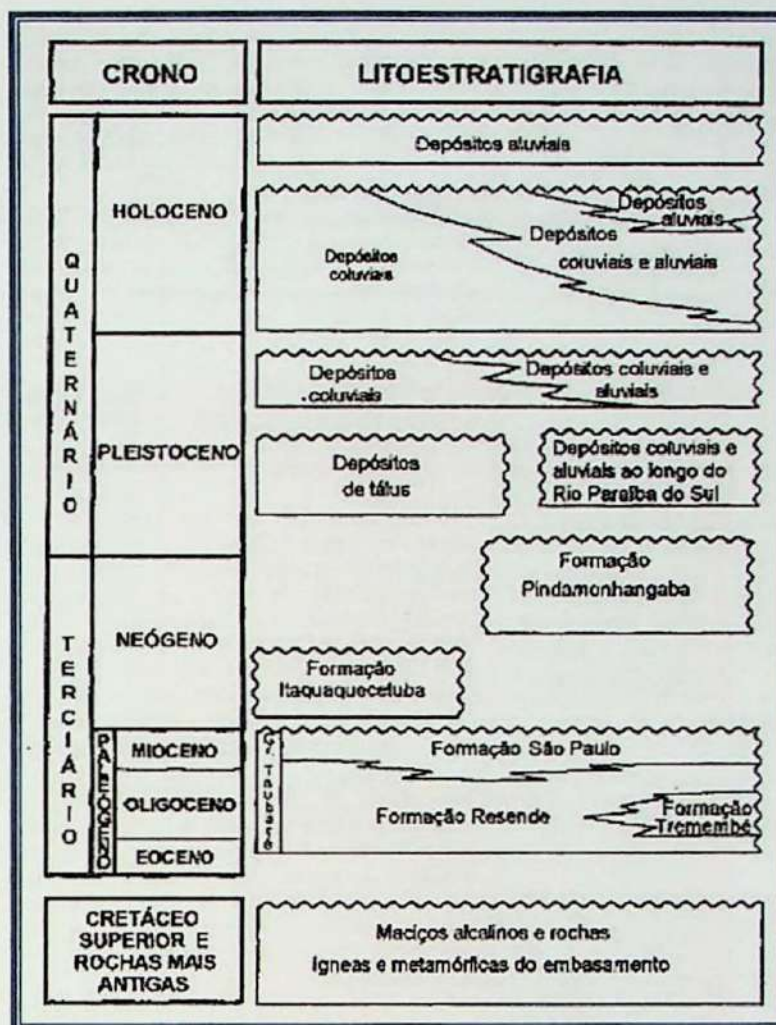


Figura 10: Coluna litoestratigráfica da Bacia de São Paulo (RICCOMINI, 1989)

### 7.3.2. Classificação de Sondagens e Seção Geológica

As classificações das sondagens SM-05 e SM-06 encontram-se em anexo (Anexos 13 e 14 – Parte II), juntamente com os perfis de sondagem (Anexos 19 e 20 – Parte III).

A Figura 11 apresenta uma seção geológica simplificada, tendo destacado o trecho do túnel.



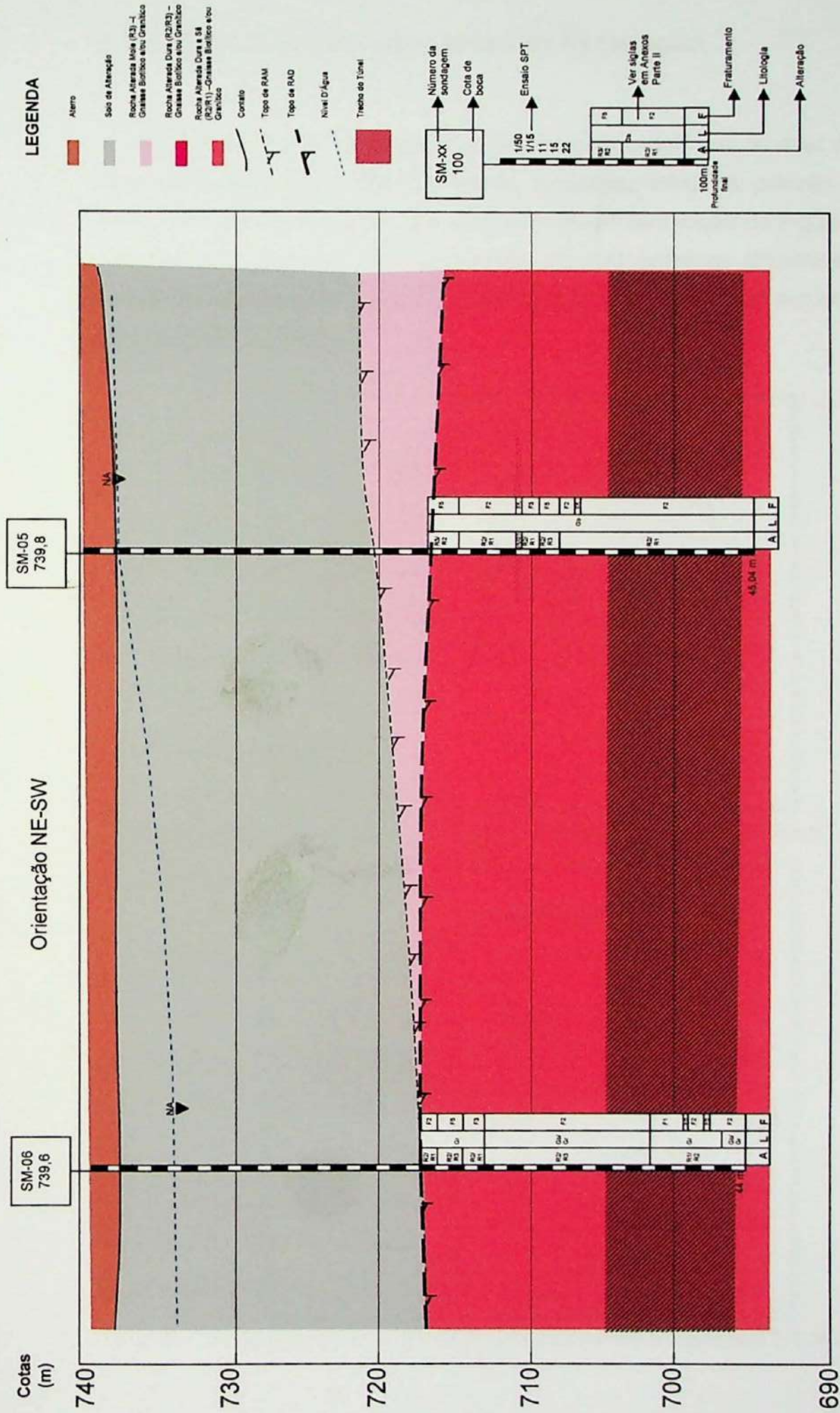


Figura 11: Seção geológico-geotécnica do estudo de caso nº 3 (Escala Vertical 1:200 e Horizontal 1:500)



### 7.3.3. Mapeamentos das Frentes de Escavação

As Figuras 12 e 13 referem-se aos mapeamentos das frentes de escavação, próximos às sondagens SM-05 e SM-06, respectivamente. No primeiro caso, a frente mostra-se mais homogênea, enquanto a frente de escavação da Figura 13 apresenta complexidade geológica, com três zonas de características diferentes. A seção de escavação é dividida em duas etapas, sendo que o mapeamento representa apenas a parte superior (calota).

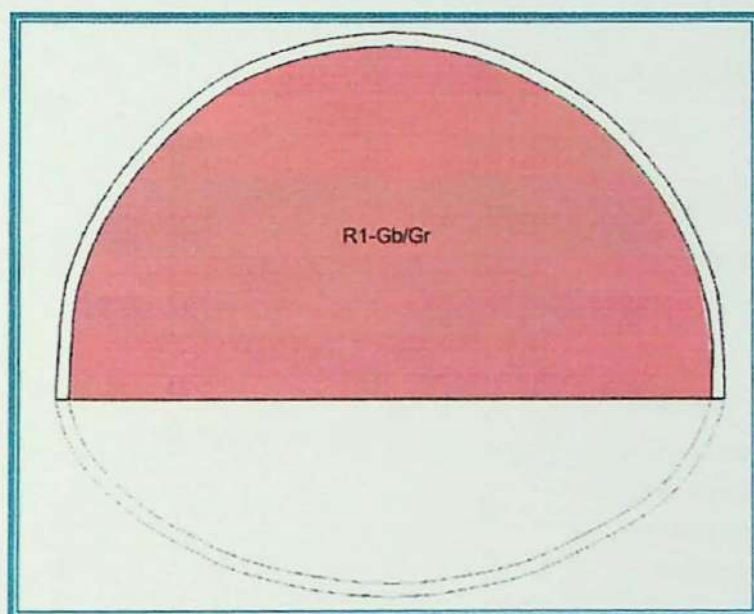


Figura 12: Mapeamento da frente de escavação próximo à sondagem SM-05 (Escala 1:100)

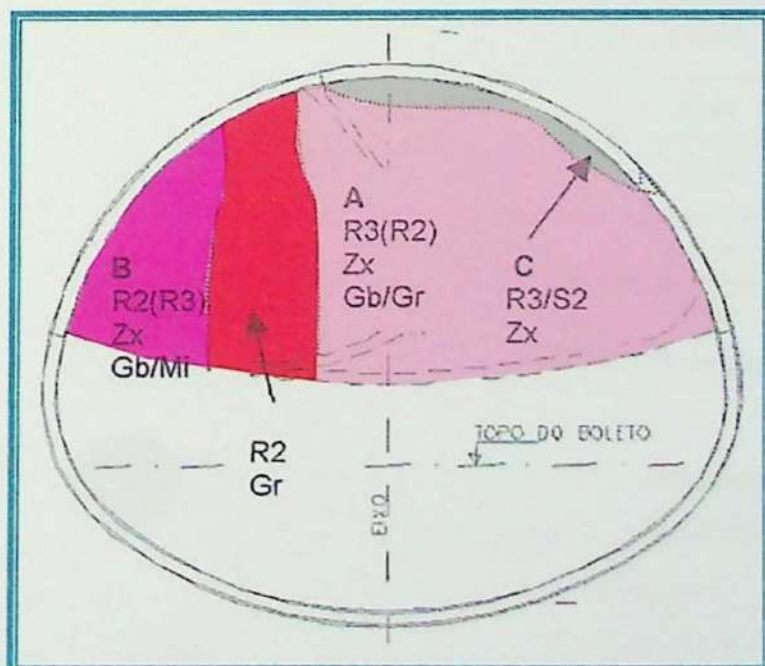


Figura 13: Mapeamento da frente de escavação próximo à sondagem SM-06 (Escala 1:100)



## 8. Classificação Geomecânica RMR nos Trechos Selecionados

A classificação geomecânica RMR será aplicada em trechos específicos para cada estudo de caso.

Nos casos 1 e 2, o túnel apresenta aproximadamente 7 metros de diâmetro. Para aplicação do sistema, considerou-se o trecho total como sendo 7 metros acima e abaixo do túnel. Nos casos em que as sondagens não atingiram 7 metros abaixo do túnel, foi considerado o final do trecho de estudo como a profundidade final da sondagem.

Para o estudo de caso 3, outra metodologia foi utilizada para a definição do trecho de estudo, pois o túnel encontrava-se parcialmente escavado.

Os trechos de túnel e os trechos de estudo de cada caso estão apresentados na Tabela 14. As fotos dos testemunhos estão apresentadas em Anexos – Parte IV.

Tabela 14: Definição dos trechos de estudo

Fase do Projeto	Litologia	Estudo de Caso	Sondagem	Trecho do Túnel (metros)	Trecho de estudo das sondagens (metros)	Trecho do mapeamento da frente de escavação (metros)
Básico	Arenito	EC-01	SM-01	19-26	12-30,3	—
		EC-01	SM-02	90-97	83-104	—
Básico	Diabásio	EC-02	SM-03	70-77	63-84	—
		EC-02	SM-04	65-72	58-79	—
Executivo	Gnaiss	EC-03	SM-05	35-44	35-44	35-41,5
		EC-03	SM-06	34-43	34-43	34-40,5

Nos casos dos maciços de arenito e diabásio, presentes em um local de aproveitamento hidrelétrico, o objetivo foi comparar o desempenho da classificação RMR em maciço de rocha branda (arenito) e dura (diabásio). No caso do maciço gnáissico, o objetivo foi comparar a aplicação do Sistema RMR em testemunhos de sondagens e em mapeamento de frente de escavação.



## 8.1. Estudo de Caso Nº 1

Tabela 15: Classificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem (Arenito Aquidauana)

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº1																
Sondagem	Trechos Homogêneos															
	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		Observações	RMR
	DE	ATÉ	RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espaçamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo		
SM-01	12	30,29	60	7	100	20	0,6-2m	15	-	30	Seco	15	Regular	-5		82
SM-02	83	104	60	7	100	20	60-200mm	8	-	30	Seco	15	Regular	-5		75

Verifica-se que os resultados obtidos foram similares, diferenciando-se apenas no parâmetro espaçamento das juntas. Neste caso, na sondagem SM-01, o arenito apresenta-se maciço, sem acamamento, enquanto na sondagem SM-02, a presença dessa estrutura levou a uma pontuação menor.

Observa-se que o maciço de arenito da SM-02 ficou tipicamente enquadrado na classe II (60 a 80 pontos), com uma pontuação de 75 pontos, enquanto, na sondagem SM-01, a pontuação de 82 ficou muito próxima do limite inferior da classe I (80 a 100 pontos). Dessa forma, por segurança, para efeitos práticos, o maciço de arenito deve ser enquadrado na classe II.

## 8.2. Estudo de Caso Nº 2

Tabela 16: Classificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem (Diabásio Serra Geral)

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº2																
Sondagem	Trechos Homogêneos															
	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		Observações	RMR
	DE	ATÉ	RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espaçamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo		
SM-03	63	84	200	12	98	20	>2m	20	-	30	Seco	15	Regular	-5		92
SM-04	58	79	200	12	98	20	0,6-2m	15	-	30	Seco	15	Regular	-5		87



Neste caso, na sondagem SM-03, o maciço de diabásio ficou tipicamente enquadrado como classe I (80 a 100 pontos) pela pontuação de 92, enquanto na sondagem SM-04, com 87 pontos, ficaria mais próximo do limite inferior. Novamente, a diferença seria o espaçamento das descontinuidades, menor na SM-04. Entretanto, para efeitos práticos, considerando suas demais características, o maciço de diabásio foi enquadrado na classe I.

Na classificação dos maciços de arenito e diabásio, não houve diferença para os parâmetros de RQD, que soma 20 pontos, de condições de fratura, que soma outros 30 pontos, de água subterrânea (15 pontos) e orientação das descontinuidades (-5 pontos). Dessa forma, além das diferenças apontadas, relativas ao espaçamento das descontinuidades, a única distinção entre os maciços é a RCU que, para o arenito soma 7 pontos e para o diabásio, 12 pontos.

### 8.3. Estudo de Caso Nº 3

Tabela 17: Classificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem (Gnaisses do embasamento cristalino da Bacia São Paulo)

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº3																	
Sondagem	Trechos Homogêneos																
	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		G		H
	DE	ATÉ	RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espaçamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo	Observações	RMR	CLASSE
SM-05	35	44	110	9	100	20	>2m	20	64145	20	Úmido	7	Regular	-5		71	II
SM-06	34,00	37,38	100	7	44	8	>2m	20	64165	22	Úmido	7	Regular	-5		59	III
	37,38	39,82	180	12	100	20	>2m	20	-	30	Úmido	7	Regular	-5		84	I
	39,82	40,28	30	4	-	-	<60mm	5	-	0	Úmido	7	Regular	-5	Pequeno trecho	11	V
	40,28	41,35	180	12	100	20	>2m	20	64165	22	Úmido	7	Regular	-5		76	II
	41,35	41,89	50	4	-	-	<60mm	5	-	0	Úmido	7	Regular	-5	Pequeno trecho	11	V
	41,89	43,00	100	7	96	20	>2m	20	64165	22	Úmido	7	Regular	-5		71	II

No caso da sondagem SM-05, o maciço apresenta uma única classe em toda a extensão considerada, cerca de 10 metros, sendo enquadrado na classe II.

No caso da classificação da sondagem SM-06, entre 34 e 43 metros de profundidade, foram identificados seis trechos variando entre classe V (1 a 20 pontos) a classe I (80-100 pontos). Em termos de extensão, no intervalo considerado, temos aproximadamente 1 metro em dois trechos de classe V, pouco mais de 1 metro para



os trechos de classe II, aproximadamente 2 metros para o trecho de classe I e 3 metros para o trecho de classe III.

Neste contexto, quando as condições geológicas são complexas, conforme indicado pela variação da classe RMR, dois procedimentos podem ser adotados para definir a classe RMR de projeto. Um deles é adotar a classe RMR existente na abóboda do túnel, o que levaria o maciço a ser considerado como classe V. O outro procedimento seria considerar a classe predominante, caracterizando-se o maciço como classe II.

Apesar de o maciço poder ser considerado como classe II em ambas as sondagens, dependendo do critério adotado na SM-06, é evidente que se tratam de dois maciços completamente distintos e que, em termos de estabilidade da escavação, o maciço da SM-06 apresenta condições mais desfavoráveis devido às intercalações de classe V.

Tabela 18: Classificação Geomecânica RMR para as frentes de escavação (Gnaisses do embasamento cristalino da Bacia São Paulo)

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO N°3																	
Frente de Escavação Próxima à Sondagem N°	Intervalo (m)		ZONAS	A		B		C		D		E		F		G	
	DE	ATÉ		RCU		RQD		Espaçamento Juntas		Condições Juntas		Água Subterrânea		Orientação Descontinuidades		Observações	
				Peso relativo		Peso relativo		Peso relativo		Peso relativo		Peso relativo		Peso relativo		RMR	CLASSE
SM-05	35	41,5	A	150	12	50-75	13	300mm	10	44323	16	Úmido	7	Regular	-5	53	III
SM-06	34	40,5	A	30	4	<25	3	100mm	5	44121	12	Úmido	7	Regular	-5	26	IV
			B	100	7	25-50	8	100mm	5	44123	14	Úmido	7	Regular	-5	36	IV
			C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V

Neste caso observa-se que, no mapeamento da frente próximo a SM-06 foi confirmada a variabilidade do maciço, tendo sido identificadas três zonas (A, B e C) na frente de escavação com maciços de classes IV e V. Nota-se que na classificação da sondagem SM-06, foram identificadas zonas de classe V, porém com predominância de classe II, mostrando um maciço de melhor qualidade do que o efetivamente encontrado.



Por outro lado, no mapeamento da frente próximo a SM-05, nota-se que existe apenas uma classe de maciço, tal como na classificação da sondagem. Porém, no mapeamento da frente encontrou-se classe III e não II como indicado na sondagem.

## **9. Discussão dos Resultados**

A discussão dos resultados será apresentada em dois itens. No primeiro serão considerados os resultados obtidos com os maciços de arenito (caso nº 1) e de diabásio (caso nº 2), os quais retratam a aplicação do Sistema RMR sobre rocha branda e pouco coerente (arenito) e rocha dura e muito coerente (diabásio). No segundo item serão avaliados os resultados da aplicação do Sistema RMR em testemunhos de sondagens e em mapeamentos da frente de escavação para maciço gnáissico.

### **9.1. Aplicação do Sistema RMR em Rochas Brandas e Duras**

Os casos 1 e 2 representam a aplicação do Sistema RMR em rochas brandas e duras, provenientes de um mesmo local. Em ambos os casos, o sistema foi aplicado em trechos de sondagem situados a dezenas de metros de profundidade, pouco ou não afetados pelos processos de alteração intempérica superficial.

Na aplicação da classificação aos dois maciços, vários parâmetros revelaram-se constantes. Dessa forma, conforme discutido no item 8, a variação na pontuação ficou associada aos parâmetros relativos à RCU, RQD e ao espaçamento das descontinuidades. Os resultados obtidos com a aplicação do sistema estão resumidos na Tabela 19, com a pontuação dos parâmetros e respectivas classes para os maciços rochosos de arenito e diabásio. Conforme indicado no item 8, para efeitos práticos, o maciço de arenito seria enquadrado na classe II e o de diabásio na classe I.



Tabela 19: Resumo da classificação geomecânica nos testemunhos de sondagens dos estudos de caso 1 e 2

Sondagem	RCU - Peso relativo	RQD - Peso relativo	Espacamento Juntas Peso relativo	Condições Juntas Peso relativo	Água Subterrânea Peso relativo	Orientação Descontinuidades Peso relativo	Observações	RMR	CLASSE
Arenito									
SM-01	7	20	15	30	15	-5		82	I
SM-02	7	20	8	30	15	-5		75	II
Diabásio									
SM-03	12	20	20	30	15	-5		92	I
SM-04	12	20	15	30	15	-5		87	I

Bieniawski (1989) apresenta as seguintes recomendações, indicadas na Tabela 20, para escavação e contenção conforme as classes RMR dos maciços rochosos e suas respectivas características.

Tabela 20: Resumo das recomendações em função das classes de maciço (BIENIAWSKI, 1989)

Classe Geomecânica RMR	Tempo médio sem suporte	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)	Escavação	Ancoragens	Suporte (concreto projetado)	Cambotas
I	20 anos para 15m de vão	>400	>45	Seção Total; 3m de avanço	Nenhum	Nenhum	Nenhum
II	1 ano para 10m de vão	300-400	35-45	Seção total; 1 a 1,5m de avanço	Esporádicas	50mm no teto quando necessário	Nenhum
III	1 semana para 5m de vão	200-300	25-35	Seção parcial (frente e rebaixo); 1,5 a 3m de avanço	Sistemáticas	50 a 100mm no teto e 30mm nas paredes	Nenhum
IV	10 horas para 2,5m de vão	100-200	15-25	Seção parcial (frente e rebaixo); 1 a 1,5m de avanço	Sistemáticas	100 a 200mm no teto e 100mm nas paredes	Cambotas leves espaçadas de 1,5m
V	30 minutos para 1m de vão	<100	<15	Seções múltiplas; 0,5 a 1,5m de avanço	Sistemáticas	150 a 250mm no teto e 150mm nas paredes	Cambotas médias a pesadas de 0,75m. Fechamento na soleira



Observa-se que, exceto pelo tempo de auto-sustentação do maciço, as demais características são similares para as classes I e II, obtidas para os maciços de diabásio e arenito. A escavação é feita em seção plena, diferenciando-se apenas pelo avanço permitido. O avanço, entretanto, não é fator limitador pois, geralmente é feito a intervalos entre 1,5 a 2,0 metros por motivos construtivos.

Entretanto, as características geológico-geotécnicas do maciço de arenito não condizem com seu enquadramento na classe II ou, eventualmente, na classe I.

O arenito Aquidauana, apesar de pouco fraturado e, principalmente, com estrutura maciça, com acamamento pouco pronunciado, mostra-se pouco coerente. Quando submetido à atrito, desfaz-se com facilidade como mostrado nas Fotos 1 e 2, na qual vêem-se os sulcos produzidos na rocha pela vibração das mangueiras de borracha e outros dispositivos, utilizados em ensaios de perda d'água.



Fotos 1 e 2: Sulcos no arenito Aquidauana provocado pelo atrito causado com a vibração

Na classificação em conformidade com o perfil de intemperismo de Vaz (1996), o arenito seria enquadrado como R3 (RAM), ou seja, escavável por escarificação ou com picareta. O horizonte R3 tem sido associado, em projetos de obras subterrâneas, à classe IV de Bieniawski.

Essas características são confirmadas pelo baixo módulo de elasticidade, da ordem de 4 a 6 GPa, atribuído ao arenito, conforme dados de experiências anteriores,



uma vez que os ensaios ainda estão em andamento. Esses valores são muito distintos daqueles esperados para o diabásio, da ordem de 20 a 25 GPa.

Em conclusão, as características de coerência, resistência e deformabilidade do arenito Aquidauana indicam que sua classe RMR estaria situada, mais propriamente, entre III e IV, cuja pontuação varia de 40 a 60 pontos para a classe III e de 20 a 40 pontos para a classe IV.

A diferença observada entre o comportamento geomecânico previsto para o arenito Aquidauana e sua classe RMR pode ser atribuída à ausência de estruturas. De fato, analisando-se a Tabela 19, verifica-se que devido ao seu caráter maciço, a pontuação para os parâmetros de RQD, espaçamento e condições das juntas, foram iguais ou similares às aquelas obtidas para o diabásio.

A distinção entre as resistências do arenito e do diabásio e mesmo considerando as variações no espaçamento das descontinuidades, não foi suficiente para compensar o efeito da estrutura maciça do arenito.

## **9.2. Aplicação do Sistema RMR em Sondagens e em Superfícies de Escavação**

O caso 3 consta de avaliação da classe de maciço RMR por meio de duas metodologias. A primeira considerando os testemunhos de duas sondagens, SM-05 e SM-06 e a segunda classificando a frente de escavação, nas proximidades das mesmas sondagens.

A classificação RMR e outras podem ser aplicadas a mapeamento de superfícies rochosas, tanto naturais como de escavação. Apesar de, para a maioria dos parâmetros, ser mais fácil estimar os valores em superfícies, a avaliação do RQD fica prejudicada, uma vez que, este índice foi concebido para a aplicação em testemunhos de sondagem. Assim, o valor da pontuação para RQD é visualmente estimado em função do espaçamento das fraturas.

Os resultados obtidos com a aplicação RMR das sondagens e frentes de escavação estão sumarizados na Tabela 21.



Tabela 21: Resumo da classificação geomecânica nos testemunhos de sondagens e frentes de escavação do estudo de caso 3

Sondagem	RCU - Peso relativo	RQD - Peso relativo	Espaçamento Juntas - Peso relativo	Condições Juntas - Peso relativo	Água Subterrânea - Peso relativo	Orientação Descontinuidades - Peso relativo	Observações	RMR	CLASSE
Sondagens									
SM-05	9	20	20	20	7	-5		71	II
SM-06	12	20	20	22	7	-5	Ver nota	76	II
Frente de Escavação									
Área SM-05	12	13	10	16	7	-5		53	III
Área SM-06	4	3	5	12	7	-5	Ver nota	26	IV
Nota: Adotada a classe predominante com seus parâmetros médios									

Conforme indicado no item 8, a classificação RMR para a sondagem SM-05 revela apenas uma classe de maciço, tal como no mapeamento. No caso da SM-06, há apreciável variação do maciço rochoso, o que se confirma no mapeamento. Esses resultados mostram uma boa correlação entre as duas metodologias na avaliação da variabilidade do maciço, porém, não da sua qualidade.

Em ambos os casos, o mapeamento do maciço mostrou condições mais desfavoráveis do que a classificação das sondagens, passando, no caso da SM-05 de classe II para III e, no caso da SM-06, de classe II para IV.

Conforme indicado na Tabela 20, são muito distintas as características dos maciços das classes II e III e, principalmente, entre as classes II e IV, para fins de escavação e estabilidade.

No caso da SM-05, nota-se na Tabela 21 que a principal diferença na avaliação dos parâmetros diz respeito ao espaçamento e condições das juntas, o que por sua vez afetou o valor de RQD. Neste caso, portanto, a diferença na avaliação decorreu do maior e melhor acesso ao maciço permitido pelo mapeamento. Estudos posteriores podem indicar se esta redução na qualidade do maciço com o mapeamento é esporádica ou usual.

No caso da SM-06, o maciço apresenta uma redução de 50 pontos entre a classificação da sondagem e da frente de escavação. Essa diferença ocorreu em todos os parâmetros, exceto água subterrânea e orientação das descontinuidades, sendo mais notável no RQD (20 para 3) e no espaçamento das juntas (22 para 5). Aparentemente, a melhor apreciação do maciço teria permitido essa diferença, entretanto, a diferença é elevada e não compatível com o sistema de classificação.



Uma outra possibilidade reside exatamente na complexidade do maciço em relação à alteração intempérica revelada pela sondagem e pelo mapeamento. Na classificação da sondagem (ver Tabela 17) foram identificados dois trechos de classe V, equivalente a solo e no mapeamento uma zona (ver Tabela 18) também constituída por solo.

Dessa forma, é possível que a sondagem tenha atravessado uma zona de maciço de melhor qualidade, deixando de apreciar que a presença de solo poderia induzir a um comportamento muito pior do maciço.

## **10. Proposições Preliminares**

Conforme a análise dos dados, no caso de rochas brandas, a classificação de Bieniawski não traduz seu comportamento geomecânico. A mesma situação, ocorre aparentemente, com rochas duras submetidas a processos complexos de alteração intempérica.

Dessa forma, propostas preliminares foram consideradas para a adaptação do Sistema RMR para casos similares. Vários autores têm apresentado sugestões de adaptações do sistema, sendo que o próprio Bieniawski (1988) reconhece 16 contribuições importantes para o aperfeiçoamento do Sistema RMR, até 1988.

As propostas a seguir foram formuladas apenas a nível conceitual, uma vez que, para avaliar seu desempenho é necessária a sua aplicação em dezenas de casos. Entretanto, houve interesse em avaliar os efeitos do aumento do peso conferido à RCU (Alternativa 1) e utilizar diferentes tabelas de pontuação para tipos litológicos distintos (Alternativa 2). Na elaboração das propostas foram mantidas as características principais do Sistema RMR de forma a permitir a comparação.

### **a) Alternativa 1:**

A primeira alternativa consiste em modificar a relação de porcentagem de influência dos parâmetros da rocha em relação aos parâmetros descontinuidades, atribuindo pesos maiores para o parâmetro RCU e considerando modificações de acordo com a natureza da rocha (ígneia, sedimentar, metamórfica branda ou dura).



Cabe salientar que, segundo Kirsten (1988), a resistência da rocha é uma consideração dominante para os problemas de escavação de maciços rochosos, sendo a pontuação máxima de 15 pontos para a RCU considerada insuficiente.

Price (1993) prefere dar um peso maior para o parâmetro alteração do material que para as descontinuidades. Os pesos que ele propõe em seu artigo são definidos em função de sua experiência e do que representa o maciço rochoso alterado para as obras de engenharia.

- *Se rocha ígnea ou metamórfica dura;*

Propõe-se a utilização da Tabela 22 para a classificação geomecânica de rochas ígneas, com o peso máximo para os valores de RCU igual a 30 pontos. Para as descontinuidades, o peso máximo é de 40 pontos, sendo 15 para espaçamento e 25 para as condições das descontinuidades. Pode-se ainda continuar utilizando o parâmetro RQD com sua pontuação normal de 20 pontos, já que traduz um parâmetro tanto para descontinuidades quanto para rocha. A pontuação para o parâmetro água foi reduzida para 10 pontos. O fator de correção para a orientação das descontinuidades em relação ao túnel não foi modificado.

- *Se rocha branda, sedimentar ou metamórfica;*

As propostas de alterações para classificação de rochas brandas podem ser visualizadas na Tabela 23.

Sugere-se uma redução para o parâmetro RCU de forma a considerar que as rochas brandas são menos resistentes à alterabilidade, abrasão e muito mais susceptíveis à deformabilidade.

Foram também alterados os pesos dos outros parâmetros (RQD, espaçamento médio das fraturas, condições das descontinuidades), de forma tal que, a pontuação máxima não ultrapassasse o total de 60 pontos, correspondente à classe III.



Tabela 22: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas ígneas

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Carga Puntiforme	>10 MPa	4-10MPa	2-4MPa	1-2MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Pesos		30	20	10	5	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm		
	Pesos		15	10	8	5	2		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 5)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm		
	Pesos		25	20	15	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento de túnel	nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relação pressão de água x tensão principal máxima	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	completamente seco	água intersticial	úmido	gotejamento	fluxo abundante		
	Pesos		10	8	6	4	0		
Recomendações para caracterizar as condições das descontinuidades									
Comprimento da descontinuidades (persistência)			<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
Peso			5	3	2	1	0		
Separação (abertura)			Nenhuma	<0,1m	0,1 -1,0m	1-5m	>5m		
Peso			5	4	3	1	0		
Rugosidade			Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada		
Peso			5	4	2	1	0		
Preenchimento			Nenhum	Duro <5mm	Duro >5mm	Mole <5mm	Mole >5mm		
Peso			5	3	2	1	0		
Alteração			Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decomposta		
Peso			5	4	3	1	0		



Tabela 23: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas brandas

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Carga Puntiforme	>10 MPa	4-10MPa	2-4MPa	1-2MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Pesos		15	10	5	3	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	Pesos		10	8	6	4	2		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm		
	Pesos		10	7	5	3	1		
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 5)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm		
	Pesos		15	12	8	5	0		
5	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento de túnel	nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relação pressão de água x tensão principal máxima	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	completamente seco	água intersticial	úmido	gotejamento	fluxo abundante		
	Pesos		10	8	6	4	0		

Recomendações para caracterizar as condições das descontinuidades					
Comprimento da descontinuidades (persistência)	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Peso	3	2	1	0	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1m	0,1-1,0m	1-5m	>5m
Peso	3	2	1	0	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
Peso	3	2	1	0	0
Preenchimento	Nenhum	Duro <5mm	Duro >5mm	Mole <5mm	Mole >5mm
Peso	3	2	1	0	0
Alteração	Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decompоста
Peso	3	2	1	0	0



**b) Alternativa 2:**

A segunda alternativa consiste em utilizar, ao invés do parâmetro RCU, uma tabela que atribui pesos para os horizontes de alteração dependendo, ainda, do tipo litológico (se rochas ígneas, metamórficas duras, ou brandas sedimentares e metamórficas). Nessa proposta, suprimiu-se o parâmetro espaçamento médio das fraturas, já que conforme citado no item 6.1.2 (página 28), parece haver na classificação uma dupla pontuação decorrente de um mesmo fator, pois o parâmetro RQD e o parâmetro espaçamento médio das juntas procuram refletir uma única condição, referente à densidade volumétrica das descontinuidades, ou seja, o estado de compartimentação do maciço.

Além disso, acrescenta-se um novo parâmetro ligado à rocha, que seriam as estruturas internas como xistosidade, estratificação e foliação, que não são levadas em consideração nas classificações atuais.

Esta alternativa procura reduzir os problemas com as medidas de RCU, já que considera ao invés da RCU, o tipo de rocha, incluindo se ela é foliada ou não e seu grau de alteração.

Price (1993) publicou um artigo que considera pesos relativos para o parâmetro alteração de rocha e conclui que esses pesos podem ser utilizados de alguma forma nas classificações geomecânicas atuais.

- *Se rocha ígnea;*

Price (1993) considera em sua classificação um valor total de 140 pontos para as rochas ígneas, sendo 80 referente ao parâmetro alteração e 60 referente às descontinuidades.

Com algumas adaptações e avaliando a proporção dos pesos relativos considerados no Sistema RMR, propõe-se, no caso de rochas ígneas, que se utilize a pontuação máxima de 40 pontos para o parâmetro alteração e a pontuação máxima de 30 pontos para as descontinuidades. Os valores de água continuam com o máximo de 10 pontos e outros valores como RQD e ajuste por orientação das descontinuidades permanecem os originais (Tabela 24).



Tabela 24: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas ígneas

Parâmetros			Coeficientes				
1	Alteração		RS ou R1	RAD ou R2	RAM ou R3	SA ou S2	
	Pesos		40	25	10	0	
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%
	Pesos		20	17	13	8	3
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 5)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm
	Pesos		30	25	20	10	0
5	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento de túnel	nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
		Relação pressão de água x tensão principal máxima	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
		Condições gerais	completamente seco	água intersticial	úmido	gotejamento	fluxo abundante
	Pesos		10	8	6	4	0

Recomendações para caracterizar as condições das descontinuidades					
Comprimento da descontinuidades (persistência)	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1m	0,1 -1,0m	1-5m	>5m
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro <5mm	Duro >5mm	Mole <5mm	Mole >5mm
Peso	6	4	2	2	0
Alteração	Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decompоста
Peso	6	5	3	1	0

- Se rocha metamórfica dura;

Os mesmos pesos e parâmetros utilizados nas rochas ígneas são aqui utilizados, com exceção da inclusão do parâmetro estrutura interna que desconta pontos, de acordo com uma descrição qualitativa das estruturas (Tabela 25).



Tabela 25: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas metamórficas duras

Parâmetros		Coeficientes				
1	Alteração	RS ou R1	RAD ou R2	RAM ou R3	SA ou S2	
	Pesos	40	25	10	0	
2	RQD	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%
	Pesos	20	17	13	8	3
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 5)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm
	Pesos	30	15	12	8	0
5	Estruturas internas (foliação, estratificação, etc)	Esparsas, incipientes	Moderadas, definidas	Bem definidas	Frequentes	
	Pesos	-2	-4	-6	-10	
6	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento de túnel	nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min
		Relação pressão de água x tensão principal máxima	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5
		Condições gerais	completamente seco	água intersticial	úmido	gotejamento
	Pesos	10	8	6	4	0
Recomendações para caracterizar as condições das descontinuidades						
Comprimento da descontinuidades (persistência)		<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Peso		6	4	2	1	0
Separação (abertura)		Nenhuma	<0,1m	0,1 - 1,0m	1-5m	>5m
Peso		6	5	4	1	0
Rugosidade		Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
Peso		6	5	3	1	0
Preenchimento		Nenhum	Duro <5mm	Duro >5mm	Mole <5mm	Mole >5mm
Peso		6	4	2	2	0
Alteração		Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decompоста
Peso		6	5	3	1	0

- Se rocha branda, seja sedimentar ou metamórfica;

Para este grupo de rocha, Price (1993) considera como peso máximo do parâmetro alteração 40 pontos e 60 pontos para as descontinuidades, sendo metade referente às condições das fraturas e a outra metade referente aos planos de foliação ou estratificação. Fazendo as adaptações necessárias para utilização no Sistema RMR, considerou-se como pontuação máxima ao parâmetro alteração um total de 20 pontos, enquanto 30 pontos seriam reservados para as descontinuidades, sendo



metade para as estruturas da rocha e metade para as condições das fraturas (Tabela 26).

Tabela 26: Modificações no Sistema RMR para classificação geomecânica de rochas brandas

Parâmetros			Coeficientes				
1	Alteração		RS ou R1	RAD ou R2	RAM ou R3	SA ou S2	
	Pesos		10	8	5	0	
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%
	Pesos		10	8	6	2	1
4	Condição das descontinuidades (ver Tabela 5)		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou preenchimento com espessura <5mm ou juntas contínuas com separação 1-5mm	Preenchimento mole com espessura >5mm ou juntas contínuas com separação >5mm
	Pesos		15	12	10	6	0
5	Estruturas internas (foliação, estratificação, etc)		Esparsas, incipientes	Moderadas, definidas	Bem definidas	Frequentes	
	Pesos		15	8	4	0	
6	Presença de água	Caudal por 10m de comprimento de túnel	nenhum	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min
		Relação pressão de água x tensão principal máxima	0	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
		Condições gerais	completamente seco	água intersticial	úmido	gotejamento	fluxo abundante
	Pesos		10	8	6	4	0

Recomendações para caracterizar as condições das descontinuidades					
Comprimento da descontinuidades (persistência)	<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
Peso	3	2	1	0	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1m	0,1 -1,0m	1-5m	>5m
Peso	3	2	1	0	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
Peso	3	2	1	0	0
Preenchimento	Nenhum	Duro <5mm	Duro >5mm	Mole <5mm	Mole >5mm
Peso	3	2	1	0	0
Alteração	Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decomposta
Peso	3	2	1	0	0



## 11. Validação das Alternativas de Modificações

A seguir estão apresentadas as tabelas com a reclassificação geomecânica dos trechos de túneis para os três estudos de casos. Foram consideradas as modificações propostas nas alternativas 1 e 2, tanto para os testemunhos de sondagem como para as frentes de escavação.

### a) Alternativa 1:

Tabela 27: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso N° 1

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº1																		
Trechos Homogêneos																		
Sondagem	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		G		H	
	DE	ATÉ	RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espaçamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo	Observações	RMR	CLASSE	
SM-01	12	30,29	60	5	100	10	0,6-2m	7	-	15	Seco	10	Regular	-5		42	III	
SM-02	83	104	60	5	100	10	60-200mm	5	-	15	Seco	10	Regular	-5		40	IV-III	

Tabela 28: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso N° 2

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº2																		
Trechos Homogêneos																		
Sondagem	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		G		H	
	DE	ATÉ	RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espacamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo	Observações	RMR	CLASSE	
SM-03	63	84	200	20	98	20	>2m	15	-	25	Seco	10	Regular	-5		85	I	
SM-04	58	79	200	20	98	20	0,6-2m	10	-	25	Seco	10	Regular	-5		80	I-II	



Tabela 29: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 3

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº3																	
Sondagem	Intervalo (m)		Trechos Homogêneos														
	DE	ATÉ	A		B		C		D		E		F		Observações	RMR	CLASSE
			RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espaçamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo			
SM-05	35	44	110	15	100	20	>2m	15	53134	16	Úmido	6	Regular	-5		67	II
SM-06	34,00	37,38	100	10	44	8	>2m	15	53154	18	Úmido	6	Regular	-5		52	II
	37,38	39,82	180	20	100	20	>2m	15	-	30	Úmido	6	Regular	-5		86	I
	39,82	40,28	30	5	-	-	<60mm	2	-	0	Úmido	6	Regular	-5	Pequeno trecho	8	V
	40,28	41,35	180	20	100	20	>2m	15	53154	18	Úmido	6	Regular	-5		74	II
	41,35	41,89	50	5	-	-	<60mm	2	-	0	Úmido	6	Regular	-5	Pequeno trecho	8	V
	41,89	43,00	100	10	96	20	>2m	15	53154	18	Úmido	6	Regular	-5		64	II

Tabela 30: Reclassificação Geomecânica RMR para as frentes de escavação do Estudo de Caso Nº 3

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº3																			
Trechos Homogêneos																			
Frente de Escavação Próxima à Sondagem Nº	Intervalo (m)		ZONAS	A		B		C		D		E		F		G		H	
	DE	ATÉ		RCU	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Espaçamento Juntas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo	Observações	RMR		CLASSE
SM-05	35	41,5	A	150	15	50-75	13	300mm	8	33223	13	Úmido	6	Regular	-5		50	III	
SM-06	34	40,5	A	30	5	<25	3	100mm	5	33111	9	Úmido	6	Regular	-5		23	IV	
			B	100	10	25-50	8	100mm	5	33113	11	Úmido	6	Regular	-5		35	IV	
			C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## b) Alternativa 2:

Tabela 31: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 1

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº1																		
Trechos Homogêneos																		
Sondagem	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		G		H	
	DE	ATÉ	Alteração	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Estruturas Internas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo	Observações	RMR	CLASSE	
SM-01	12	30,29	RS	10	100	10	Esparsas	15	-	15	Seco	10	Regular	-5		55	III	
SM-02	83	104	RS	10	100	10	Moderadas	8	-	15	Seco	10	Regular	-5		48	III	



Tabela 32: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 2

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº2														
Sondagem	Trechos Homogêneos													
	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		Observações	RMR
	DE	ATÉ	Alteração	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo		
SM-03	63	84	RS	40	98	20	-	30	Seco	10	Regular	-5		95
SM-04	58	79	RS	40	98	20	-	30	Seco	10	Regular	-5		95

Tabela 33: Reclassificação Geomecânica RMR para os testemunhos de sondagem do Estudo de Caso Nº 3

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº3																
Sondagem	Trechos Homogêneos															
	Intervalo (m)		A		B		C		D		E		F		Observações	RMR
	DE	ATÉ	Alteração	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Estruturas Internas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo		
SM-05	35	44	RAD/RS	30	100	20	Frequentes	-6	64145	20	Úmido	6	Regular	-5		65
SM-06	34,00	37,38	RAD/RAM	20	44	8	Frequentes	-6	64165	22	Úmido	6	Regular	-5		45
	37,38	39,82	RS/RAD	35	100	20	Frequentes	-6	-	30	Úmido	6	Regular	-5		80
	39,82	40,28	RAM	10	-	-	Frequentes	-6	-	0	Úmido	6	Regular	-5	Pequeno trecho	5
	40,28	41,35	RS/RAD	35	100	20	Frequentes	-6	64165	22	Úmido	6	Regular	-5		72
	41,35	41,89	RAD/RAM	15	-	-	Frequentes	-6	-	0	Úmido	6	Regular	-5	Pequeno trecho	10
	41,89	43,00	RAD	25	96	20	Frequentes	-6	64165	22	Úmido	6	Regular	-5		62

Tabela 34: Reclassificação Geomecânica RMR para as frentes de escavação do Estudo de Caso Nº 3

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR NO TRECHO DO TÚNEL - ESTUDO DE CASO Nº3																
Frente de Escavação Próxima à Sondagem Nº	Trechos Homogêneos															
	Intervalo (m)		ZONAS	A		B		C		D		E		F		Observações
	DE	ATÉ		Alteração	Peso relativo	RQD	Peso relativo	Estruturas Internas	Peso relativo	Condições Juntas	Peso relativo	Água Subterrânea	Peso relativo	Orientação Descontinuidades	Peso relativo	
SM-05	35	41,5	A	RS	30	50-75	13	Moderadas	-4	44323	16	Úmido	6	Regular	-5	
SM-06	34	40,5	A	RAM/RAD	15	<25	3	Frequentes	-6	44121	12	Úmido	6	Regular	-5	
			B	RAD/RAM	20	25-50	8	Frequentes	-6	44123	14	Úmido	6	Regular	-5	
			C	SA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	



## 12. Conclusões

A Tabela 35 apresenta o resumo comparativo dos valores obtidos para os parâmetros considerados na classificação de Bieniawski e nas alternativas de modificações propostas.

Tabela 35: Resumo comparativo dos parâmetros considerados na classificação de Bieniawski e nas alternativas propostas

Números de sondagens		Classificações																		
			RCU	Peso	Alteração	Peso	RQD	Peso	Espaçamento	Peso	Estruturas internas	Peso	Condições	Peso	Água	Peso	Orientação	Peso	RMR	CLASSE
Testemunhos de sondagens	SM-01 arenito	BIENIAWSKI 1989	60	7	xxx	xxx	100	20	0,6-2	15	xxx	xxx	-	30	Seco	15	Raz	-5	82	I
		ALTERNATIVA 1	60	5	xxx	xxx	100	10	0,6-2	7	xxx	xxx	-	15	Seco	10	Raz	-5	42	III
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RS	10	100	10	XXX	xxx	Esparsas	15	-	15	Seco	10	Raz	-5	55	III
	SM-02 arenito	BIENIAWSKI 1989	60	7	xxx	xxx	100	20	60-200	8	xxx	xxx	-	30	Seco	15	Raz	-5	75	II
		ALTERNATIVA 1	60	5	xxx	xxx	100	10	0,6-2	5	xxx	xxx	-	15	Seco	10	Raz	-5	40	III-IV
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RS	10	100	10	xxx	xxx	Moderadas	8	-	15	Seco	10	Raz	-5	48	III
	SM-03 diabásio	BIENIAWSKI 1989	200	12	xxx	xxx	98	20	>2	20	xxx	xxx	-	30	Seco	15	Raz	-5	92	I
		ALTERNATIVA 1	200	20	xxx	xxx	98	20	<2	15	xxx	xxx	-	25	Seco	10	Raz	-5	85	I
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RS	40	98	20	xxx	xxx	xxx	xxx	-	30	Seco	10	Raz	-5	95	I
	SM-04 diabásio	BIENIAWSKI 1989	200	12	xxx	xxx	98	20	0,6-2	15	xxx	xxx	-	30	Seco	15	Raz	-5	85	I
		ALTERNATIVA 1	200	20	xxx	xxx	98	20	0,6-2	10	xxx	xxx	-	25	Seco	10	Raz	-5	80	I-II
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RS	40	98	20	xxx	xxx	xxx	xxx	-	30	Seco	10	Raz	-5	95	I
	SM-05 gnaíse	BIENIAWSKI 1989	110	9	xxx	xxx	100	20	>2	20	xxx	xxx	-	20	Úmido	7	Raz	-5	71	II
		ALTERNATIVA 1	110	15	xxx	xxx	100	20	>2	15	xxx	xxx	-	16	Úmido	6	Raz	-5	67	II
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RAD/RS	30	100	20	xxx	xxx	Frequentes	-6	-	20	Úmido	6	Raz	-5	65	II
	SM-06 gnaíse	BIENIAWSKI 1989	180	12	xxx	xxx	100	20	>2	20	xxx	xxx	-	22	Úmido	7	Raz	-5	79	II
		ALTERNATIVA 1	180	20	xxx	xxx	100	20	>2	15	xxx	xxx	-	18	Úmido	6	Raz	-5	74	II
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RS/RAD	35	100	20	xxx	xxx	Frequentes	-6	-	22	Úmido	6	Raz	-5	72	II
Frentes de escavação	Área SM-05	BIENIAWSKI 1989	150	12	xxx	xxx	50-75	13	300 mm	10	xxx	xxx	-	16	Úmido	7	Raz	-5	53	III
		ALTERNATIVA 1	150	15	xxx	xxx	50-75	13	300 mm	8	xxx	xxx	-	13	Úmido	6	Raz	-5	50	III
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RS	30	50-75	13	xxx	xxx	Moderadas	-4	-	16	Úmido	6	Raz	-5	56	III
	Área SM-06	BIENIAWSKI 1989	30	4	xxx	xxx	<25	3	100 mm	5	xxx	xxx	-	12	Úmido	7	Raz	-5	26	IV
		ALTERNATIVA 1	30	5	xxx	xxx	<25	3	100 mm	5	xxx	xxx	-	9	Úmido	6	Raz	-5	23	IV
		ALTERNATIVA 2	xxx	xxx	RAD/RAM	15	<25	3	xxx	xxx	Frequentes	-6	-	12	Úmido	6	Raz	-5	25	IV

No caso do arenito verificou-se que, por se tratar de litologia com estrutura maciça, apenas o parâmetro RCU foi afetado, quando comparado com o diabásio, também pouco fraturado.

Como não é considerado, na classificação de Bieniawski, nenhum parâmetro associado à redução da resistência em função do tipo litológico ou de alteração intempérica, a menor resistência do arenito, medida apenas pela RCU, foi insuficiente para reduzir sua classificação.



Nota-se, por outro lado, que para rochas duras, como o diabásio e o gnaiss, o Sistema RMR apresenta resultados consistentes e similares.

No tocante à diferença observada nas metodologias de classificação de testemunhos e de superfícies de escavação, ficou confirmada a melhor avaliação do maciço em superfícies, nas quais a inspeção abrange área maior.

A proposta da alternativa 1 para a modificação do Sistema RMR consta basicamente do aumento de 15 para 30 pontos do parâmetro RCU em rochas duras e limitação da pontuação total em 60 pontos para rochas brandas. Observa-se na Tabela 35 que o maciço de arenito passou para classe III, enquanto o de diabásio permaneceu na classe I e o gnaiss ficou na classe II. Esse novo enquadramento está mais compatível com as características geomecânicas desses maciços. Ainda conforme a Tabela 35, a alternativa 1 apresenta resultados consistentes quando aplicada em mapeamento da frente de escavação. A proposta da alternativa 1 é simples e facilmente aplicável, não introduzindo modificações acentuadas no Sistema RMR.

A proposta da alternativa 2 é mais complexa e, além de requerer tabelas específicas para tipos litológicos distintos, implica na substituição do parâmetro RCU pela avaliação do grau de alteração associado à resistência e na substituição do espaçamento de juntas por estruturas internas.

Conforme a Tabela 35, as modificações permitiram uma caracterização mais adequada do arenito e mantiveram a mesma pontuação para o diabásio. Entretanto, para rochas duras e foliadas, como o gnaiss, não houve distinção tanto na aplicação em sondagens como em superfícies entre o sistema original e as duas alternativas propostas.

Dessa forma, em síntese, pode-se concluir que o Sistema RMR responde adequadamente para rochas duras, foliadas ou não, já que duas alternativas foram testadas e mostraram resultados similares àqueles do sistema original. Entretanto, para rochas brandas são convenientes adaptações no Sistema RMR, sendo a alternativa 1, das duas testadas, a mais conveniente por ser mais facilmente aplicável.

As alternativas de modificações propostas mostram-se eficazes para os casos apresentados, tanto para os testemunhos de sondagens como para as frentes de escavação, indicando o interesse em aprofundar os estudos dessas alternativas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, A. P. 2001. Apostila de Geotecnia Aplicada à Mineração. Universidade de Brasília, UNB, 94p.
- BARTON, N.; LIEN, R. & LUNDE, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanical*, **6** (4): 183-236.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *The Civil Engineer in South Africa*, **15**: 335-343.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1976. Rock Mass Classification of Jointed Rock Masses. Exploration for Rock Engineering, ed. Z.T. Bieniawski, A.A. Balkema, Johannesburg. 97-106p.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1988. The Rock Mass Rating (RMR) System (Geomechanics Classification) in Engineering Practice. In: KIRKALDIE, L. ed. *Rock Classification Systems For Engineering Purposes*. ASTM SPT 984. ASTM, Philadelphia. p. 17-31.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. New York, John Wiley, 251p.
- COUTINHO, J.M.V. 1972. Petrologia do Pré-Cambriano em São Paulo e Arredores. *Boletim do IG-USP*, **3**: 5-99.
- DEERE, D.U. 1964. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. *Rock Mech Eng. Geol.* **1**, 17-22p.
- DEERE, D.U. & DEERE, D.W. 1988. The Rock Quality Designations (RQD) Index in Practice In: KIRKALDIE, L. ed. *Rock Classification Systems For Engineering Purposes*. ASTM SPT 984. ASTM, Philadelphia. p. 91-101.
- DEERE, D. U. & PATTON, F.D. 1971. Slope Stability in Residual Soils. In: PANAMERICAN CONFERENCE SOIL MECH., Porto Rico, v.1, p.87-170.



- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO (EMPLASA). 1980. *Mapa Geológico da Grande São Paulo*. São Paulo, EMPLASA (2 folhas – Escala: 1:100.000)
- FRANCIS, F.O. & ROCHA, H.C. (1998). Obras Subterrâneas Civis. In: OLIVEIRA, A.M. & BRITO, S.N. ed. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, FAPESP, CNPq. p.439-456.
- GUIDICINI, G.; OLIVEIRA, A.M.S.; CAMARGO, F.P.; KAJI, M.. 1972. Um Método de Classificação Geotécnica Preliminar de Meios Rochosos. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, São Paulo, v.4, p.275-282.
- HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. 1976. Evolução Geológica do Pré-Cambriano na Região do Sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 6 (3): 182-200.
- HOEK, E. & BROWN, E.T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527p.
- HOEK, E. & BROWN, E.T. 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8): 1165-1186.
- HOEK, E. 1998. *Rock Engineering – The Application of Modern Techniques to Underground Design*. CBMR-Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas, São Paulo, 268p.
- HOEK, E. 2000. *Rock Practical Engineering*. Edition by Dr. E. Hoek, 328p.  
Disponível em: <http://www.rocscience.com/roc/Hoek/Hoek.htm>
- JANASI, V.A.; VASCONCELOS, A.C.B.C.; VLACH, S.R.F., MONTIDOME, M.J. 1990. Granitóides da Região entre as Cidades de São Paulo e Piedade (SP): faciologia e contexto tectônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, 1990. SBG, v.4, p. 1925-1935.
- KIRSTEN, P.O. 1988. Discussion of The Rock Quality Designations (RQD) Index in Practice In: KIRKALDIE, L. ed. *Rock Classification Systems For Engineering Purposes*. ASTM SPT 984. ASTM, Filadelfia. p. 32-34.



- LINS, P.G. 2001. Classificação de Maciços Rochosos: Uma Abordagem por Redes Neurais. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 167p.+anexos.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCNEIDER. R.L. 1994. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 8(1): 69-82.
- OJIMA, L.M. 1982. A utilização de Classificações de Maciços Rochosos para Construção de Túneis. In: SIMPÓSIO SOBRE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS, 1. Rio de Janeiro. 1982. *Anais*, Rio de Janeiro, ABGE. v.I, p.23-32.
- OLIVEIRA, D.G. 2000. Estudo Geológico-Geotécnico de Maciços Rochosos: Levantamento Sistemático e Caracterização da Distribuição de Descontinuidades em Taludes. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 48p. + anexos.
- PRICE, D.G. 1993. A Suggested Method for the Classification of Rock Mass Weathering by a Ratings System. *Quarterly Journal of Engineering & Hydrogeology*. 26(1): 69-76.
- REDONDO, F. 2003. Classificação Probabilística do Padrão Geomecânico de um Maciço Rochoso Mineralizado com Base no Índice RQD. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, UNESP Rio Claro, 80p.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 256p.
- RUIZ, M. D. & GUIDICINI, G. 1998. Introdução. In: OLIVEIRA, A.M. & BRITO, S.N. ed. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, FAPESP, CNPq. p.1-5.
- SERRA, E. & OJIMA, L. M. 1998. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: OLIVEIRA, A.M. & BRITO, S.N. ed. *Geologia de Engenharia*. São Paulo, ABGE, FAPESP, CNPq. p.211-226.



- VAZ, L.F. 1969. Estudo geológico de barragens. In: 1ª SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 1. São Paulo, 1969.
- VAZ, L.F. 1982. Aplicabilidade de Investigações e Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos para Obras Subterrâneas. In: SIMPÓSIO SOBRE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS, 1. Rio de Janeiro. 1982. *Anais*, Rio de Janeiro, ABGE. v.I, p.1-21.
- VAZ, L.F. 1996. Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rochas em Regiões Tropicais. Solos e Rochas, ABMS-ABGE, vol. 19, n.2, p. 117-136.
- WICKHAM, G.E.; TIEDEMANN, H.R. & SKINNER, E.H. 1972. Support Determination based on Geologic Predictions. Proc. Rapid Excav. Tunneling Conf., AIME, New York, 43-46p.

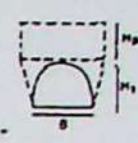


# **ANEXOS - PARTE 1**

Figuras e tabelas da revisão  
bibliográfica



Condições da rocha	$H_p$	Observações
1. Dura e intacta	Zero	Requer suporte leve somente em condições de queda de blocos causada por explosivos ou quando ocorre "explosão de rocha"
2. Dura estratificada ou xistosa	0-0,5	Suporte leve
3. Maciça, moderadamente fraturada	0 – 0,25 B	Carda pode variar erráticamente de ponto para ponto
4. Moderadamente compartimentada	0,25 B – 0,35 (B+H <sub>t</sub> )	Não há pressões laterais
5. Muito compartimentada	0,35 – 1,10 (B+H <sub>t</sub> )	Pequenas pressões laterais ou mesmo sem pressões
6. Completamente esmagada mas quimicamente intacta	1,10 (B+H <sub>t</sub> )	Considerável pressão lateral. Requer suporte contínuo de cambotas
7. Pouco expansiva, profundidade média	1,10 – 2,10 (B+H <sub>t</sub> )	Pressão lateral elevada, requer arco invertido. Cambotas circulares são recomendadas
8. Pouco expansiva, profundidade elevada	2,10 – 4,50 (B+H <sub>t</sub> )	
9. Rocha expansiva	Acima de 250 pés, independente do valor de (B+H <sub>t</sub> )	Cambotas circulares são requeridas. Em casos extremos usa-se suportes flexíveis



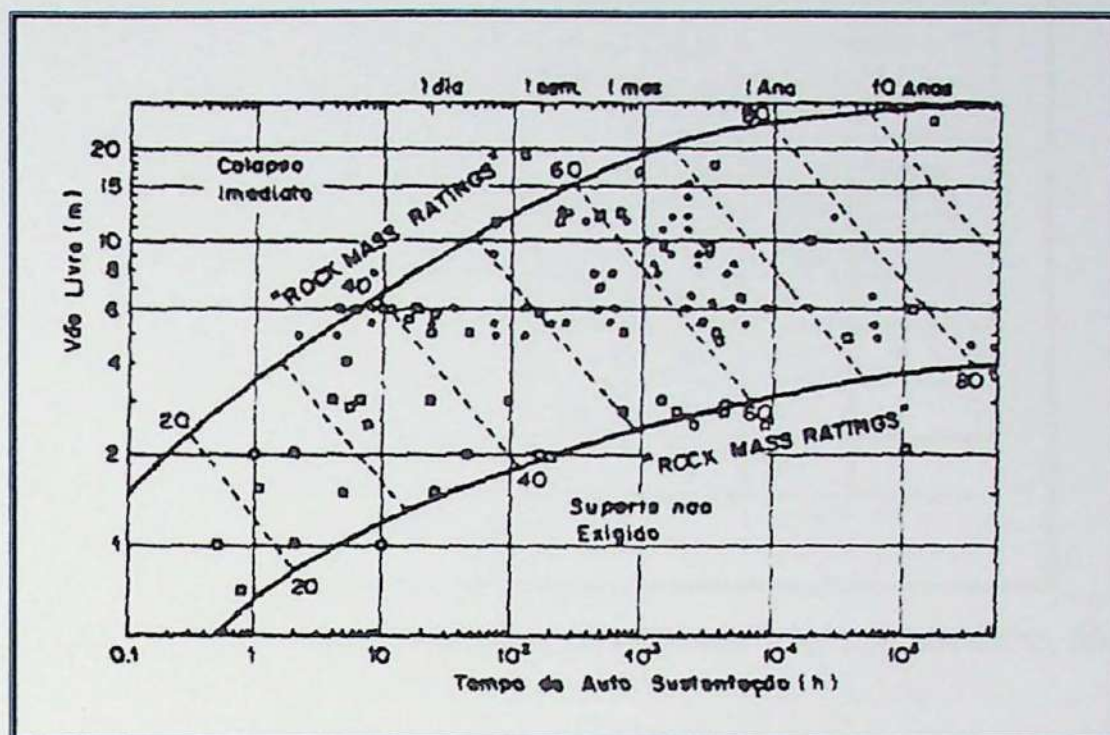
$B$  = Largura  
 $H_t$  = Altura  
 Solicitação =  $H_p \times p.e. da rocha$   
 Condições válidas para recobrimento acima de 1,5 (B+H<sub>t</sub>)  
 Obs: nível de água acima do teto

Anexo 1: Classificação de Terzaghi – 1946 (HOEK E BROWN , 1980)

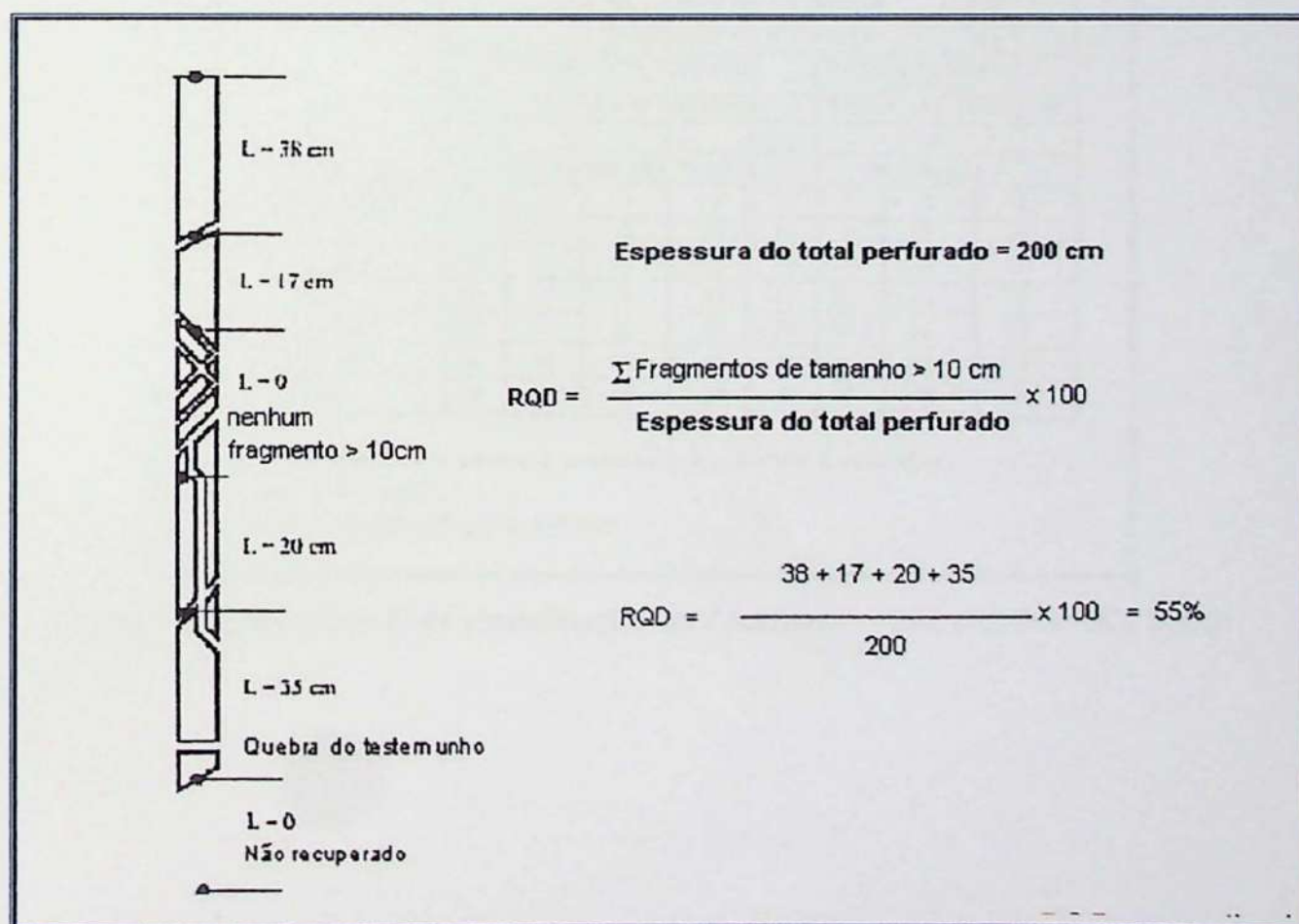
Tipo de maciço	Estabilidade do maciço	Tipo de revestimento
A	Estável	Sem revestimentos
B	Frágil	Proteção do teto
C	Muito frágil	Revestimento de teto
D	Friável	Revestimento ligeiro de madeira
E	Muito friável	Revestimento de madeira de resistência média
F	Sujeito a pressões elevadas	Revestimento de madeira deslizante sem revestimento de frente
G	Sujeito a pressões muito elevadas	Revestimento de madeira deslizante com revestimento de frente

Anexo 2: Classificação de Lauffer – 1958 (OJIMA, 1982)





Anexo 3: Sistema proposto por Lauffer baseado no tempo de auto-sustentação para um certo vão de escavação livre (BIENIAWSKI, 1976)



Anexo 4: Procedimentos para a determinação do *Rock Quality Designation* – RQD (DEERE, 1988)



Parâmetro A					Valor máximo 30			
Características geológicas gerais								
Tipo de rocha					Estruturas geológicas			
	a	b	c	d	Maciça	Pouco dobrada ou fraturada	Medianamente dobrada ou fraturada	Intensamente dobrada ou fraturada
Ígnea	1	2	3	4				
Metamórfica	1	2	3	4				
Sedimentar	2	3	4	4				
Tipo 1					30	22	15	9
Tipo 2					27	20	13	8
Tipo 3					24	18	12	7
Tipo 4					19	15	10	6

a = dura; b = média; c = mole; d = decomposta

Anexo 5.1: Parâmetro A da classificação de Wickham – 1972 (REDONDO, 2003)

Parâmetro B									Valor máximo 45	
Características da fraturação										
Orientação da escavação										
Direção normal ao eixo						Direção paralela ao eixo				
Orientação da escavação						Orient. da escavação				
						a				
Inclinação das fraturas						Inclinação				
Espaçamento entre fraturas (cm)	1	2	3	2	3	1	2	3		
	3	9	11	13	10	12	9	9	7	
	3-15	13	16	19	15	17	14	14	11	
	15-25	23	24	28	19	22	23	23	19	
	25-54	30	32	36	25	28	30	28	24	
	54-108	36	38	40	33	35	36	34	28	
	108	40	43	45	37	40	40	38	34	

a = inclinação para e contra a escavação; b = contra a escavação;  
c = para a escavação.  
1 = 20° ; 2 = 20°-50° ; 3 = 50°-90°

Anexo 5.2: Parâmetro B da classificação de Wickham – 1972 (REDONDO, 2003)



Parâmetro C						Valor máximo
Condições de água						25
Características das fraturas						
(1002) litros / m <sup>2</sup> / 30s	Soma dos parâmetros A + B					
	13 - 44			45 - 75		
	Características das fraturas*					
	1	2	3	1	2	3
nulo	27	18	12	25	22	18
pequeno (-760)	19	15	9	23	19	14
médio (760-3800)	15	11	7	21	16	12
elevado (>3800)	10	8	6	18	14	10

- 1 - fechadas ou cimentadas; 2 - pouco alteradas  
3 - muito alteradas ou abertas

Anexo 5.3: Parâmetro C da classificação de Wickham – 1972 (REDONDO, 2003)

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Rock Quality Designation"		R.Q.D.	
A.	Muito mau	0-25	1. Quando o RQD for < 10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q 2. Intervalos de 5 no RQD têm precisão suficiente (100, 95, 90, ...)
B.	Mau	25-50	
C.	Médio	50-75	
D.	Bom	75-90	
E.	Muito bom	90-100	

Anexo 6.1: Designação da qualidade de rocha de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)



Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Joint set number"		$J_n$	
A.	Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0,5 - 1,0	1. Nas intersecções utilizar $3 \times J_n$  2. Nas embocaduras utilizar $2 \times J_n$
B.	Uma família de descontinuidades	2	
C.	Uma família mais descontinuidades esparsas	3	
D.	Duas famílias de descontinuidades	4	
E.	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6	
F.	Três famílias de descontinuidades	9	
G.	Três famílias mais descontinuidades esparsas	12	
H.	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fracturados	15	
I.	Rocha esmagada, tipo terroso	20	

Anexo 6.2: Índice das famílias de juntas " $J_n$ " de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Descrição do Parâmetro		Valor	Notas
"Joint roughness number"		$J_r$	
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão, respectivamente  2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3 m  3. $J_r$ igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direcção de menor resistência
b) Contacto entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento			
A.	Juntas descontinuas	4	
B.	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C.	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D.	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E.	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F.	Descontinuidades lisas, planas	1,0	
G.	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento			
H.	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	
I.	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	

Anexo 6.3: Índice de rugosidade das juntas " $J_r$ " de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)



Descrição do Parâmetro		Valor	
"Joint alteration number"		J <sub>a</sub>	φ, (°) aprox.
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A.	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epibólito)	0,75	-
B.	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1,0	25-35
C.	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2,0	25-30
D.	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3,0	20-25
E.	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc., e pequenas quantidades de argilas expansivas	4,0	8-16
b) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F.	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc	4,0	25-30
G.	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6,0	16-24
H.	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8,0	12-16
I.	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite (contínuo, mas com espessura < 5 mm); o valor de J <sub>a</sub> depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc	8-12	6-12
c) Não há contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J.	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8-12	6-24
K.	Zonas ou bandas siltsas ou areno-argilosas, com pequena fracção de argila	5,0	-
L.	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10,13, 13-20	6-24

Nota: Os valores do ângulo de atrito residual (φ, ) devem considerar-se como um guia aproximado das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração

Anexo 6.4: Grau de alteração das descontinuidades de rocha de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)

Descrição do Parâmetro		Valor		Notas
"Joint water reduction"		J <sub>w</sub>	Pressão da água aprox. (MPa)	
A.	Escavações secas ou caudal afluido pequeno, isto é < 5 l/min localmente	1,0	< 0,1	1. Os factores nos casos C a F são estimados para condições naturais; o parâmetro J <sub>w</sub> deverá ser aumentados caso sejam efectuadas drenagens  2. Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados
B.	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1-0,25	
C.	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25-1	
D.	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25-1	
E.	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2-0,1	> 1	
F.	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1-0,05	> 1	

Anexo 6.5: Índice das condições hidrogeológicas "Jw" de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)



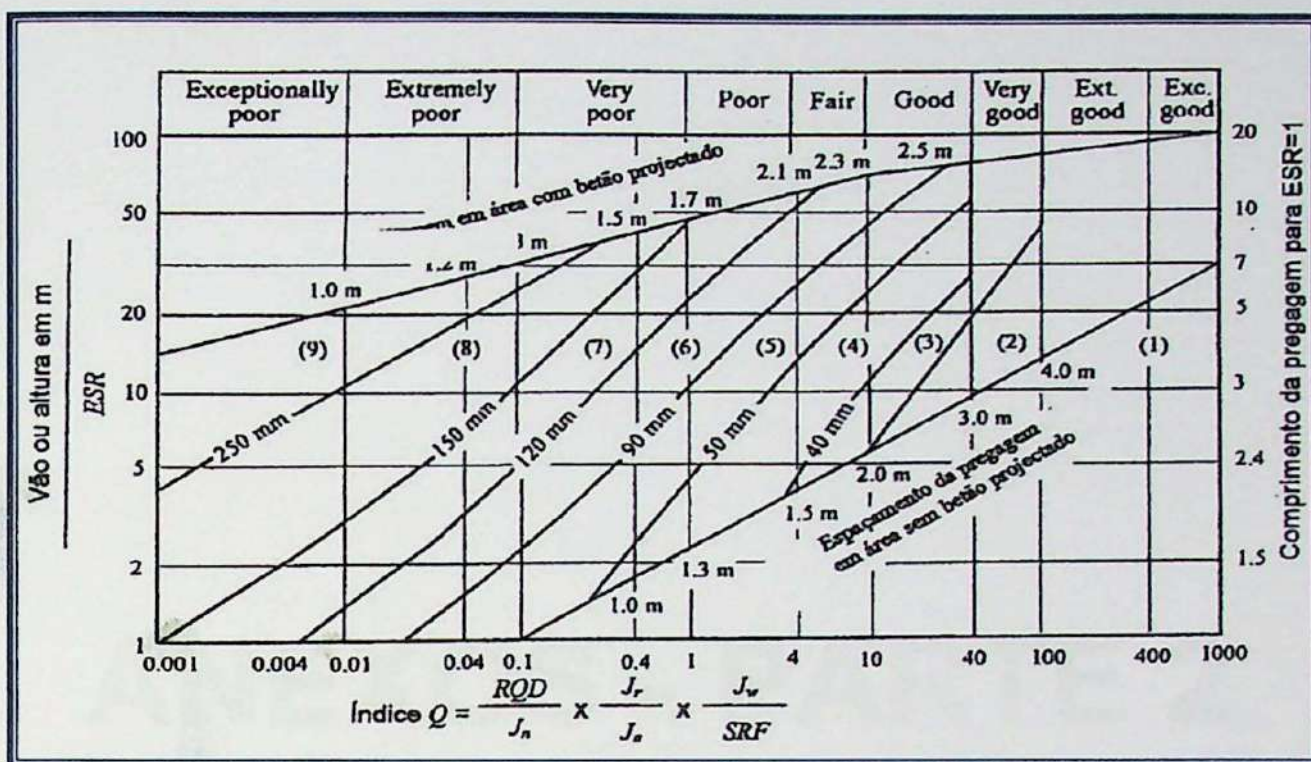
Descrição do Parâmetro		Valor	Notas	
"Stress Reduction Factor"		SRF		
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas			1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem  2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa. Em maciços muito pouco fracturados e sem argila,	
A.	Zonas de fraqueza frequentes, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas as profundidades)	10,0		
B.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação $\leq 50$ m)	5,0		
C.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades da escavação $> 50$ m)	2,5		
D.	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E.	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades da escavação $\leq 50$ m)	5,0		
F.	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades da escavação $> 50$ m)	2,5		
G.	Juntas abertas, rocha muito fracturada e descomprimida (todas as profundidades)	5,0		
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha			$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_1 / \sigma_3$
H.	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	$> 200$	$> 13$
I.	Tensões médias	1,0	200-10	13-0,66
J.	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5-2,0	10-5	0,66-0,33
K.	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5-10	5-2,5	0,33-0,16
L.	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10-20	$< 2,5$	$< 0,16$
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M.	Pressão moderada da rocha esmagada	5-10		
N.	Pressão elevada da rocha esmagada	10-20		
d) Rochas expansivas: actividade química expansiva devida à presença da água				
O.	Pressão de expansão moderada	5-10		
P.	Pressão de expansão elevada	10-15		

Anexo 6.6: Fator de redução de tensões "SRF" de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)





Classe	Tipo de escavação	ESR
A.	Cavidades mineiras temporárias	3-5
B.	Poços verticais de secção circular	2,5
	Poços verticais de secção quadrada ou rectangular	2,0
C.	Cavidades mineiras definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos (excepto túneis sob pressão), túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades	1,6
D.	Cavernas de armazenagem, estações de tratamento de águas, pequenos túneis rodo-ferroviários, chaminés de equilíbrio, túneis de acesso	1,3
E.	Centrais subterrâneas, túneis rodo-ferroviários de grande dimensão, abrigos de defesa, bocas de entrada, intersecções	1,0
F.	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos de ferro, fábricas	0,8

Anexo 6.7: Índice de segurança "ESR" para diferentes obras subterrâneas, de acordo com o Sistema Q (BARTON, 1974)





Anexo 6.8: Classes de suporte definidas para o Sistema Q (BARTON, 1974)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		DISCONTINUITY SURFACE CONDITION				
According to geological conditions, pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index GSI from the contours						
STRUCTURE						
		VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially distributed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets		60	50		
	BLOCKY/FOLDED - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks			40	30	
	CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks				20	10

Anexo 7: Classificação GSI – "Geological Strength Index" (HOEK, 2000)



# **ANEXOS - PARTE 2**

Critérios e tabelas da classificação  
de sondagens



ALTERAÇÃO		
R1 (RS)	Rocha Sã	Sã ou praticamente sã; Alteração mineralógica nula ou incipiente; Cor original intacta; Escavável a fogo, perfuração com rotativa.
R2 (RAD)	Rocha Alterada Dura	Alteração mineralógica perceptível; Cores esmaecidas e pequenas transformações físico-químicas; Escavável a fogo, perfuração com rotativa.
R3 (RAM)	Rocha Alterada Mole	Alteração mineralógica acentuada; Cores parcialmente modificadas e intensas transformações físico-químicas; Escavável a picareta ou escarificador, perfuração com trépano e lavagem.
S2 (SA)	Solo de Alteração	Alteração mineralógica praticamente completa; Cores totalmente modificadas e transformações físico-químicas completas, exceto nos minerais resistentes; Escavável a enxada, perfuração a percussão.
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	Subhorizontal	Com mergulho de 0 a 20°
I	Inclinada	Com mergulho de 20 a 70°
SV	Subvertical	Com mergulho de 70 a 90°

Continua

### Anexo 8.1: Parâmetros para classificação de sondagens rotativas e a percussão



TIPOS DE SUPERFÍCIE E PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES					
Com contato rocha x rocha			Sem contato rocha x rocha		
S1	Rugosa	Superfícies irregulares, os testemunhos se encaixam naturalmente (fratura travada)	PO		Descontinuidades com suspeita de preenchimento (os testemunhos não se encaixam)
S2	Estriada	Superfícies com estrias, o deslizamento é mais fácil em uma direção	P1 (esp)	Granular	Descontinuidades preenchidas por material granular incoerente (espessura em mm)
S3	Plana	Superfícies planas, o deslizamento é fácil em qualquer direção	P2 (esp)	Misto	Descontinuidades preenchidas por material granular e argiloso (espessura em mm)
S4	Sedosa	Superfícies sedosas ou talcosas ao tato	P3 (esp)	Argiloso	Descontinuidades preenchidas por material argiloso (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		
51-26			Pobre		
25-0			Muito Pobre		
ENSAIOS SPT					
Solo	Consistência ou Compacidade		Número de golpes/ 30 cm finais		
Areias e Siltes Arenosos	Fofa		≤ 4		
	Pouco compacta		5 a 8		
	Medianamente compacta		9 a 18		
	Compacta		19 a 40		
	Muito compacta		> 40		
Argilas e Siltes Argilosos	Muito mole		≤ 2		
	Mole		3 a 5		
	Média		6 a 10		
	Rija		11 a 19		
	Dura		> 19		
Critérios de impenetrável na sondagem a percussão, com base nos ensaios SPT					
1) Primeiros 15 cm - Relação 5 golpes / 1 cm, com um mínimo de 20 golpes					
2) Segundos 15 cm - Relação de 2 golpes / 1 cm, com um mínimo de 30 golpes					
3) 30 cm finais - ≥ 50 golpes / 30 cm					

**Anexo 8.2:** (Continuação): Parâmetros para classificação de sondagens rotativas e a percussão



PROJETO: Trabalho de Formatura					SONDAGEM Nº: SM-01															
Trecho		Subcamada		Unidade geológico-geotécnica	Descrição															
De	Até	De	Até																	
0,00	30,30			Ar (R1)	Arenito são, granulação fina a média, com poucas intercalações (milimétricas) de carbonato, medianamente coerente a pouco coerente, sem fraturas, coloração avermelhada															
CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES - SONDAGEM Nº: SM-01																				
Trechos Homogêneos																				
De	Até	G.F.	RQD (%)	Orientação					Rugosidade, contato rocha x rocha				Sem contato rocha x rocha (espessura em mm)						Paredes	Observações
				H	SH	I	V	SV	S1	S2	S3	S4	Po	P1	P2	P3	P4	P5		
0,00	30,30	F1	100															Apenas quebras mecânicas. Sem fraturamento		

### Anexo 9: Classificação da sondagem SM-01



PROJETO: Trabalho de Formatura					SONDAGEM Nº: SM-02									
Trecho		Subcamada		Unidade geológico-geotécnica	Descrição									
De	Até	De	Até											
0,00	1,00			Colúvio	Silte argiloso, de coloração marrom avermelhada, com pedregulhos líticos finos e raízes									
1,00	4,00			SA Siltito	Silte arenoso, de coloração marrom avermelhada, com porções amareladas/esbranquiçadas, fragmentos de rocha									
4,00	5,27			Siltito (R2)	Rocha alterada dura, de coloração arroxeada									
5,27	6,74			Arenito (R1)	Arenito branco, são, granulometria fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos (milimétricos) paralelos ao acamamento									
6,74	7,11			Siltito (R2)	Rocha alterada dura, de coloração cinza escura									
7,11	9,87			Arenito (R1)	Arenito de cor cinza clara, são, granulometria fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos e siltosos (milimétricos) paralelos ao acamamento									
9,87	111,05			Arenito (R1)	Arenito de coloração marrom avermelhada, são, granulometria fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos (milimétricos) paralelos ao acamamento. Por vezes, ocorrem lentes de arenito conglomerático.									

CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES - SONDAGEM Nº: SM-02																				
Trechos Homogêneos																				
De	Até	G.F.	RQD (%)	Orientação					Rugosidade, contato rocha x rocha				Sem contato rocha x rocha (espessura em mm)						Paredes	Observações
				H	SH	I	V	SV	S1	S2	S3	S4	Po	P1	P2	P3	P4	P5		
0,00	1,00																			
1,00	4,00																			
4,00	7,11	F5	-																	
7,11	12,15	F2	98%			X			X											
12,15	15,00	F1	100	X																
15,00	19,00	F2	100%	X		X			X											
19,00	20,67	F3	90%			X			X											
20,67	30,00	F2	91%			X			X		X									
30,00	111,05	F1	100%	X					X											

### Anexo 10: Classificação da sondagem SM-02



PROJETO: Trabalho de Formatura					SONDAGEM Nº: SM-03									
Trecho		Subcamada		Unidade geológico-geotécnica	Descrição									
De	Até	De	Até											
0,00	3,00			Colúvio	Silte argiloso pouco arenoso (areia fina), marrom avermelhado, com poucos pedregulhos									
3,00	5,45			Solo Eluvial / Colúvio (?)	Silte argiloso de coloração amarelada e avermelhada, com poucos pedregulhos									
5,45	13,18			SA Calcário/Folhelho	Silte argiloso, localmente arenoso, cor preta, fragmentos de RAM									
13,18	38,20			Calcário/Folhelho (R2/R3)	Intercalações calcário/folhelho, de cor cinza a preta, granulação fina									
38,20	51,90			Brecha Sedimentar (R1)	Rocha sã, de cor cinza clara, com porções esverdeadas, amareladas, avermelhadas, de matriz arenosa fina (carbonática), copm intercalações centi a decimétricas de siltito/calculutito.									
51,90	52,20			Brecha Cozida (R1)	Rocha sã, cinza clara e branca									
52,20	85,00			Diabásio (R1)	Rocha sã, cinza escuro, maciço, fanerítico de granulação fina, e por vezes, afanítico.									

CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES - SONDAGEM Nº: SM-03																				
Trechos Homogêneos																				
De	Até	G.F.	RQD (%)	Orientação					Rugosidade, contato rocha x rocha				Sem contato rocha x rocha (espessura em mm)						Paredes	Observações
				H	SH	I	V	SV	S1	S2	S3	S4	Po	P1	P2	P3	P4	P5		
0,00	3,00																			
3,00	5,45																			
5,45	13,18																			
13,18	38,20	F5/F4	-																	
38,20	39,63	F3	60		X					X	X							pa		
39,63	51,90	F2/F1	90%		X	X	X			X		X						pa		
51,90	85,00	F1	98%		X	X				X										

### Anexo 11: Classificação da sondagem SM-03



PROJETO: Trabalho de Formatura					SONDAGEM Nº: SM-04									
Trecho		Subcamada		Unidade geológico-geotécnica	Descrição									
De	Até	De	Até											
0,00	2,00			Colúvio	Argila siltosa, marrom avermelhada, com pedregulhos esparsos e raízes finas									
2,00	7,00			SA (?)	Argila arenosa, de coloração amarelada e avermelhada, com estruturas ígneas reliquias									
7,00	14,00			SA/R3 Calcário/Folhelho	Argila arenosa, cor preta e marrom, com fragmentos de RAM									
14,00	38,46			Calcário/Folhelho (R2/R3)	Intercalações calcário/folhelho, de cor cinza a preta, granulação fina, com alguns níveis silicificados									
38,46	51,83			Brecha Sedimentar (R1)	Rocha sã, de cor cinza clara, com porções esverdeadas, amareladas, avermelhadas, de matriz arenosa fina (carbonática), copm intercalações centi a decimétricas de siltito/calculutito.									
51,83	53,11			Brecha Cozida (R1)	Rocha sã, cinza clara e branca									
53,11	80,02			Diabásio (R1)	Rocha sã, cinza escuro, maciço, fanerítico de granulação fina, e por vezes, afanítico.									

CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES - SONDAGEM Nº: SM-04																				
Trechos Homogêneos																				
De	Até	G.F.	RQD (%)	Orientação					Rugosidade, contato rocha x rocha				Sem contato rocha x rocha (espessura em mm)						Paredes	Observações
				H	SH	I	V	SV	S1	S2	S3	S4	Po	P1	P2	P3	P4	P5		
0,00	2,00																			
2,00	7,00																			
7,00	14,00																			
14,00	39,46	F5/F4	-																	
39,46	53,11	F2/F1	90%	X	X				X	X										
53,11	80,02	F1	98%	X				X	X	X										

### Anexo 12: Classificação da sondagem SM-04



PROJETO: Trabalho de Formatura					SONDAGEM Nº: SM-05											
Trecho		Subcamada		Unidade geológico-geotécnica	Descrição											
De	Até	De	Até													
0,00	2,00			Aterro	Argila arenosa, vermelha, com fragmentos de granulação variada											
2,00	4,45			SA - Gb	Silte argiloso, pouco arenoso, pouco micáceo, cinza esverdeado											
4,45	8,45			SA - Gb	Silte arenoso, pouco argiloso, micáceo, com fragmentos esparsos de granulação variada de rocha alterada, cinza amarelado											
8,45	10,45			SA - Gb	Silte arenoso, com porções de areia siltosa, pouco micáceo, pouco caulínico, cinza amarelado											
10,45	16,30			SA - Gb	Silte arenoso, pouco argiloso, micáceo, pouco caulínico, com fragmentos finos e esparsos de rocha alterada, cinza e branco											
16,30	24,90	21,00	24,90	SA - Gb Provável S2/R3	Areia fina siltosa, pouco micácea, caulínica, com fragmentos esparsos, de granulação variada, de rocha alterada, cinza e branco											
24,90	45,04	24,90 30,95 32,65	27,23 31,53 33,90	R2/R1 - Gb R3/R2 - Gb R3/R2 - Gb R2/R3 - Gb	Gnaiss biotítico de granulação fina e média e porções de granulação média e grossa, com bandas pegmatíticas centimétricas esparsas, concordantes com a foliação. Foliação subvertical. Cinza escuro e branco											

CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES - SM-05																				
Trechos Homogêneos																				
De	Até	G.F.	RQD (%)	Orientação					Rugosidade, contato rocha x rocha				Sem contato rocha x rocha (espessura em mm)						Paredes	Observações
				H	SH	I	V	SV	S1	S2	S3	S4	Po	P1	P2	P3	P4	P5		
24,90	27,23	F5	-					X	X									Pa		
27,23	30,95	F2	77	X	X			X	X	X			(1)	vestígios				Pa		
30,95	31,53	F5	-			X		X	X									Pa		
31,53	32,65	F3	78	X				X	X	X			(1)	vestígios				Pa		
32,65	33,90	F5	-	X	X				X									Pa		
33,90	34,98	F2	83	X				X	X	X			(1)	vestígios				Pa		
34,98	35,70	F5	-	X				X	X	X			(1)	vestígios				Pa		
35,70	45,04	F2	96	X	X			X	X	X			(1)	vestígios				Pa		

### Anexo 13: Classificação da sondagem SM-05



PROJETO: Trabalho de Formatura					SONDAGEM Nº: SM-06									
Trecho		Subcamada		Unidade geológico-geotécnica	Descrição									
De	Até	De	Até											
0,00	0,20			Aterro	Piso de Concreto									
0,20	2,12			Aterro	Argila siltosa, pouco arenosa, cinza, com pedregulhos finos									
2,12	13,45			SA - Gb/Gr	Silte arenoso (fino), pouco argiloso, micáceo, com fragmentos esparsos de rocha alterada, cinza esverdeado e amarelado									
		11,45	13,45	Gb	cinza escuro									
13,45	21,90			SA - Gb	Areia fina siltosa, micácea, pouco caulínica, com fragmentos variados de rocha alterada, cinza escura e branca									
		15,45	16,45		caulínica									
21,90	26,39			R2/R1 - Gr R2/R3	Gnaiss granítico, granulação fina a média, foliação subvertical (80-90°), cinza esbranquiçado									
26,39	37,38			R2/R3 - Gb/Gr	Gnaiss biotítico intercalado com gnaiss granítico, granulação fina a média, foliação inclinada a subvertical, cinza escuro e branco. Alteração ao longo da foliação									
37,38	44,00			R1/R2 - Gr R3 R2/R3 Gb	Gnaiss granítico, granulação fina a média, foliação inclinada a subvertical, cinza esbranquiçado. No trecho final predomina gnaiss biotítico									
		39,82	40,28											
		41,35	41,89											
		42,20	44,00											

CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES - SM-06																			
Trechos Homogêneos																			
De	Até	G.F.	RQD (%)	Orientação					Rugosidade, contato rocha x rocha				Sem contato rocha x rocha (espessura em mm)					Paredes	Observações
				H	SH	I	V	SV	S1	S2	S3	S4	Po	P1	P2	P3	P4		
21,90	23,40	F2	67	2ª	1ª			3ª	X	X			X					Pox	
23,40	24,85	F5	-	X	X			X	X				X					Pox	
24,85	26,39	F3	69	1ª	2ª			3ª	X		1ª		X					Pox	
26,39	37,38	F2	44	1ª					X	X			X					Pa-Pox	
37,38	39,82	F1	100																
39,82	40,28	F5	-		X					X			X					Pa-Pox	
40,28	41,35	F2	100	X					X	X			X					Pox	
41,35	41,89	F5	-		X			X			X		X					Pa-Pox	
41,89	44,00	F2	96	X	X				X	X			X					Pox	

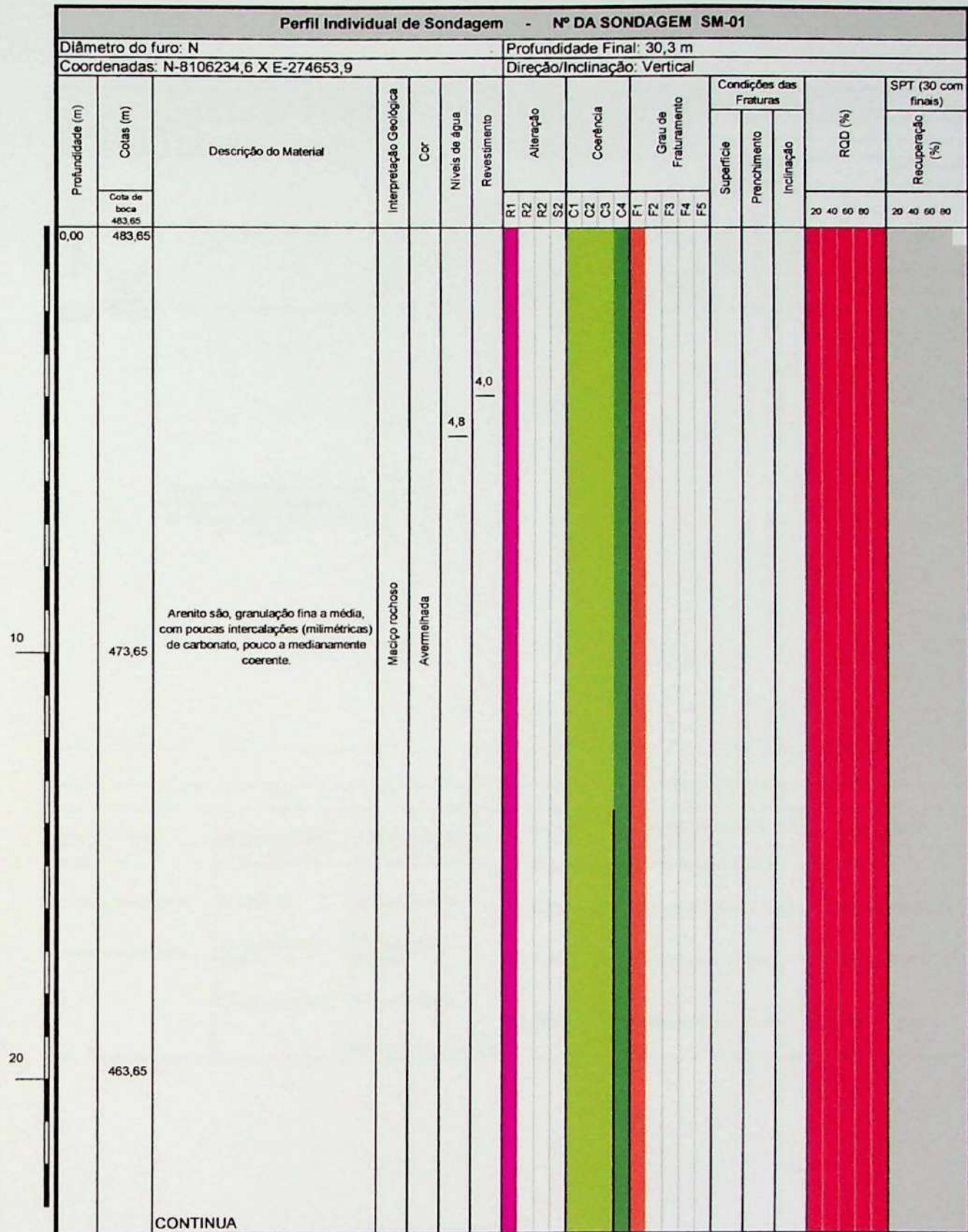
#### Anexo 14: Classificação da sondagem SM-06



# **ANEXOS - PARTE 3**

## **Perfis de sondagens**





Grau de Alteração	Grau de Coerência	Grau de Fraturamento	Superfícies	Preenchimento/abertura	Inclinação
R1- Rocha sã	C1- Muito coerente	F1- Muito pouco fraturada	S1- Rugosa	P0- suspeita de preenchimento	H- Horizontal
R2- Rocha Alterada Dura	C2- Coerente	F2- Pouco fraturada	S2- Estriada	P1- Granular (espessura em mm)	SH- Subhorizontal (0-20°)
R3- Rocha Alterada Mole	C3- Medianamente coerente	F3- Medianamente fraturada	S3- Plana	P2- Misto (espessura em mm)	I- Inclinação (20-70°)
S2- Solo	C4- Pouco coerente	F4- Muito fraturada	S4- Sedosa	P3- Argiloso (espessura em mm)	SV- Subvertical 70-90°
		F5- Extremamente fraturada			

Anexo 15: Perfil da sondagem SM-01



30

Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-01																													
Diâmetro do furo: N										Profundidade Final: 30,3 m																			
Coordenadas: N-8106234,6 X E-274653,9										Direção/Inclinação: Vertical																			
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração				Coerência				Grau de Fraturamento				Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 com finais)						
							R1	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação		20	40	60	80	20	40	60
20,00	463,65	Arenito são, granulação fina a média, com poucas intercalações (milimétricas) de carbonato, pouco a medianamente coerente .	Maciço rochoso	Avermelhada																									
30,3	453,35																												

Grau de Alteração	Grau de Coerência	Grau de Fraturamento	Superfícies	Preenchimento/abertura	Inclinação
R1- Rocha sã	C1- Muito coerente	F1- Muito pouco fraturada	S1- Rugosa	P0- suspeita de preenchimento	H- Horizontal
R2- Rocha Alterada Dura	C2- Coerente	F2- Pouco fraturada	S2- Estriada	P1- Granular (espessura em mm)	SH- Subhorizontal (0-20°)
R3- Rocha Alterada Moles	C3- Medianamente coerente	F3- Medianamente fraturada	S3- Plana	P2- Misto (espessura em mm)	I- Inclinação (20-70°)
S2- Solo	C4- Pouco coerente	F4- Muito fraturada	S4- Sedosa	P3- Argiloso (espessura em mm)	SV- Subvertical 70-90°
		F5- Extremamente fraturada			



Anexo 16: Perfil da sondagem SM-02



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-02																							
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 111,05 m													
Coordenadas: N-8105966,9 X E-274502,0										Direção/Inclinação: Vertical													
Profundidade (m)	Colas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência		Grau de Fraturamento		Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 cm finais)						
	Cota de boca 553,66						R1 R2 R2 S2	C1 C2 C3 C4	F1 F2 F3 F4 F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20 40 60 80	20 40 60 80									
		Arenito são, granulação fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos ou siltsos (mm) paralelos ao acamamento. Por vezes, ocorrem lentes de arenito conglomerático	Maciço rochoso	Marrom avermelhado	37																		



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Diâmetro do furo: H e N											Profundidade Final: 111,05 m																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Coordenadas: N-8105966,9 X E-274502,0											Direção/Inclinação: Vertical																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência				Grau de Fraturamento					Condições das Fraturas			RQD (%)				SPT (30 cm finais)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	Cota de boca 553,66						R1 R2 R2 S2	C1 C2 C3 C4	F1 F2 F3 F4 F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20 40 60 80	20 40 60 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Arenito são, granulação fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos ou siltosos (mm) paralelos ao acamamento. Por vezes, ocorrem lentes de arenito conglomerático	Maciço rochoso	Marrom avermelhado																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															



70

80

Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDA GEM SM-02																			
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 111,05 m									
Coordenadas: N-8105966,9 X E-274502,0										Direção/Inclinação: Vertical									
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência		Grau de Fraturamento		Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 cm finais)		
							R1	R2	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1		F2	F3	F4
	Cota de boca 553,66																		
		Arenito são, granulação fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos ou siltosos (mm) paralelos ao acamamento. Por vezes, ocorrem lentes de arenito conglomerático	Maciço rochoso	Marron avermelhado															
												</							



90

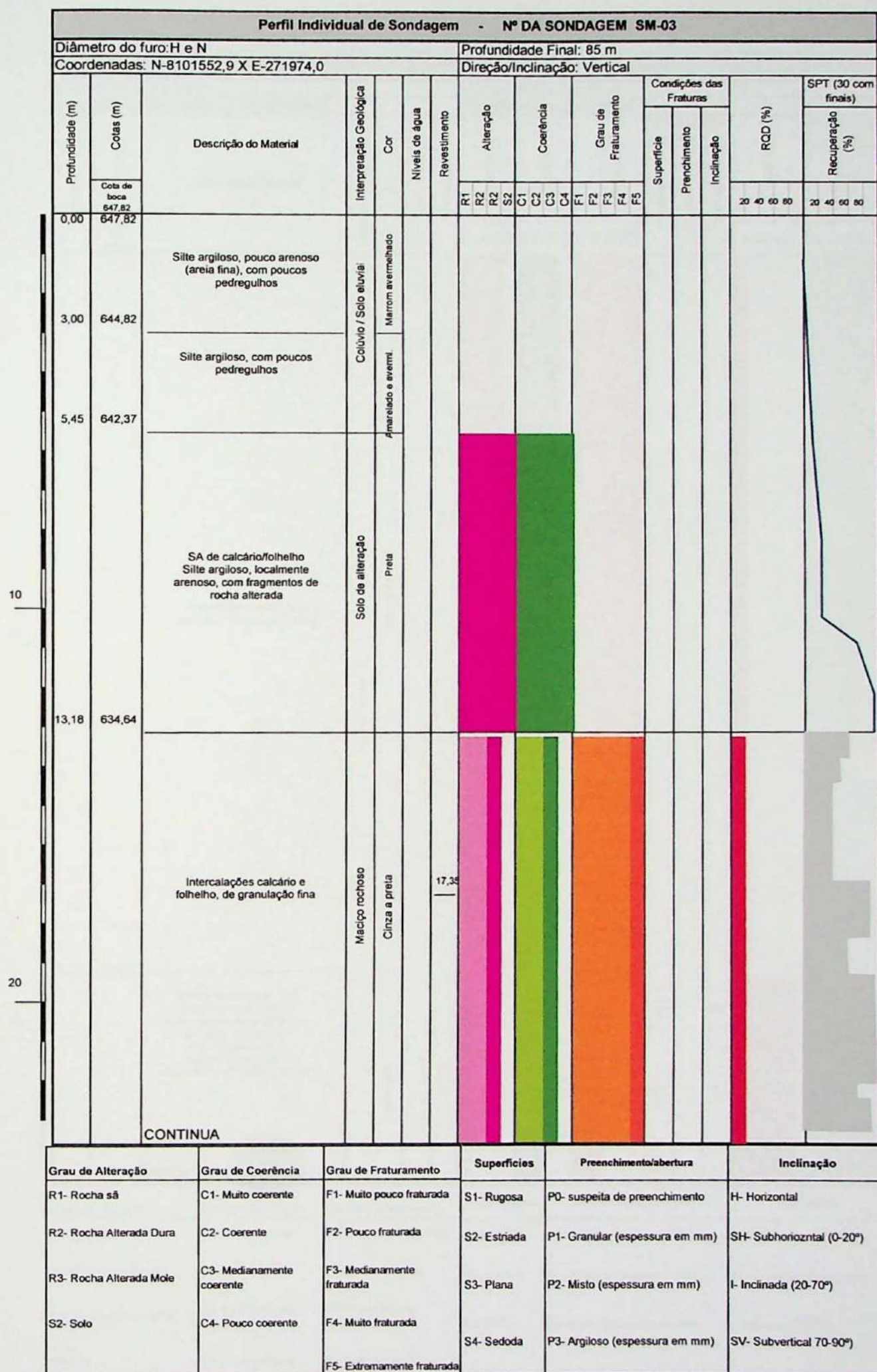
100

Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAAGEM SM-02																											
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 111,05 m																	
Coordenadas: N-8105966,9 X E-274502,0										Direção/Inclinação: Vertical																	
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência		Grau de Fraturamento		Condições das Fraturas			RQD (%)				SPT (30 cm finais)							
							R1	R2	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20	40	60	80	20
	Cota de boca 553,66	Arenito são, granulação fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos ou siltosos (mm) paralelos ao acamamento. Por vezes, ocorrem lentes de arenito conglomerático	Maciço rochoso	Marrom avermelhado											S1	-	H										
CONTINUA																											
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação																	
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal																	
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estriada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhonozniai (0-20°)																	
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclinação (20-70°)																	
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedoda		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90°)																	
				F5- Extremamente fraturada																							



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAAGEM SM-02																											
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 111,05 m																	
Coordenadas: N-8105966,9 X E-274502,0										Direção/Inclinação: Vertical																	
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência		Grau de Fraturamento		Condições das Fraturas			RQD (%)		SPT (30 cm finais)									
							R1	R2	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	Recuperação (%)				
	Cota de boca						553,66																	20	40	60	80
111,05		Arenito são, granulação fina, acamamento subhorizontal, com níveis carbonáticos ou siltosos (mm) paralelos ao acamamento. Por vezes, ocorrem lentes de arenito conglomerático													S1	-	H										
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação																	
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal																	
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estrada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhorizontl (0-20°)																	
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclinação (20-70°)																	
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedosa		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90°																	
				F5- Extremamente fraturada																							





Anexo 17: Perfil da sondagem SM-03



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-03																													
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 85 m																			
Coordenadas: N-8101552,9 X E-271974,0										Direção/Inclinação: Vertical																			
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração			Coerência			Grau de Fraturamento			Condições das Fraturas			RQD (%)				SPT (30 cm finais)						
							R1	R2	R3	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20	40	60	80	20	40	60
	Recuperação (%)																												
	Cota de boca 647,82																												
		Intercalações calcário e folhelho, de granulação fina	Maciço rochoso	Cinza a preta																									
38,20	609,62	Brecha sedimentar, com porções esverdeadas, amareladas e avermelhadas, de matriz arenosa fina (carbonática), com intercalações centí a decimétrica de siltito/calculutito		Cinza clara													S1/ S2		SH										
		CONTINUA															S1/ S3	-	SH I SV										
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação																			
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal																			
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estriada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhorizontal (0-20º)																			
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclinação (20-70º)																			
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedosa		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90º)																			
				F5- Extremamente fraturada																									



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-03																														
Diâmetro do furo: H e N											Profundidade Final: 85 m																			
Coordenadas: N-8101552,9 X E-271974,0											Direção/Inclinação: Vertical																			
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência		Grau de Fraturamento					Condições das Fraturas			RQD (%)				SPT (30 cm finais)							
							R1	R2	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20	40	60	80	20	40	60	80
	Cota de boca 647,82																													
		Brecha sedimentar, como porções esverdeadas, amareladas e avermelhadas, de matriz arenosa fina (carbonática), com intercalações centí a decimétricas de siltito/calculutito		Cinza clara																										
51,90	595,92		Maciço rochoso																											
52,20	595,62	Brecha cozida																												
		Diabásio, maciço, fanerítico de granulação fina, e por vezes, afanítico		Cinza escuro		56,2																								
CONTINUA																														
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação																				
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal																				
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estriada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhorizontal (0-20º)																				
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclinação (20-70º)																				
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedosa		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90º)																				
				F5- Extremamente fraturada																										



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAAGEM SM-03																															
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 85 m																					
Coordenadas: N-8101552,9 X E-271974,0										Direção/Inclinação: Vertical																					
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração			Coerência			Grau de Fraturamento					Condições das Fraturas			RQD (%)				SPT (30 cm finais)						
							R1	R2	R3	S1	S2	S3	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20	40	60	80	20	40	60
	Cota de boca						647,82																								
																				</											



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDADEM SM-04																																					
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 80,02 m																											
Coordenadas: N-8101189,9 X E-271806,9										Direção/Inclinação: Vertical																											
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração				Coerência				Grau de Fraturamento					Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 com finais)													
							R1	R2	R3	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação		Recuperação (%)													
	20																						40	60	80	20	40	60	80								
0,00	643,25	Argila siltosa, com pedregulhos esparsos e raízes finas	Colúvio	Marrom averm.																																	
2,00	641,25																																				
		Solo de alteração Argila arenosa, com estruturas ígneas reliquias	Solo de alteração	Amarela e vermelha																																	
7,00	636,25																																				
		Solo de alteração / rocha alterada mole Argila arenosa, com fragmentos de rocha alterada mole	Solo de alteração / RAM	Preta e marrom																																	
14,00	629,25																																				
		RAD/RAM - Intercalações calcário e folhelho, de granulação fina, com alguns níveis (mm) silicificados	Maciço rochoso	Cinza a preta		16,38																															
CONTINUA																																					
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação																											
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal																											
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estriada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhorizontal (0-20°)																											
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclínada (20-70°)																											
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedosa		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90°)																											
				F5- Extremamente fraturada																																	

Anexo 18: Perfil da sondagem SM-04



30

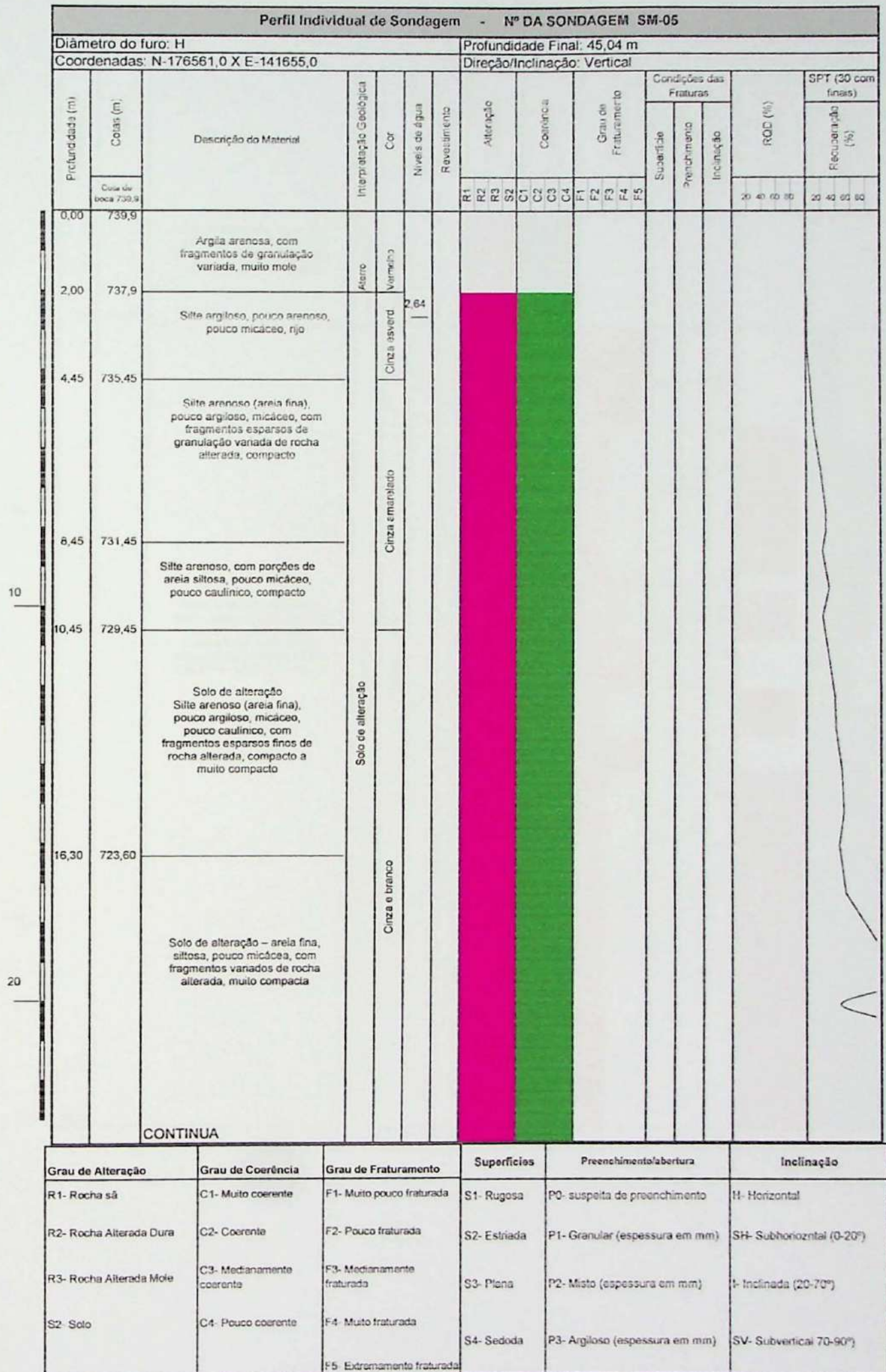


Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-04																				
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 80,02 m										
Coordenadas: N-8101189,9X E-271806,9										Direção/Inclinação: Vertical										
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência		Grau de Fraturamento		Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 cm finais)			
							R1	R2	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1		F2	F3	F4	F5
	Cota de boca 643,25																			
		Brecha sedimentar, como porções verdeadas, amareladas e avermelhadas, de matriz arenosa fina (carbonática), com intercalações centí a decimétricas de siltito/calculutito		Cinza clara											S3/ S1		SH I			
51,83	591,42																			
		Brecha cozida	Maciço rochoso			52,80														
53,11	590,14																			
		Diabásio, maciço, fanerítico de granulação fina, e por vezes, afanítico		Cinza escuro											S1/ S3		SH			
CONTINUA																				
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação										
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal										
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estriada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhorizontal (0-20°)										
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclinação (20-70°)										
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedosa		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90°)										
				F5- Extremamente fraturada																



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-04																														
Diâmetro do furo: H e N										Profundidade Final: 80,02 m																				
Coordenadas: N-8101189,9X E-271806,9										Direção/Inclinação: Vertical																				
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração		Coerência				Grau de Fraturamento					Condições das Fraturas			RQD (%)				SPT (30 com finais)					
							R1	R2	R2	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20	40	60	80	20	40	60	80
	Cota de boca 643,25																													
70		Diabásio, maciço, fanerítico de granulação fina, e por vezes, afanítico	Maciço rochoso	Cinza escuro																										
80	80,02																													
Grau de Alteração		Grau de Coerência		Grau de Fraturamento		Superfícies		Preenchimento/abertura		Inclinação																				
R1- Rocha sã		C1- Muito coerente		F1- Muito pouco fraturada		S1- Rugosa		P0- suspeita de preenchimento		H- Horizontal																				
R2- Rocha Alterada Dura		C2- Coerente		F2- Pouco fraturada		S2- Estriada		P1- Granular (espessura em mm)		SH- Subhorizontl (0-20º)																				
R3- Rocha Alterada Mole		C3- Medianamente coerente		F3- Medianamente fraturada		S3- Plana		P2- Misto (espessura em mm)		I- Inclinação (20-70º)																				
S2- Solo		C4- Pouco coerente		F4- Muito fraturada		S4- Sedosa		P3- Argiloso (espessura em mm)		SV- Subvertical 70-90º)																				
				F5- Extremamente fraturada																										





Anexo 19: Perfil da sondagem SM-05



Universidade de São Paulo, 2007



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-06																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Diâmetro do furo: H										Profundidade Final: 44 m																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Coordenadas: N-176497,0 X E-141563,0										Direção/Inclinação: Vertical																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis da água	Revestimento	Alteração				Coerência				Grau de Fraturamento					Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 cm finais)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
							R1	R2	R3	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4	F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação		Recuperação (%)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Anexo 20: Perfil da sondagem SM-06



Perfil Individual de Sondagem - Nº DA SONDAGEM SM-06

Diâmetro do furo: H e N

Profundidade Final: 80,02 m

Coordenadas: N-8101189,9X E-271806,9

Direção/Inclinação: Vertical

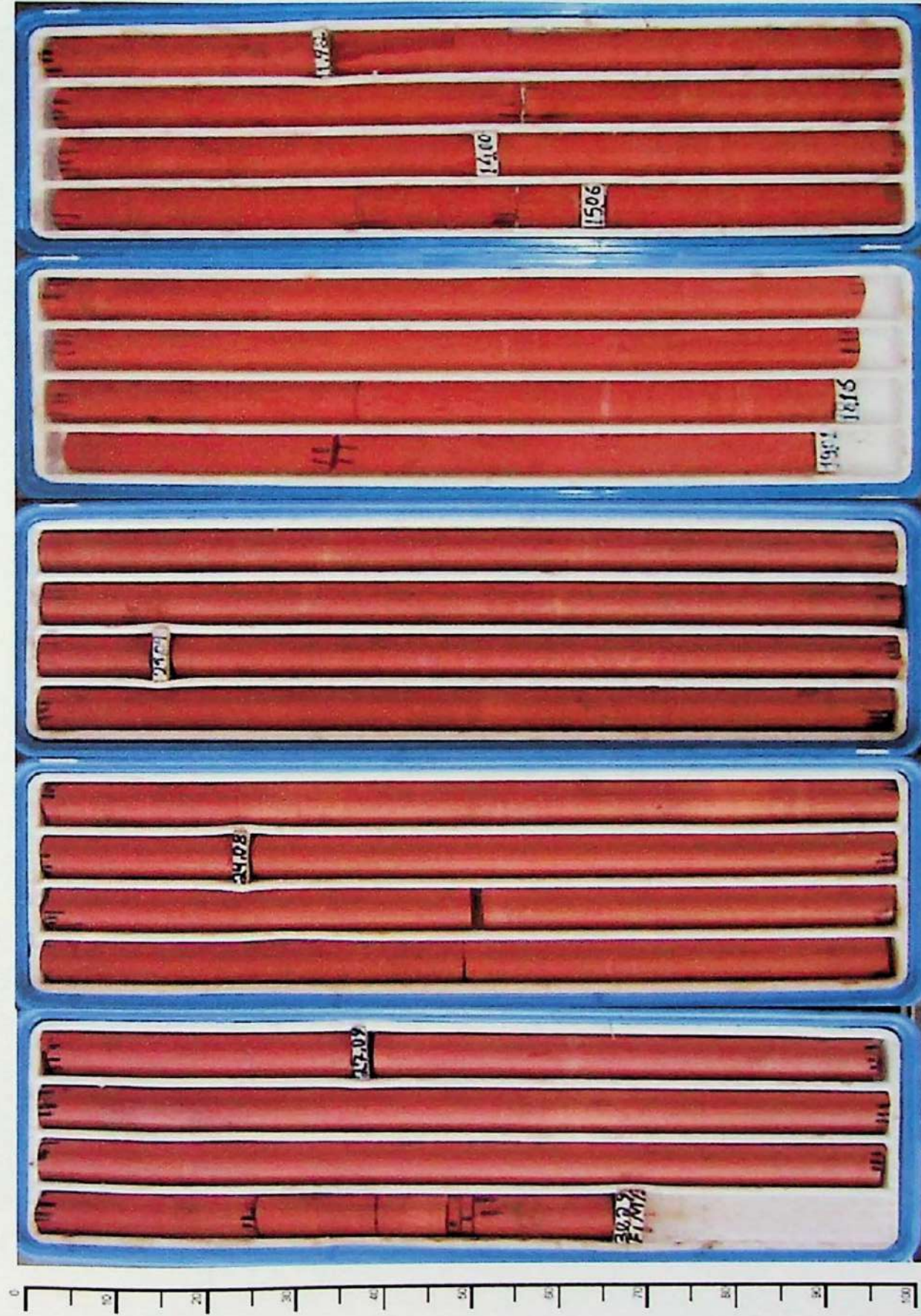
Profundidade (m)	Cotas (m)	Descrição do Material	Interpretação Geológica	Cor	Níveis de água	Revestimento	Alteração			Coerência			Grau de Fraturamento			Condições das Fraturas			RQD (%)	SPT (30 cm finais)				
							R1	R2	R3	S2	C1	C2	C3	C4	F1	F2	F3	F4		F5	Superfície	Preenchimento	Inclinação	20
26,39	616,89	Gnaiss granítico, de textura fina e média e foliação subvertical	Maciço rochoso	Cinza esbranq.													S1/S3		I SH SV					
																		S1		SH I SV				
																		S3/S1						
37,38	605,87	Gnaiss biotítico intercalado com gnaiss granítico, granulação fina a média, foliação inclinada a subvertical. Alteração ao longo da foliação		Cinza esc. e branco													S1/S3		SH					



# **ANEXOS - PARTE 4**

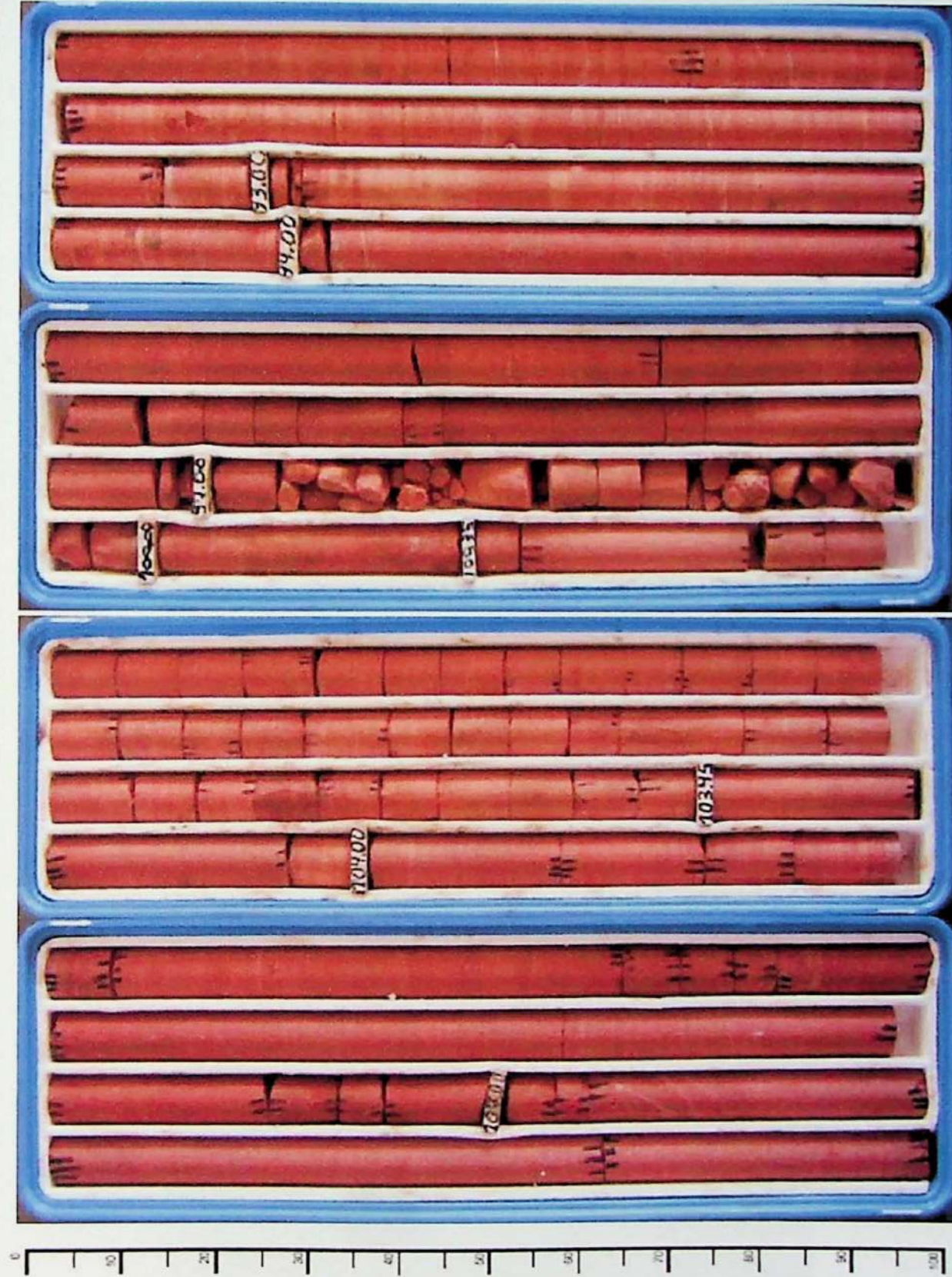
Fotos dos testemunhos e frentes de escavação nos trechos selecionados para a aplicação do Sistema RMR





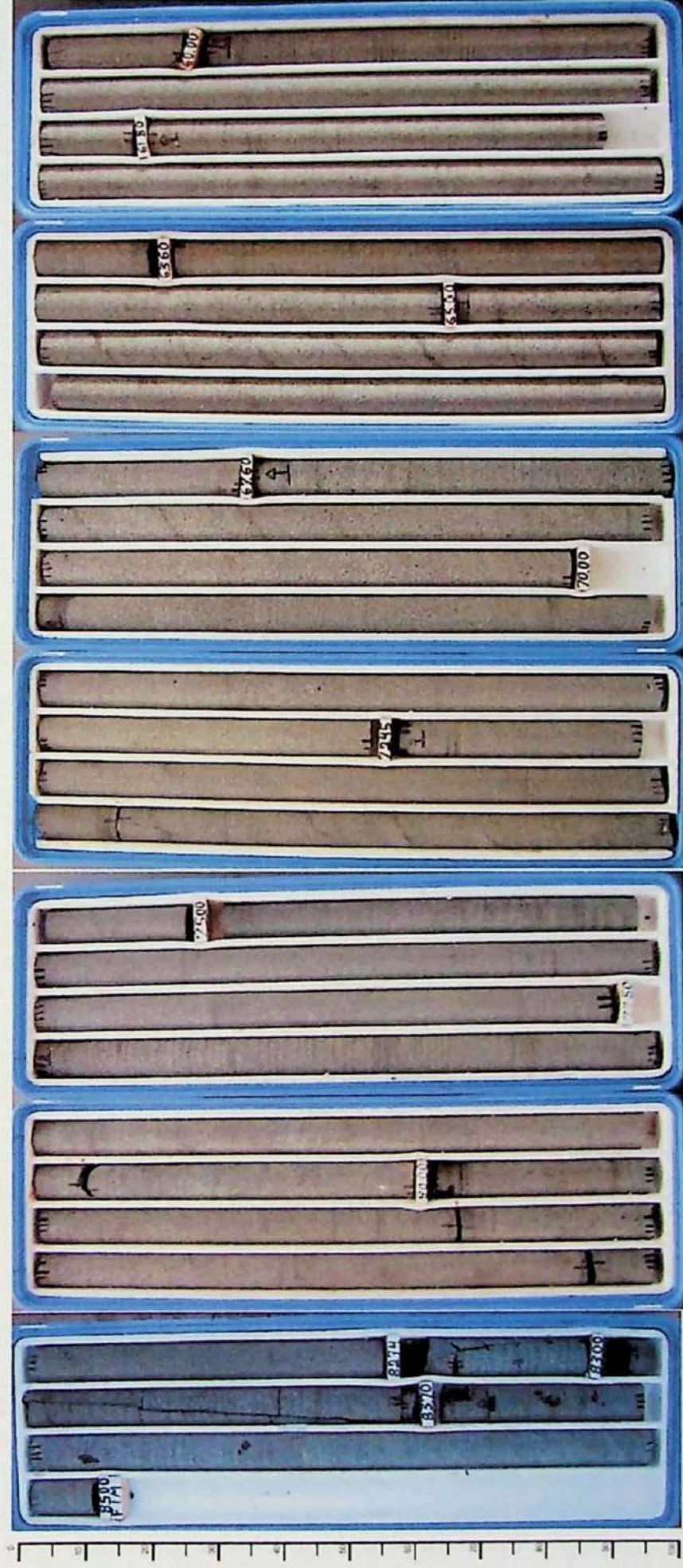
Anexo 21: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-01 no trecho selecionado





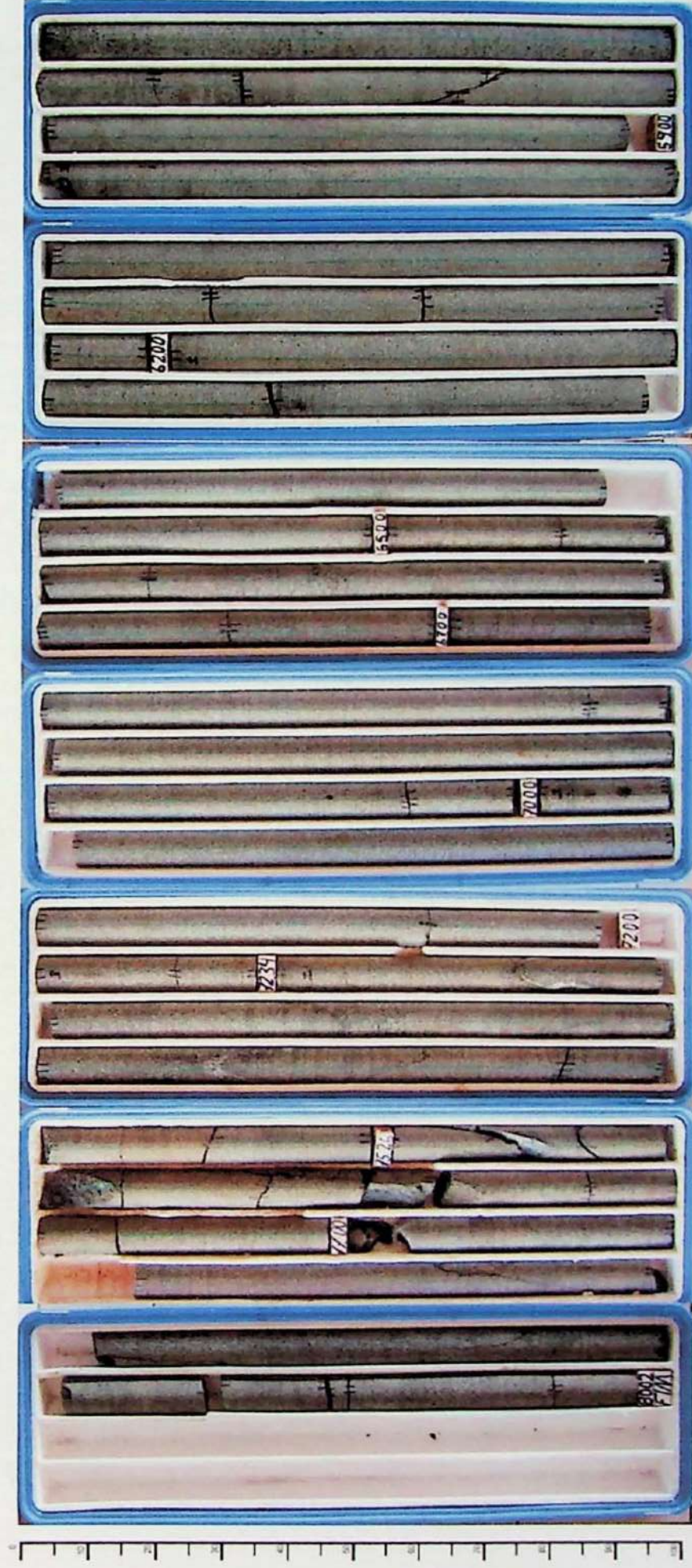
Anexo 22: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-02 no trecho selecionado





Anexo 23: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-03 no trecho selecionado





**Anexo 24:** Fotos dos testemunhos da sondagem SM-04 no trecho selecionado





**Anexo 25: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-05 no trecho selecionado**





Anexo 26: Fotos dos testemunhos da sondagem SM-06 no trecho selecionado



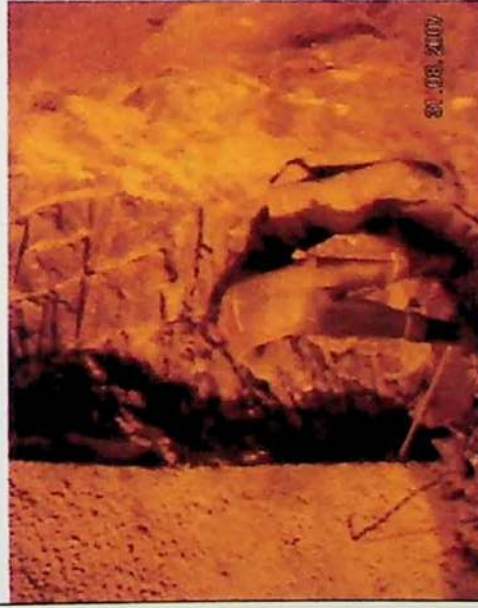
**Frente de escavação**



**Região da abóboda**



**Lateral esquerda**



**Lateral direita**



**Detalhe da frente de escavação**



**Anexo 27: Foto da frente de escavação na área da SM-05**

**Anexo 28: Foto da frente de escavação na área da SM-06**







DOAÇÃO

IGC-USP

Data: 02/05/08



