

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ELAINE NOGOSEKE

COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA
PROJETOS BÁSICOS DE PCH'S USANDO O SISTEMA RMR
APLICAÇÃO NO PROJETO BÁSICO DA PCH MORRO GRANDE - RS

São Carlos

2009

ELAINE NOGOSEKE

COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA
PROJETOS BÁSICOS DE PCH'S USANDO O SISTEMA RMR
APLICAÇÃO NO PROJETO BÁSICO DA PCH MORRO GRANDE - RS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

São Carlos

2009

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo incentivo acadêmico oferecido.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho, pela orientação, discussões e sugestões que colaboraram para o desenvolvimento deste estudo.

Ao departamento de Geotecnia, que permitiu a realização deste trabalho, aos professores pelos conhecimentos transmitidos, e aos funcionários Maristela, Álvaro e Neiva, sempre muito atenciosos.

À Design Head Engenharia e Construtora pelo fornecimento de dados sobre a PCH Morro Grande, em especial aos amigos Alberto e Bete pelo apoio e compreensão neste período, ao Alvaro pelos esclarecimentos em questões técnicas, e ao Anderson por todo o auxílio dado em campo.

Aos amigos feitos em São Carlos, Juliana, Dani, Daninha, Kelly, Wagner, Sérgio, Rafaela, Juan, Felipe, Junio, Simone, Valéria, Vanessa, Luciene e Crisley, e em especial à Aline, pela amizade e carinho.

Aos meus pais, por todo incentivo e carinho que me deram em todos os momentos da minha vida. À Angela e à Debora, minhas grandes amigas, que acompanharam os primeiros passos dessa jornada, aos amigos Gustavo, Edgar, Elis e Felipe.

Em especial ao Leonardo, que me acompanhou nesse período, pelo incentivo, amizade e amor dedicados.

RESUMO

Com a abertura do setor de geração de energia elétrica no país houve um aumento do número de projetos para Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs. Os estudos geológico-geotécnicos necessários para este tipo de obra tiveram que se adaptar às necessidades deste novo setor, sem haver perda da qualidade. O objetivo deste trabalho foi o aprimoramento dos estudos de compartimentação geológico-geotécnicos, utilizando um dos sistemas de classificação de maciços rochosos mais conhecidos: o Sistema RMR – rock mass rating – (Bieniawski, 1973), analisando as vantagens, as desvantagens, e o potencial de aplicação do método. A pesquisa foi aplicada na PCH Morro Grande, localizada no Rio Grande do Sul, que apresenta uma grande homogeneidade geológica, sendo o embasamento constituído por derrames basálticos da Formação Serra Geral. Foram propostas algumas modificações na forma de aplicação do sistema RMR, como não pré-compartimentar o maciço, aplicar a classificação diretamente nos testemunhos de sondagem e de forma parcial nos afloramentos, e substituir o RQD (rock quality designation) pelo IQR (índice de qualidade da rocha). Para caracterizar a resistência da rocha foram feitos ensaios de compressão puntual, associados aos diferentes graus de alteração da rocha. O resultado foi apresentado em seções do eixo da barragem e do circuito hidráulico. A metodologia proposta resultou na compartimentação detalhada do maciço rochoso, na área das estruturas da PCH, mostrando-se uma ferramenta útil para a determinação da compartimentação de maciços rochosos, principalmente de maciços homogêneos, podendo ser aplicada de forma rápida e a um custo baixo para o projeto.

ABSTRACT

The opening of the electric production sector in Brazil causes an increase amount of Small Hydroelectric Power Station – PCH's – project. The necessities geological-geotechnical studies for this kind of construction had to be adapted to this new sector necessity, without quality losses. This research aim was the improvement of the geological-geotechnical studies, using one of the most well-known rock mass classification systems: the RMR system – rock mass rating – (Bieniawski, 1973), and analyze the advantage, the disadvantage, and potential of this method application. This research was applied to Morro Grande PCH, located on Rio Grande do Sul State – Brazil, which has great geologic homogeneity, and its rock foundation is basaltic rocks of the Serra Geral Formation. Some modification in the RMR application way has been proposal, like don't pre-divide the rock mass, apply the system directly in the core logging and partially to the outcrops, and change RQD (rock quality designation) by IQR (rock quality index). To rock strength have been established by point-load test, for the different weathering degrees of the rock samples. The results are presented on profiles of the structures axis. The propose method resulted in detailed compartmentalization of the structures areas, turning into an useful tool to assist the rock mass analyses, mainly to homogeneous rock masses, been applied quickly and at low costs.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1.	O setor hidrelétrico do Brasil.....	3
2.2.	Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's.....	4
2.3.	Caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos.....	5
2.3.1.	Elemento rochoso.....	5
2.3.1.1.	Litologia	6
2.3.1.2.	Alteração	6
2.3.1.3.	Coerência	7
2.3.1.4.	Resistência	8
2.3.2.	Ensaio de compressão puntual	9
2.3.3.	Descontinuidades	13
2.3.3.1.	Orientação	14
2.3.3.2.	Número de famílias	14
2.3.3.3.	Persistência	14
2.3.3.4.	Alteração das paredes das descontinuidades	15
2.3.3.5.	Rugosidade	15
2.3.3.6.	Abertura.....	16
2.3.3.7.	Preenchimento	16
2.3.3.8.	Espaçamento.....	16
2.3.3.9.	Grau de fraturamento	17
2.4.	Classificação de maciços rochosos.....	18
2.4.1.	Rock Quality Designation – RQD	23
2.4.2.	Classificação de Barton – Sistema Q.....	23
2.4.3.	Classificação de Bieniawski – Sistema RMR.....	28
2.4.4.	Classificações brasileiras utilizadas em barragens.....	32
2.4.4.1.	Metodologia do IPT	32
2.4.4.2.	Classificação geotécnica preliminar de Guidicini	33
2.4.4.3.	Modelo de compartimentação de Monticeli.....	33
2.4.5.	Casos de aplicação de sistemas de classificação em barragens.....	35

3.	MÉTODO	37
3.1.	Planejamento	38
3.1.1.	Definição da metodologia e seleção do sistema de classificação.....	38
3.2.	Coleta de dados	39
3.2.1.	Mapeamento da área.....	39
3.2.2.	Descrição das sondagens	39
3.2.2.1.	Análise petrográfica	40
3.2.2.2.	Ensaio de carga puntual	40
3.3.	Aplicação.....	41
3.3.1.	Caracterização dos parâmetros nas sondagens.....	42
3.3.2.	Classificação dos afloramentos.....	43
3.3.3.	Integração em seções tipo.....	43
3.3.4.	Estimativa de parâmetros geomecânicos.....	44
3.4.	Análise.....	44
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
4.1.	Localização	45
4.2.	Caracterização da PCH.....	46
4.3.	Geologia regional da área.....	48
4.3.1.	Bacia do Paraná	48
4.3.1.1.	Formação Serra Geral	50
4.3.1.2.	Aspectos estruturais	51
5.	COLETA E ANÁLISE DOS DADOS	53
5.1.	Mapeamento da área de estudo	53
5.1.1.	Análise estrutural das fraturas.....	59
5.2.	Descrição das sondagens.....	62
5.2.1.	Litologia.....	64
5.2.2.	Grau de alteração	64
5.2.3.	Descontinuidades	65
5.3.	Ensaio de laboratório.....	66
5.3.1.	Análise petrográfica	66
5.3.2.	Ensaio de carga puntual	67
6.	APLICAÇÃO DO SISTEMA RMR.....	68
6.1.	Parâmetros.....	68
6.2.	Classificação das sondagens.....	70
6.3.	Classificação dos afloramentos	75

7.	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS EM SEÇÕES TIPO.....	75
8.	PARÂMETROS GEOMECÂNICOS.....	78
9.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
9.1.	Classificação RMR aplicada às sondagens.....	81
9.2.	Comparação: Modelo Segmentado X Modelo por Manobra	82
9.3.	Classificação RMR aplicada aos afloramentos	83
9.4.	Integração em seções tipo.....	84
9.5.	Compartimentação do maciço rochoso	86
10.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
	REFERENCIAS	94
	ANEXO A.....	101
	ANEXO B.....	105
	ANEXO C	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forma da amostra e tipo de ensaio de compressão puntual indicado. (ISRM, 1985).....	10
Figura 2 – Gráfico do fator de correção do tamanho. (ISRM, 1985).....	12
Figura 3 – Perfis de rugosidade (Barton <i>et al.</i> 1974 apud Serra Junior e Ojima, 1998).....	15
Figura 4 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.	37
Figura 5 – Equipamento de compressão puntual, e posicionamento da amostra para o ensaio.	41
Figura 6 – Aferição das dimensões da amostra, largura e diâmetro.	41
Figura 7 – Figura esquemática coma a localização da área de estudo.....	45
Figura 8 – Layout das estruturas da PCH Morro Grande.....	47
Figura 9 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (modificado de Milani, 1998).....	49
Figura 10 - Arcabouço Estrutural da Bacia do Paraná. (modificado Zalán <i>et al.</i> 1987).....	52
Figura 11 – Afloramento do ponto 01, detalhe para o fraturamento sub-horizontal.	53
Figura 12 – Afloramento do ponto 05.	55
Figura 13 – Afloramento do ponto 12, detalhe para o forte fraturamento sub-horizontal, e para decomposição esferoidal da rocha.....	58
Figura 14 – Diagramas de rosetas das fraturas. (N = número de medidas).....	60
Figura 15 – Mapa de pontos de campo com diagrama de roseta das fraturas sobreposto ao esboço geológico da área.	61
Figura 16 – Foto dos testemunhos da sondagem SR1, caixas 1 e 2.	62
Figura 17 – Foto dos testemunhos da sondagem SR2, caixas 1, 2 e 3.	62
Figura 18 – Foto dos testemunhos da sondagem SR2, caixas 4, 5 e 6.	63
Figura 19 – Foto dos testemunhos da sondagem SR3, caixas 1 e 2.	63
Figura 20 – Foto dos testemunhos da sondagem SR4, caixas 1, 2 e 3.	63
Figura 21 – Amostra de dacito com fratura aberta preenchida por veio de zeólita.	64
Figura 22 – Amostras de rocha no diferentes graus de alteração encontrados.	65
Figura 23 – Exemplos de rugosidade encontrados nas fraturas das sondagens.	66
Figura 24 – Boletim de descrição da sondagem SR1, com a classificação RMR.	71
Figura 25 – Boletim de descrição da sondagem SR2, com a classificação RMR.	72
Figura 26 – Boletim de descrição da sondagem SR3, com a classificação RMR.	73
Figura 27 – Boletim de descrição da sondagem SR4, com a classificação RMR.	74
Figura 28 – Seção da barragem com compartimentação pelo sistema RMR.....	79
Figura 29 – Seção do circuito hidráulico com compartimentação pelo sistema RMR.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de porte de barragens. (CBGB, 1983).....	4
Tabela 2 – Graus de alteração de rocha (IPT, 1984, apud Serra Junior e Ojima, 1998)	6
Tabela 3 – Graus de coerência (Guidicini <i>et al</i> , 1972a).....	8
Tabela 4 – Graus de resistência (Guidicini <i>et al</i> , 1972a)	8
Tabela 5 – Classificação de persistência (ISRM, 1978)	15
Tabela 6 – Classificação de aberturas de descontinuidades (ISRM, 1978).....	16
Tabela 7 – Classificação de espaçamento (ISRM, 1978).....	17
Tabela 8 – Graus de fraturamento (Guidicini <i>et al</i> , 1972a).....	17
Tabela 9 – Valores de RQD – Classificação geomecânica de BARTON <i>et al</i> , (1974).....	25
Tabela 10 – Valores de J_n – Classificação geomecânica de BARTON <i>et al</i> , (1974).....	25
Tabela 11 – Valores de J_r – Classificação geomecânica de BARTON <i>et al</i> , (1974).....	25
Tabela 12 – Valores de J_a – Classificação geomecânica de BARTON <i>et al</i> , (1974).....	26
Tabela 13 – Valores de J_w – Classificação geomecânica de BARTON <i>et al</i> , (1974).	26
Tabela 14 – Valores de SRF – Classificação geomecânica de BARTON <i>et al</i> , (1974).....	27
Tabela 15 – Classes de maciços rochosos – Sistema Q (BARTON <i>et al</i> , 1974).	28
Tabela 16 – Classificação geomecânica de Bieniawski (1989).	29
Tabela 17 – Efeito da direção geológica e do mergulho na construção de túneis	30
Tabela 18 – Efeito da direção geológica em fundações de barragens (Bieniawski e Orr, 1976).....	30
Tabela 19 – Orientação para a classificação das condições das descontinuidades.....	30
Tabela 20 – Classes do maciço determinada pela soma total dos pesos.....	30
Tabela 21 – Significado das classes.....	30
Tabela 22 – Planilha de aplicação do sistema RMR na sondagem SR1.	70
Tabela 23 – Planilha de atribuição dos pesos relativos aos afloramentos de campo.	75
Tabela 24 – Parâmetros geomecânicos calculados a partir da nota RMR.....	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
AHE	Aproveitamento Hidrelétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBGB	Comitê Brasileiro de Barragens
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
IQR	Índice de Qualidade da Rocha
ISRM	International Society for Rock Mechanics
NATM	New Austrian Tunnelling Method
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
RSR	Rock Structure Rating
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHE	Usina Hidrelétrica
UTM	Sistema Universal Transverso de Mercator

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 90 houve um crescente aumento nos estudos de projetos de PCH's causado pela abertura do setor de geração de energia elétrica para a iniciativa privada. As PCH's aparecem com a vantagem de aproveitar potenciais hídricos em locais onde não se poderia construir uma grande obra e pulverizando empreendimentos em diversos municípios, causando menos impactos ao meio ambiente. As áreas diretamente afetadas normalmente compreendem poucos hectares, e os reservatórios, em sua maioria, se caracterizam apenas por um aumento de poucos metros no nível do rio, atingindo poucos proprietários.

Apesar de poder ser considerada uma obra muito menor em relação às hidrelétricas de grande porte, as PCH's são obras de engenharia com grandes riscos sociais e econômicos envolvidos, demandando todos os cuidados em relação aos condicionantes geológico-geotécnicos na elaboração de seus projetos. A realização de um número menor de investigações e ensaios é comumente justificada por condições de contorno de projeto menos críticas, como o nível mais baixo de tensões no maciço e reservatórios de menor porte.

Os estudos geotécnicos necessários para esse tipo de obra já são bem conhecidos, e tiveram um grande avanço nas décadas de setenta e oitenta, quando se construíram as principais usinas hidrelétricas do país. Entretanto, na sua maioria, são métodos voltados às grandes barragens, necessitando de recursos significativos, muitas vezes não aplicáveis aos projetos de PCH's. Este cenário indica que é necessário achar o equilíbrio entre os métodos de investigação tradicionais, os recursos disponíveis para o estudo do maciço, e o grau de conhecimento necessário para a implantação da obra. Nesse sentido o estudo de compartimentação do maciço rochoso aparece como uma alternativa para melhorar o

conhecimento geológico-geotécnico da área, permitindo já nas fases iniciais de projeto, a elaboração de modelos geotécnicos e geomecânicos.

O objetivo deste trabalho foi o aprimoramento dos estudos de compartimentação geológico-geotécnicos atualmente utilizados nos projetos de PCH's, tendo como referência geral o sistema de classificação de maciços rochosos RMR. O estudo foi aplicado na área da PCH Morro Grande (RS), com a avaliação dos ganhos obtidos no entendimento geotécnico deste local em relação a abordagem tradicional.

Para tanto foram feitas adequações na forma de aplicação deste sistema de classificação, sem a pré-divisão do maciço em zonas homogêneas, e utilizando o sistema RMR como ferramenta para determinar a compartimentação do maciço rochoso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O setor hidrelétrico do Brasil

Segundo Paulon e Martins Neto (2000) a primeira experiência com energia elétrica no Brasil ocorreu no ano de 1883 em Diamantina, Minas Gerais, com a extração de diamantes. Foram a mineração, as indústrias e a iluminação pública que impulsionaram a criação das primeiras usinas. A maioria destas unidades era de pequena potência, implantadas diretamente abaixo das quedas d'água. A partir de 1920 passam a ser construídas usinas de maior porte, capazes de atender à constante ampliação do mercado, constituído principalmente pela iluminação pública e a difusão dos bondes elétricos, além das indústrias. Até o final dos anos 40 os principais empreendimentos hidrelétricos tinham sido incorporados a duas companhias estrangeiras - a Light, canadense, e a Amforp, americana - que detinham o monopólio do setor no país. Em 1945 foi criada a primeira empresa de eletricidade do governo federal, a Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF, que marca a intervenção do estado na geração da energia elétrica. A partir de 1950 o modelo energético no país muda, sendo criadas as grandes empresas estaduais e federais, com a tendência à construção de usinas de grande porte, e dissociando a geração de energia da distribuição.

Cruz (1996) relata a evolução do ciclo das barragens brasileiras, destacando nas décadas de 50 e 60 a informalidade e a falta de conhecimento técnico. O acúmulo do conhecimento gerado neste período faz com que nos anos seguintes ocorra uma crescente formalização dos projetos, sendo desenvolvidos os laboratórios de pesquisas, e passando a ocorrer concorrências públicas para as fases construtivas. Os projetos, que antes se encontravam concentrados na região centro-sul, passam a ser desenvolvidos também no norte e na região amazônica. Entre as décadas de 80 e 90 surge a preocupação com o meio ambiente, e os estudos de impacto ambiental passam a ser obrigatórios. Segundo o autor, a partir

deste período terminam-se os projetos em andamento e não se iniciam novas obras. Mais de uma década depois da publicação do trabalho de Cruz (1996), o setor hidrelétrico se vê novamente voltado aos projetos de obras de pequeno porte. Em 1995 ocorre a reestruturação do setor elétrico brasileiro, terminando o monopólio estatal da geração de energia. Em 1996 é criada a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que tem o papel de regular e fiscalizar o setor, assumindo as atividades do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE.

2.2. Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH's

PCH's são pequenas usinas hidrelétricas, cujo objetivo é a geração de energia elétrica. O termo PCH foi definido pela ANEEL através da Resolução 395 de 04 de dezembro de 1998, como sendo os aproveitamentos hidrelétricos de potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, e com área inundada de até 3 Km² para a cheia centenária, não havendo demais restrições quanto ao tipo, arranjo, ou dimensão das estruturas utilizadas.

As PCH's podem apresentar estruturas de grande porte, principalmente com relação à barragem. Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens – CBGB (1983) as barragens podem ser de pequeno, médio e grande porte conforme a Tabela 1, dependendo da altura e do volume de água armazenada no reservatório.

Tabela 1 – Classificação de porte de barragens. (CBGB, 1983)

Categoria	Altura (m)	Armazenamento (m³)
Pequena	5 a 10	0,05 x 10 ⁶ a 1,0 x 10 ⁶
Média	15 a 30	1,0 x 10 ⁶ a 50,0 x 10 ⁶
Grande	Maior que 30	Maior que 50,0 x 10 ⁶

As barragens podem também ser classificadas quanto ao potencial de risco que oferecem para as pessoas e benfeitorias (Gehring, 1987), em função de fatores como: tipo de barragem, volume do reservatório, altura da barragem, distância da barragem ao primeiro aglomerado urbano ou propriedade à jusante, diferença de cotas entre a superfície do reservatório e o núcleo urbano, densidade populacional à jusante e sismicidade de região.

Os componentes básicos de uma PCH são: barragem, tomada d'água, canal e/ou túnel adutor, câmara de carga, conduto forçado, casa de força e canal de fuga, sendo que a presença dessas estruturas depende do tipo de arranjo da PCH.

2.3. Caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos

Um maciço rochoso é constituído por um conjunto de blocos de rocha justapostos, separados por descontinuidades, e é a relação entre a quantidade de descontinuidades e a escala da obra que indica o grau de isotropia do meio (Serra Júnior e Ojima, 1998). Contudo, o comportamento do maciço não se restringe apenas a quantidade de descontinuidades, mas é influenciado pelas condições que essas descontinuidades apresentam. Portanto, algumas considerações sobre elementos geológicos envolvidos tornam-se necessárias.

2.3.1. Elemento rochoso

A porção rochosa apresenta características que exercem uma parcela de influência no comportamento do maciço como um todo. Isso faz com que uma descrição correta e padronizada dessas características seja necessária para um bom resultado.

2.3.1.1. Litologia

Segundo Serra Junior e Ojima (op.cit) a classificação litológica para aplicação em engenharia deve apoiar-se em conceitos petrográficos de uso corrente da geologia, mas deve ser simplificada e objetiva, adotando como critérios o grupo genético, as estruturas principais, textura, granulação e mineralogia. Um maior detalhamento litológico pode ser realizado conforme haja necessidade no decorrer dos estudos.

2.3.1.2. Alteração

Alteração é o conjunto de modificações físico-químicas a que as rochas se encontram submetidas, e que conduz à degradação de suas características mecânicas (Serra Junior e Ojima, 1998). A caracterização do estado de alteração é feita tátil-visualmente, com base em variações do brilho e da cor dos minerais da rocha, além da friabilidade. A

Tabela 2 apresenta uma classificação básica de graus de alteração de rochas.

Guidicini *et al* (1972a) consideram o grau de alteração o parâmetro mais difícil de ser definido em campo, e limitam a três os graus de alteração, devido ao fato de que como a determinação de limites é muito subjetiva, o emprego de um maior número de graus seria pouco prática. Os graus propostos são rocha sã (A1); alterada (A2); e muito alterada (A3).

Tabela 2 – Graus de alteração de rocha (IPT, 1984, apud Serra Junior e Ojima, 1998)

Siglas	Denominação	Características da rocha
A1 W1 RS	Sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas insipientes. Neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
A2 W2 RAD	Moderadamente alterada	Apresenta minerais moderadamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3 W3 RAM	Muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4 W4 REA	Extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Segundo Vaz (1996) a utilização de critérios baseados na alteração mineralógica e na porcentagem relativa de solos e blocos, utilizados para a definição de horizontes de alteração, é subjetiva e dificilmente reproduzíveis por observadores diferentes em um mesmo perfil.

Para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1983) a caracterização do estado de alteração das rochas é normalmente abordada através de critérios qualitativos, onde a avaliação é visual, ou quantitativos, onde são utilizados diversos ensaios para avaliação das características mecânicas das rochas, tais como: deformabilidade e ruptura; velocidade de propagação de ondas elásticas; porosidade e permeabilidade; expansibilidade; e desgaste em meio úmido. Os critérios de alteração qualitativos se aplicam bem às rochas duras, mas em rochas sedimentares estas observações podem não apresentar um resultado satisfatório, sendo necessária a utilização de métodos quantitativos, ou a utilização de parâmetros de coerência.

2.3.1.3. Coerência

A coerência baseia-se em propriedades como tenacidade, dureza e friabilidade das rochas, e também é determinada tátil-visualmente com a observação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (Guidicini *et al*, 1972a). A Tabela 3 apresenta os critérios para definição da coerência das rochas.

Segundo Serra Junior e Ojima (1998), os parâmetros de alteração e coerência permitem perceber a ação intempérica sobre o maciço rochoso, e conseqüentemente as possíveis alterações nas características mecânicas das rochas, especialmente sobre a resistência, que sofre significativa redução nos estágios iniciais de alteração.

Tabela 3 – Graus de coerência (Guidicini *et al*, 1972a)

Siglas	Denominação	Características da rocha
C1	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	Moderadamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
C3	Pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmete. Superfície facilmente riscável por lâmina de aço. Escarificável.
C4	Incoerente	Quebra com a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

2.3.1.4. Resistência

Segundo Guidicini *et al* (1972a) entende-se por grau de resistência aquele relacionado com a compressão simples. Os diferentes graus de resistência são estabelecidos com base nos valores de resistência obtidos em ensaios de compressão uniaxial. Este parâmetro é muito utilizado na caracterização de maciços rochosos para fins de engenharia, e as rochas podem ser subdivididas em cinco níveis de resistência, conforme a Tabela 4.

O ensaio para obtenção da resistência a compressão uniaxial é relativamente dispendioso, requer tempo para a preparação de amostras e equipamentos especiais para a sua realização. Entretanto, testes indiretos são comumente utilizados para se obter esse parâmetro, como teste de carga puntual e o martelo de Schmidt. São testes mais simples, requerem menos preparação de amostras e equipamentos menos sofisticados.

Tabela 4 – Graus de resistência (Guidicini *et al*, 1972a)

Siglas	Denominação	Resistência (MPa)
R1	Muito resistente	>120
R2	Resistente	120 – 60
R3	Pouco resistente	60 – 30
R4	Branda	30 – 10
R5	Muito Branda	<10

2.3.2. Ensaio de compressão puntual

A resistência das rochas é um dos parâmetros que não pode ser obtido diretamente sem a realização de ensaios específicos de campo ou de laboratório. Entre os diferentes tipos de ensaios normalmente utilizados para este fim, o Ensaio de Compressão Puntual é um dos que necessita de equipamentos e procedimentos mais simples, tanto na preparação das amostras, como na sua execução, podendo ser realizado inclusive no canteiro de obras.

O ensaio de compressão puntual de fragmentos rochosos irregulares foi introduzido na Rússia no final da década de 50 (Guidicini *et al*, 1972b). Foi usado como uma forma de estimar a resistência a compressão uniaxial, parâmetro usado para determinar a resistência da rocha intacta, e tem sido largamente utilizado por sua facilidade de operação e preparação de amostra. A correlação entre o índice de carga puntual (I_s) com a resistência a compressão uniaxial (q_u) é obtida de forma empírica, e tem sido motivo de discussão.

D'Andrea *et al* (1964, apud Kaharman, 2001) realizaram testes de compressão uniaxial e de carga puntual em amostras com 25mm de diâmetro, e utilizaram um modelo de regressão linear para obter a correlação entre os dois ensaios. Broch e Franklin (1972, apud Kaharman, op.cit) estabeleceram que a resistência a compressão é aproximadamente igual a 24 vezes o índice de carga puntual, referindo-se a uma amostra com 50mm de diâmetro. Para Guidicini *et al*, (op.cit) os parâmetros usualmente utilizados para correlacionar a resistência a compressão simples com o índice de carga puntual podem levar a grandes dispersões de resultados, ocorrendo uma grande variação dos valores de I_s obtidos quando se variam as dimensões da amostra. Bieniawski (1975) demonstrou que a resistência a compressão uniaxial (q_u) é aproximadamente 24 vezes o índice de carga puntual (I_s). Nos ensaios realizados por Kaharman (op.cit) os valores obtidos no teste de carga puntual mostraram uma forte correlação com os valores de resistência a compressão das amostras ensaiadas, para um diâmetro corrigido de 50mm ($I_{s(50)}$).

Conforme as orientações da ISRM - International Society for Rock Mechanics (1985), o ensaio consiste no carregamento de uma amostra de rocha entre duas ponteiros cônicas até a ruptura. O Índice de Carga Puntual (I_s) é obtido em função da carga aplicada (Q) e da distância (D) entre as ponteiros, que estão aplicando a carga, no momento da ruptura. A orientação do carregamento a ser realizado é determinada pela forma da amostra (Figura 1).

Amostras de testemunhos de sondagem, com formato cilíndrico, podem ser ensaiadas com carregamento diametral, se a relação entre a largura da amostra (L) e a distância entre os pontos de aplicação da carga (D) for igual ou maior a 1. O carregamento deverá ser axial, se a relação entre a espessura da amostra (W) e D for entre 0,3 e 1. Amostras irregulares ou aproximadamente cúbicas também podem ser ensaiadas, desde que a relação D/W esteja entre 0,3 e 1, e a largura L seja maior ou igual a distância D . O ideal é que sejam realizados pelo menos 10 ensaios, pois o índice de carga puntual é calculado através da média dos resultados, excluindo-se os dois valores mais altos e mais baixos.

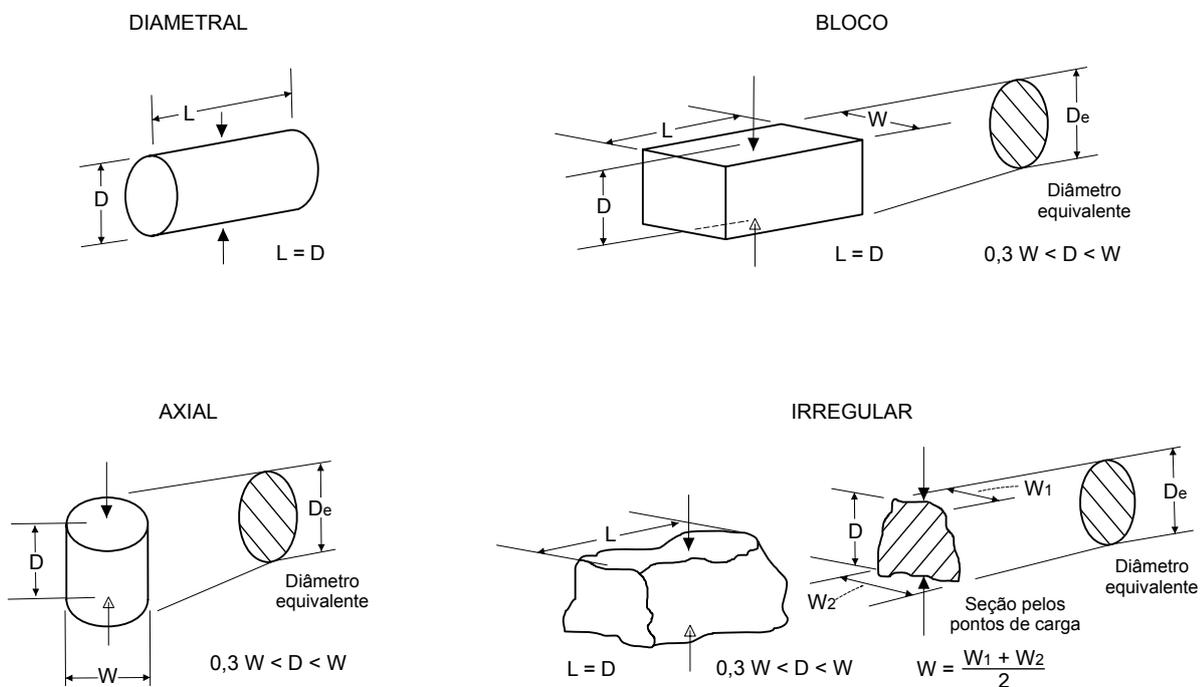


Figura 1 – Forma da amostra e tipo de ensaio de compressão puntual indicado. (ISRM, 1985)

O índice de carga puntual (I_s) é calculado pela equação (1), sendo Q a carga requerida para romper a amostra, e D_e o diâmetro equivalente, que é dado para ensaios diametrais pela equação (2), e corresponde à área mínima da seção transversal da amostra (*minimal cross-sectional area*), e não a área da ruptura (Brook, 1985). Para ensaios axiais, e de amostras irregulares ou em blocos pela equação (3), onde $A = WD$.

$$I_s = Q/D_e^2 \quad (1)$$

$$D_e^2 = D^2 \quad (2)$$

$$D_e^2 = 4A/\pi \quad (3)$$

O I_s precisa ser corrigido para o tamanho de 50mm ($I_{s(50)}$), que é definido como o valor de I_s que seria encontrado em um teste diametral com $D = 50$ mm. A melhor maneira de se obter a correção do tamanho é plotar em um gráfico log-log as diversas relações entre Q e D_e^2 , o que geralmente resulta em uma linha reta, obtendo-se desta forma, o Q_{50} correspondente ao $D_e^2 = 2500\text{mm}^2$ (ou $D_e = 50$ mm). O índice de carga puntual corrigido $I_{s(50)}$ é então :

$$I_{s(50)} = Q_{50}/50^2 \quad (4)$$

Quando não se dispõe de amostras suficientes para elaboração do gráfico, ou o diâmetro das amostras não varia, a correção do tamanho pode ser obtida através da equação (5), sendo F o fator de correção do tamanho, obtido através do gráfico da Figura 2 ou pela expressão empírica da equação (6).

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (5)$$

$$F = (D_e/50)^{0,45} \quad (6)$$

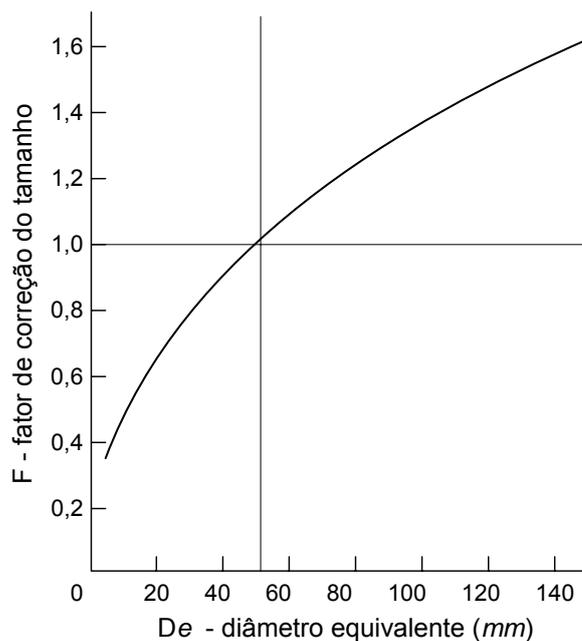


Figura 2 – Gráfico do fator de correção do tamanho. (ISRM, 1985)

O índice resistência puntual $I_{s(50)}$ pode ser usado para estimar a resistência a compressão uniaxial (q_u), e desde que corretamente realizado é uma forma fácil e confiável de se obter a resistência da rocha. Deve-se procurar utilizar diretamente o $I_{s(50)}$ para a classificação de rochas, uma vez que correlações com a resistência a compressão uniaxial são aproximadas. Segundo a ISRM (1985) a resistência a compressão uniaxial (q_u) corresponde a 20 à 25 vezes o índice de resistência puntual ($I_{s(50)}$).

Durante a realização dos ensaios, pode ocorrer a penetração das ponteiros na amostra antes da ruptura, podendo resultar em uma distância final (D_f) menor que a inicial (D_i). Segundo a ISRM (op.cit) o erro em se assumir D_f igual a D_i é desprezível. Contudo se a penetração for significativa, a distância a ser considerada deve ser a final. Basu e Aydin (2006) fizeram ensaios de compressão puntiforme em amostras graníticas em diferentes graus de alteração, e mediram a diferença entre as distâncias iniciais e finais das amostras. A correlação com a resistência a compressão uniaxial foi melhor para a utilização da

distância final. Estes autores observaram ainda que a penetração das ponteiras é maior nas amostras menos alteradas.

A exemplo da utilização do ensaio de compressão puntual em estudo de caracterização geomecânica de maciço rochoso em fundação de barragem, Dobereiner *et al* (1987) relatam a realização dos ensaios em campo de 132 amostras de granito, que foram ensaiadas diametralmente. Segundo os autores correlacionando-se a média dos valores obtidos com os dados da compressão uniaxial, obteve-se uma relação de $q_u = 22,4 I_{s(50)}$.

2.3.3. Descontinuidades

As descontinuidades são sem dúvida o principal condicionante do comportamento de um maciço. Sem elas o maciço se comportaria como rocha intacta, dependendo apenas das características intrínsecas do material, como coesão e ângulo de atrito. Mas na realidade a resistência, a deformabilidade, a estabilidade, e a permeabilidade entre outras propriedades do maciço rochoso, estão muito mais associadas à natureza das descontinuidades do que à rocha propriamente dita (Serra Júnior e Ojima, 1998).

Descontinuidade é um termo geral que engloba feições geológicas que interrompem a continuidade física do meio rochoso, como fraturas, falhas, acamamentos, contatos, foliações e xistosidades. Ela pode ser definida como qualquer superfície natural em que a resistência a tração é nula ou muito baixa (ISRM, 1978). Os principais tipos de descontinuidades são falhas e fraturas. As fraturas, ou juntas, caracterizam-se por ser um plano de quebra da continuidade da rocha sem movimentação relativa significativa entre os blocos. Um conjunto de fraturas com a mesma orientação e origem forma uma família. A falha é um plano onde ocorreu deslocamento de um bloco em relação ao outro.

Segundo Gabrielsen (1990), qualquer pessoa que esteja trabalhando com o estudo de rochas, independentemente da escala utilizada, irá ter que lidar com descontinuidades, sejam fraturas ou falhas. Segundo o autor, as descontinuidades representam a parte mais fraca do corpo rochoso, e o local onde todos os tipos de processos geológicos (geoquímico, termal e mecânico) podem interagir.

2.3.3.1. Orientação

É a atitude de um plano de descontinuidade no espaço. É descrito pela direção e o mergulho do plano. De acordo com Magalhães e Cella (1998), a direção é definida pelo ângulo entre o norte e a linha de intercessão do plano da descontinuidade, com o plano horizontal, e o mergulho é o ângulo de inclinação do plano com o plano horizontal. A reta do mergulho é a reta de máxima inclinação no plano, perpendicular à direção.

2.3.3.2. Número de famílias

Um conjunto de descontinuidades com mesma orientação e origem caracteriza uma família de fraturas. Quando ocorre mais de uma família elas são numeradas, de acordo com o grau de importância para estudo. O conjunto das famílias de um determinado local define um sistema de fraturas.

2.3.3.3. Persistência

Segundo a ISRM (1978), a persistência implica na extensão ou dimensão de uma descontinuidade em um plano, e pode ser quantificada observando-se o comprimento do traço da descontinuidade em uma superfície exposta do maciço. As descontinuidades podem ter seus traços acabando em outras descontinuidades, ou terminando na própria rocha. De acordo com Serra Junior e Ojima (1998), “a persistência tem especial influência na resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos, com importância decisiva em certas situações de taludes e fundações de barragens”. A ISRM sugere a terminologia apresentada na Tabela 5 para a classificação da persistência das descontinuidades.

Tabela 5 – Classificação de persistência (ISRM, 1978)

Espaçamento (m)	Descrição
< 1	Persistência muito baixa
1 – 3	Persistência baixa
3 – 10	Persistência média
10 – 20	Persistência alta
> 20	Persistência muito alta

Contudo, é um parâmetro difícil de ser utilizado na prática, quando não se dispõe de afloramentos extensos para a observação das descontinuidades, ou quando o estudo é feito sobre testemunhos de sondagem.

2.3.3.4. Alteração das paredes das descontinuidades

A alteração do maciço rochoso não ocorre de forma homogênea. Ela ocorre inicialmente nas áreas aflorantes do maciço, e pelas descontinuidades por onde há a possibilidade de percolação de água. A descrição da alteração das paredes é dada pelo grau de alteração da rocha, e pela espessura que a alteração apresenta.

2.3.3.5. Rugosidade

A rugosidade dos planos de uma descontinuidade é, de maneira geral, caracterizada pelas ondulações e irregularidades dos planos. De acordo com Serra Junior e Ojima (1998), a rugosidade “influência especialmente a resistência ao cisalhamento, sobretudo quando se trata de descontinuidades não preenchidas, conferindo um incremento ao ângulo de atrito, até um nível de tensões a partir do qual se verifica a ruptura.” A rugosidade é quantificada de acordo com seu perfil geométrico, conforme a figura 3.

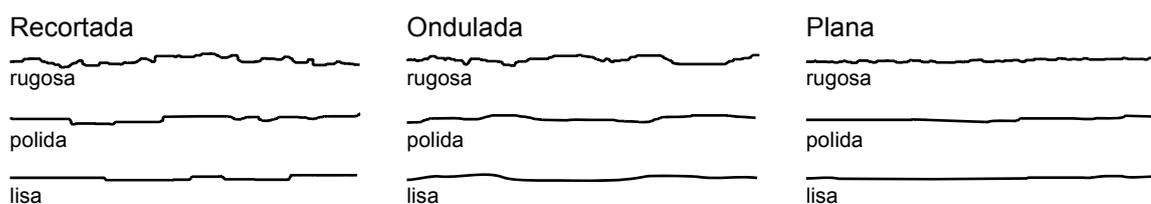


Figura 3 – Perfis de rugosidade (Barton *et al.* 1974 apud Serra Junior e Ojima, 1998).

2.3.3.6. Abertura

A abertura corresponde à distância perpendicular que separa as duas paredes de uma descontinuidade, onde o espaço entre elas pode ser preenchido por ar, água ou outro material de preenchimento. A ISRM (1978) sugere a terminologia apresentada na Tabela 6 para a classificação da abertura de descontinuidades.

Tabela 6 – Classificação de aberturas de descontinuidades (ISRM, 1978)

Abertura	Descrição	
< 0.1 mm	Muito apertada	Fechadas
0.1 – 0.25 mm	Apertada	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente aberta	
0.5 – 2.5 mm	Aberta	Abertas
2.5 – 10 mm	Moderadamente larga	
> 10 mm	Larga	
1 – 10 cm	Muito larga	Afastadas
10 – 100 cm	Extremamente larga	
> 1 m	Cavernosa	

2.3.3.7. Preenchimento

Preenchimento é o termo usado para designar o material presente entre as paredes de uma descontinuidade. O tipo de preenchimento encontrado tem papel importante no comportamento do maciço rochoso, principalmente com relação à resistência ao cisalhamento e à permeabilidade. Segundo Serra Junior e Ojima (1998), a caracterização do preenchimento deve conter a espessura, a caracterização de seus constituintes (granulação, mineralogia, textura, cor) e outras informações que se mostrarem relevantes.

2.3.3.8. Espaçamento

Segundo Magalhães e Cella (1998), o espaçamento refere-se à quantidade de descontinuidades por unidade de medida. Por definição (Brown, 1981 apud Magalhães e Cella, op.cit), o espaçamento é considerado como a distância perpendicular entre duas descontinuidades de uma mesma família, geralmente se referindo à média de espaçamentos da família. A terminologia proposta pela ISRM (op.cit) é dada na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação de espaçamento (ISRM, 1978)

Espaçamento (mm)	Descrição
< 20	Espaçamento extremamente fechado
20 – 60	Espaçamento muito fechado
60 – 200	Espaçamento fechado
200 – 600	Espaçamento moderado
600 – 2000	Espaçamento aberto
2000 – 6000	Espaçamento muito aberto
> 6000	Espaçamento extremamente aberto

2.3.3.9. Grau de fraturamento

O grau de fraturamento expressa a quantidade de fraturas por metro linear de maciço. Utilizado principalmente na descrição de testemunhos, ele difere do espaçamento por não estar relacionado à distância perpendicular entre fraturas de uma mesma família, mas reflete a quantidade de pedaços em que o maciço ficou fragmentado. Guidicini *et al* (1972a) propõe a classificação da Tabela 8 para determinar o grau de fraturamento.

Tabela 8 – Graus de fraturamento (Guidicini *et al*, 1972a)

Siglas	Número de fraturas por metro	Denominação
F1	<1	Ocasionalmente fraturado
F2	1 – 5	Pouco fraturado
F3	6 – 10	Medianamente fraturado
F4	11 – 20	Muito fraturado
F5	>20	Extremamente fraturado

Os métodos detalhados para descrição de discontinuidades podem ser encontrados em trabalhos da ISRM (1978), Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental - ABGE (1983) e Serra Junior e Ojima (1998).

2.4. Classificação de maciços rochosos

Segundo Hoek (2000) é nas primeiras fases de estudo de um projeto, onde ainda são poucas as informações sobre o maciço rochoso, que o uso da classificação de maciços traz grandes benefícios, e serve como um *check-list* que assegura que todas as informações relevantes sejam consideradas. Contudo, o autor ressalta que a utilização da classificação não deve, e nem pode, ser a única fonte de informação na elaboração do projeto.

As classificações de maciços rochosos mais sistematizadas remontam à década de quarenta, com o trabalho de Terzaghi (1946) para o projeto de suportes metálicos em túneis, onde a carga de rocha suportada era estimada com base em classificações descritivas. Hoek (op.cit) destaca as descrições dos maciços rochosos feitas na classificação de Terzaghi, onde são consideradas as características dominantes do comportamento do maciço rochoso, especialmente em condições onde a gravidade é a força dominante. Segundo Hoek (op.cit) as definições claras e concisas, e os comentários práticos incluídos em suas descrições são bons exemplos do tipo de informação que é mais útil para geologia de engenharia.

Lauffer (1958, apud Hoek op.cit.) introduziu o conceito de tempo de auto-sustentação (*stand-up time*) para um vão livre sem suporte, relacionado com a qualidade do maciço rochoso. Essa classificação, voltada principalmente para escavações de túneis, parte do princípio que um aumento no vão do túnel leva a uma significativa redução do tempo disponível para a instalação do suporte. A classificação de Lauffer foi sendo modificada ao longo dos anos por diversos autores, e hoje é parte do método construtivo de túneis conhecido como NATM (*New Australian Tunnelling Method*).

Deere *et al* (1967, apud Hoek op.cit) propôs o RQD (*rock quality designation*), que descreve a qualidade de um testemunho de sondagem baseado no seu grau de fraturamento. Inicialmente desenvolvido para ser um sistema de classificação para construção de túneis e

estimar suportes, passou a ser usado como parâmetro padrão para diversas outras classificações. Segundo Deere e Deere (1988) o RQD foi proposto em uma época onde a informação sobre a qualidade da rocha era obtida apenas por descrições geológicas dos maciços, ou através da porcentagem de recuperação de furos de sondagem.

Wickham *et al* (1972, apud Hoek 2000) desenvolveram um método quantitativo de descrever a qualidade de um maciço rochoso com base na classificação RSR (*Rock Structure Rating*), e introduzem o conceito de classificar os maciços a partir de notas atribuídas a cada uma de suas características, definindo um valor numérico total (RSR) para cada classe. Os parâmetros avaliados nesta classificação incluem a geologia do maciço (tipo de rocha, dureza e estruturas), a geometria das descontinuidades (espaçamento, orientação e relação com a direção da escavação) e o efeito da ação das águas subterrâneas.

Em 1973 Bieniawski desenvolve o Sistema RMR, enquanto Barton *et al* em 1974 desenvolvem Sistema Q. Ambos utilizam a idéia de classificação do maciço com atribuição de notas, e se baseiam na experiência obtida em casos históricos. São os sistemas de classificação geomecânica mais utilizados até hoje, e serão vistos em maior detalhe nos itens 2.4.2 e 2.4.3.

Segundo Guidicini *et al* (1972a) uma classificação geotécnica de meios rochosos depende do campo de aplicação da obra (superficial ou subterrânea), da etapa de projeto e o nível de detalhe do estudo, da disponibilidade de recursos, do grau de desenvolvimento do meio técnico em que a classificação é feita, e da natureza do meio rochoso em estudo e seu nível de complexidade.

Segundo Osgood *et al* (1975, apud Serra Junior e Ojima 1998) um sistema de classificação que adota critérios científicos deve fornecer dados verificáveis e reproduzíveis, compatíveis com dados produzidos por outro método, sensível às ordens de grandeza do fenômeno

estudado, podendo ser aplicado a todo tipo de combinações do fenômeno e fornecendo informações relevantes ao estudo.

Para Bieniawski (1976), as classificações de maciços rochosos são necessárias para avaliar as condições dos maciços para fins de engenharia, e se tornaram bem aceitas pela comunidade científica, pois permitem correlacionar as experiências de condições de maciços de um local com as encontradas em outro. Nenhum parâmetro isolado pode descrever completa e adequadamente um maciço rochoso para fins de engenharia. Vários fatores têm diferentes significados, e somente uma combinação de fatores pode descrever um maciço satisfatoriamente. Para selecionar os parâmetros geológicos é importante que eles sejam não só os mais significativos do ponto de vista da engenharia, mas também que possam ser medidos e verificadas no campo, a fim de evitar opiniões pessoais e observações qualitativas.

Os sistemas classificatórios se dividem em duas categorias, segundo Nieble e Francis (1976), uma que considera o meio rochoso independente da sua utilização, e outra que considera o tipo de obra em questão. Segundo Kirkaldie (1988), muitos dos problemas que surgiram no passado com os sistemas de classificação devem-se ao caráter genérico das classificações, com a rocha sendo classificada comumente por suas características mineralógicas e petrológicas, sendo que nessas classificações a rocha precisava ser reinterpretada para os diferentes usos na engenharia.

As classificações devem conter as seguintes características gerais segundo Pincus (1988): deve ser completa, isto é, todos os itens relevantes devem constar na classificação; as categorias devem ser mutuamente exclusivas, ou seja, cada item a ser classificado deve constar em apenas uma categoria; e o critério usado para a distinção das categorias deve ser aplicado em toda a classificação.

Segundo Monticeli (1983), a compartimentação geológico-geotécnica em projetos de fundação de barragens, tem por finalidade o levantamento das condições de fundação das obras, sendo que também são utilizados para estudos de áreas de empréstimo, estabilidade de taludes e aberturas de canais e túneis. As preocupações básicas são a determinação da capacidade de carga dos solos e das rochas, as suas características de resistência aos processos convencionais de escavação e os aspectos gerais da permeabilidade dos materiais, principalmente referentes à sua estanqueidade. A compartimentação de maciços rochosos pode ser feita através de unidades geológico-geotécnicas ou de classes de maciços, sendo para isso realizadas investigações de superfície, sub-superfície e ensaios de laboratório condizentes com as necessidades do projeto.

Segundo Ojima (1982) os sistemas classificadores utilizados em maciços rochosos podem ser reunidos em dois grupos: as classificações que visam propor uma linguagem comum entre os técnicos, interessando apenas a descrição das propriedades intrínsecas do meio rochoso; e as classificações que visam a previsão do comportamento do maciço frente a determinados tipos de solicitações e reações. Ojima (op.cit) considera que não tem sentido a procura por uma classificação universal, o que deve ter um caráter universal é a metodologia, permitindo elaborar uma classificação adequada para cada conjunto de situações.

As metodologias clássicas de classificação de maciços rochosos apresentam resultados interessantes para obras subterrâneas, mas nem sempre retratam convenientemente as necessidades de projeto, quando se trata de fundações (Monticeli, op.cit). O autor sugere a classificação utilizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, que considera os graus de alteração e de fraturamento como parâmetros para estabelecer as classes do maciço. Destaca ainda, para a classificação de fundações de barragens, as propostas de caracterização geotécnica de Guidicini *et al* (1972a) que leva em consideração a classificação genética da rocha, grau de alteração, resistência, coerência,

grau e tipo de fraturamento; de Lida *et al* (1970, apud Monticeli 1983), que consideram a coerência ou alteração da rocha, o grau de fraturamento e a condição das juntas; e Camargo *et al* (1978), que estabelecem compartimentos geomecânicos a partir de várias etapas de análise e de síntese de informações disponíveis.

A conceituação de termos como caracterização, classificação geológico-geotécnica, classificação geomecânica e compartimentação, são definidos por Monticeli (*op.cit*) como:

Caracterização de Maciço Rochoso: levantamento das características geológicas (litologia e estruturas), geotécnicas (recuperação, fraturamento, alteração, etc) e mecânicas (obtidos através de ensaios) do maciço rochoso.

Classificação Geológico-Geotécnica: elege características representativas do maciço (parâmetros de classificação) com os quais se estabelecem unidades, zonas ou compartimentos, que correspondem às classes formadas pelas variações dos parâmetros.

Classificação Geomecânica ou Modelo Geomecânico: estabelece parâmetros ou índices mecânicos às classes ou unidades de maciço, para utilização direta no projeto.

Compartimentação: estabelece unidades que sintetizam de maneira clara e relevante os condicionantes geológicos-geotécnicos importantes para a finalidade do estudo, que podem ser obtidos a partir da caracterização ou da classificação do maciço rochoso.

Nieble e Francis (1976) consideram como caracterização do maciço rochoso a coleta de todas as informações, sejam elas feições litológicas, estruturais, índices e propriedades físicas, enquanto que a classificação coleta apenas as informações definidas como critérios pelo sistema utilizado.

2.4.1. Rock Quality Designation – RQD

O RQD inicialmente introduzido por Deere *et al* (1967, apud Serra Junior e Ojima, 1998) como uma forma de classificação de maciços rochosos, acabou se tornando um dos parâmetros utilizados por outras classificações. É definido como a percentagem de pedaços de testemunho de rocha intactos, maiores ou iguais a 10 cm, pelo comprimento do avanço da perfuração, a manobra. Para isto, o testemunho deve ter tamanho mínimo NW (54,7mm) e ser perfurado com barrilete duplo-livres, para rochas duras a medianamente duras:

$$RQD = \sum \frac{p}{n} \times 100 \quad (7)$$

p = comprimento das peças maiores que 10 cm;

n = comprimento da manobra de avanço da perfuração.

No Brasil utiliza-se uma variação do RQD, o IQR (Índice de Qualidade da Rocha), que utiliza os comprimentos dos trechos com espaçamento homogêneo de descontinuidades, com comprimento mínimo de 0,5 metros, ao invés de considerar o comprimento total da manobra (Serra Junior e Ojima, 1998).

2.4.2. Classificação de Barton – Sistema Q

O sistema Q de classificação de maciço rochoso foi desenvolvido por Barton, Lien e Lunde em 1974, baseados na análise de 212 casos históricos de túneis, dos quais mais de 30 casos incluíam túneis permanentemente sem suportes. Este sistema avalia numericamente a qualidade do maciço rochoso usando os seguintes parâmetros: RQD; número de famílias de juntas; rugosidade das juntas; grau de alteração e preenchimento das juntas; fluxo interno d'água; e condições de tensões.

Estes parâmetros se relacionam através da equação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (8)$$

Onde:

RQD – *rock quality designation* (Tabela 9);

J_n – índice de influência do número de famílias de fraturas (Tabela 10);

J_r – índice de influência da rugosidade das paredes das fraturas (Tabela 11);

J_a – índice de influência da alteração das paredes das fraturas (Tabela 12);

J_w – índice de influência da ação da água subterrânea (Tabela 13);

SRF – índice de influência do estado de tensão do maciço (Tabela 14).

Na equação número 8, o primeiro termo expressa a relação de dimensão dos blocos, o segundo, a resistência ao cisalhamento ao longo das superfícies das descontinuidades, e o terceiro as tensões atuantes. O índice para os coeficientes de rugosidade (J_r) e de alteração (J_a) deve ser analisado para a família de descontinuidades que se apresente na condição mais desfavorável à estabilidade. A nota final obtida para o maciço pode variar entre 0,001 até 1000, abrangendo as diversas variações dos maciços rochosos. Com a nota final pode-se relacionar o maciço à uma das nove classes, conforme a tabela 15.

O objetivo do sistema Q é determinar o tipo de suporte necessário para um túnel, a partir da relação entre a classificação do maciço, a dimensão do vão e a finalidade do túnel. Essa relação determina 38 categorias para as quais são propostos os tipos de suporte necessários.

Tabela 9 – Valores de RQD – Classificação geomecânica de BARTON *et al*, (1974).

Padrão Geomecânico do Maciço (%)		RQD
A	Muito ruim	0-25 *
B	Ruim	25-50
C	Regular	50-70
D	Bom	75-90
E	Excelente	90-100

* Para RQD < 10, adotar um valor nominal igual a 10.

Tabela 10 – Valores de Jn – Classificação geomecânica de BARTON *et al*, (1974).

Condições de Compartimentação do Maciço		Jn
A	Fraturas esparsas ou ausentes	0,5-1,0
B	Uma família de fraturas	2
C	B + fraturas esparsas	3
D	Duas famílias de fraturas	4
E	D + fraturas esparsas	6
F	Três famílias de fraturas	9
G	F + fraturas esparsas	12
H	Muito fraturado, 4 ou + fraturas	15
I	Rocha completamente fragmentada	20

Obs.: Para intersecções, usar 3 Jn e, para emboques, 2 Jn

Tabela 11 – Valores de Jr – Classificação geomecânica de BARTON *et al*, (1974).

Condições de Rugosidade das Paredes		Jr
Contato rocha-rocha, sem deslocamento relativo entre as paredes (deslocamento diferencial < 10cm)		
A	Fraturas não persistentes	4
B	Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
C	Fraturas lisas, onduladas	2
D	Fraturas polidas, onduladas	1,5
E	Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
F	Fraturas lisas, planas	1,0
G	Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5
Fraturas sem contato rocha-rocha e com deslocamento relativo entre as paredes		
H	Fraturas preenchidas com material argiloso	1,0
I	Fraturas preenchidas com material granular	1,0

Tabela 12 – Valores de Ja – Classificação geomecânica de BARTON et al, (1974).

Condições de Alteração das Paredes		Ja	Ør *
Fraturas com contato rocha-rocha e sem deslocamento relativo entre as paredes			
A	Paredes duras, compactas, preenchimento de materiais impermeáveis	0,75	-
B	Paredes sem alteração, pigmentação superficial incipiente	1,0	25-35°
C	Paredes levemente alteradas	2,0	25-30°
D	Paredes com películas de material silto-arenoso com fração argilosa	3,0	20-25°
E	Paredes com películas de material mole, eventualmente minerais expansivos	4,0	8-16°
Fraturas com contato rocha-rocha e deslocamento relativo incipiente entre as paredes (< 10 cm)			
F	Paredes com partículas arenosas, fragmentas de rocha, etc.	4,0	25-30°
G	Paredes com preenchimentos contínuas e pouco espessos (< 5 mm) de material argiloso forte mente sobre adensado	6,0	16-24°
H	Paredes com preenchimentos contínuas e pouco espessos (< 5 mm) de material argiloso pouco/medianamente sobre adensado	8,0	12-16°
J	Paredes com preenchimento de materiais argilosos expansivos	8-12	6-12°
Fraturas sem contato rocha-rocha e com deslocamento relativo entre as paredes			
K	Zonas de preenchimento com fragmentas de rocha e material argiloso (ver G, H e J para caracterizar as argilas)	6, 8 8-12	6-12°
L	Zonas de preenchimento com material areno ou silto-argiloso	5,0	-
M	Zonas de preenchimento com material argiloso (ver G, H e J para caracterizar as argilas)	10, 13 13-20	6-24°

* Ângulo de atrito residual (indicativo das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração)

Tabela 13 – Valores de Jw – Classificação geomecânica de BARTON et al, (1974).

Condições de Afluência da Água		Jw	μ* (Kgf/cm ²)
A	Escavação a seco ou com pequena afluência de água < 5 l/min	1,0	< 1,0
B	Afluência média de água com eventual carreamento do preenchimento	0,66	1,0-2,5
C	Afluência elevada de água em rochas competentes de fraturas não reenchidas	0,5	2,5-10,0
D	Afluência elevada de água com carreamento do preenchimento	0,33	2,5-10,0
E	Afluência excepcionalmente elevada de água, decaindo com o tempo	0,1-0,2	> 10
F	Afluência excepcionalmente elevada de água, sem decaimento com o tempo	0,05-0,1	> 10

*Valores aproximados das pressões de água intersticial.

Tabela 14 – Valores de SRF – Classificação geomecânica de BARTON et al, (1974).

Condições das Tensões do Maciço				SRF
Zonas de baixa resistência, interceptando a escavação.				
A	Ocorrências múltiplas contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (qualquer profundidade)			10,0
B	Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação < 50 m)			5,0
C	Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação > 50 m)			2,5
D	Ocorrências múltiplas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de argila e com blocos desagregados de rocha (qualquer profundidade)			7,5
E	Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (prof. da escavação < 50 m)			5,0
F	Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (prof. da escavação > 50 m)			2,5
G	Ocorrência de juntas abertas e intenso fraturamento do maciço (qualquer profundidade)			5,0
Obs.: No caso da ocorrência de zonas de baixa resistência relevantes, que não interceptem a escavação, recomenda-se a redução dos valores de SRF de 25% a 50%.				
Rochas competentes (comportamento rígido às deformações) - σ_1, σ_3 - tensões principais σ_c - resistência à compressão simples - σ_t - resistência à tração (carga puntiforme)				
		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	SRF
H	Tensões baixas, sub-superficiais	>200	>13	>2,5
J	Tensões moderadas	10-200	0,66-13	1,0
K	Tensões elevadas	5-10	0,33-0,66	0,5-2,0
L	Condições moderadas de rocha explosiva (rock burst)	2,5-5,0	0,16-0,33	5-10
M	Condições intensas de rocha explosiva (rock burst)	<2,5	<0,16	10-20
Obs.:				
1) No caso de tensões sub-superficiais (H), adotar SRF=5				
2) Para maciços muito anisotrópicos, introduzir correções de σ_c e σ_t de acordo com os critérios:				
a) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$: reduzir σ_c para 0,8 σ_c e σ_t para 0,8 σ_t .				
b) $\sigma_1/\sigma_3 > 10$: reduzir σ_c para 0,6 σ_c e σ_t para 0,6 σ_t				
Rochas incompetentes (comportamento plástico)				
N	Tensões moderadas			5,0-10,0
O	Tensões elevadas			10,0-20,0
Rochas expansivas (dependendo da presença de água)				
P	Tensões moderadas			5,0-10,0
R	Tensões elevadas			10,0-20,0

Tabela 15 – Classes de maciços rochosos – Sistema Q (BARTON *et al*, 1974).

Padrão Geomecânico do Maciço	Valores de Q
Péssimo (excepcionalmente ruim)	<0,01
Extremamente ruim	0,01 -0,1
Muito ruim	0,1 -1,0
Ruim	1,0 -4,0
Regular	4,0 -10,0
Bom	10,0 -40,0
Muito bom	40,0 -100,0
Ótimo (extremamente bom)	100,0 -400,0
Excelente (excepcionalmente bom)	>400,0

2.4.3. Classificação de Bieniawski – Sistema RMR

Desenvolvido por Bieniawski em 1973, o sistema RMR (Rock Mass Rating), também conhecido como classificação geomecânica, foi sendo modificado com a inclusão de novos parâmetros, sendo hoje utilizada a classificação publicada em 1989. É baseada em seis parâmetros: resistência da rocha intacta; RQD; espaçamento de fraturas; condição das fraturas; água subterrânea; e orientação das descontinuidades.

Para aplicar a classificação geomecânica o maciço rochoso é dividido primeiramente em regiões estruturais, onde as características sejam mais ou menos uniformes, e a classificação é aplicada para cada região considerando as características médias de cada uma (Bieniawski, 1979). Para cada um dos parâmetros é atribuído um peso relativo, de acordo com a Tabela 16. O sexto parâmetro é um valor de ajuste que avalia a relação da orientação das descontinuidades com o tipo de obra, podendo ser mais ou menos favorável. A Tabela 17 exemplifica o efeito das orientações das descontinuidades em relação ao eixo e sentidos de escavação em túneis, enquanto a Tabela 18 (Bieniawski e Orr, 1976) auxilia na estimativa da favorabilidade da orientação das descontinuidades em relação à estabilidade de fundações de barragens. A Tabela 19 detalha os critérios para descrição das condições das descontinuidades. A nota final do maciço é dada pela somatória dos pesos dos

parâmetros considerados, definindo as classes de maciços (Tabela 20). O sistema RMR associa ao final, para cada uma das cinco classes de maciço rochoso, uma estimativa do tempo médio de auto sustentação e vão livre da seção para o caso de túneis, e os valores de coesão (KPa) e de ângulo de atrito (Tabela 21).

Tabela 16 – Classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

PARÂMETROS		FAIXA DE VALORES							
1	Resistência da rocha intacta	Índice puntiforme	> 10	4 a 10	2 a 4	1 a 2	Utilizar compressão simples		
		Compressão simples (MPa)	> 250	100 a 250	50 a 100	25 a 50	5 a 25	1 a 5	< 1
	Peso relativo	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90 a 100	75 a 90	50 a 75	25 a 50	< 25			
	Peso relativo	20	17	13	8	5			
3	Espaçamento das fraturas	> 2m	0,6 a 2m	200 a 600 mm	60 a 200 mm	< 60 mm			
	Peso relativo	20	15	10	8	5			
4	Condição das fraturas	Superfícies muito rugosas; não contínuas; fechadas; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura <1mm; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura <1mm; paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5mm ou abertura 1-5 mm; contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura >5 mm; contínuas			
	Peso relativo	30	25	20	10	0			
5	Água subterrânea	Infiltração em 10m de túnel	Nenhuma (ou)	< 10 l/min (ou)	< 25 l/min (ou)	25 a 125 l/min (ou)	> 125 l/min (ou)		
		Relação (pressão de água / tensão)	0 (ou)	< 0,1 (ou)	0,1 a 0,2 (ou)	0,2 a 0,5 (ou)	> 0,5 (ou)		
		Condições gerais	Seco	Umedecido	Úmido	Gotejando	Com fluxo		
	Peso relativo	15	10	7	4	0			
6	Direção e mergulho		Muito favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável	Muito desfavorável		
	Peso relativo	Túneis	0	-2	-5	-10	-12		
		Fundações	0	-2	-7	-15	-50		
		Taludes	0	-2	-25	-50	-60		

Tabela 17 – Efeito da direção geológica e do mergulho na construção de túneis

Direção perpendicular ao eixo do túnel		Direção paralela ao eixo do túnel	
Escavação no sentido do mergulho (Mergulho 45 a 90°)	Escavação no sentido do mergulho (Mergulho 20 a 45°)	Mergulho 45 a 90°	Mergulho 20 a 45°
Muito favorável	Favorável	Muito desfavorável	Moderado
Escavação contra o mergulho (Mergulho 45 a 90°)	Escavação contra o mergulho (Mergulho 20 a 45°)	Mergulho de 0 a 20° com direção qualquer	
Moderado	Desfavorável	Moderado	

Tabela 18 – Efeito da direção geológica em fundações de barragens (Bieniawski e Orr, 1976).

Mergulho entre 0° e 10°	Mergulho entre 10° e 30°		Mergulho entre 30° e 60°	Mergulho entre 60° e 90°
	Montante	Jusante		
Muito favorável	Desfavorável	Moderado	Favorável	Muito desfavorável

Tabela 19 – Orientação para a classificação das condições das discontinuidades.

Parâmetro	FAIXA DE VALORES				
Persistência da descontinuidade	< 1m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	> 20 m
Peso relativo	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 a 1 mm	1 a 5 mm	> 5 mm
Peso relativo	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Levemente rugosa	Lisa	Espelho de falha
Peso relativo	6	5	3	1	0
Preenchimento	Preenchimento duro			Preenchimento mole	
	Nenhum	< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm
Peso relativo	6	4	2	2	0
Alteração	Nenhuma	Leve	Moderada	Alta	Decomposta
Peso relativo	6	5	3	1	0

Tabela 20 – Classes do maciço determinada pela soma total dos pesos.

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

Tabela 21 – Significado das classes.

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

Segundo Bieniawski (1988), o RMR é um sistema de aplicação simples, e os parâmetros utilizados são facilmente obtidos em furos de sondagem ou em mapeamentos geológicos. O autor não recomenda utilizar a classificação caso não se disponha de todos os dados, e sugere aplicar no mínimo duas classificações no desenvolvimento de um projeto, com a finalidade de checar os resultados obtidos.

Kirsten (1988), em discussão sobre o sistema RMR afirma que o sistema não é suficientemente sensível com relação a parâmetros individuais, exemplificando com uma situação hipotética, um maciço classificado como Bom, com uma nota de 79 pontos, e simulando uma situação pior com o mesmo maciço, apenas alterando as condições das descontinuidades, onde ele obtém uma nota 62, e continua com a mesma classificação, Bom.

Sen e Sadagah (2003) propõem a determinação dos valores de RMR de maneira contínua para a variação dos parâmetros, sem a divisão em classes de valores. Para isso utilizam gráficos que relacionam os valores dos parâmetros com seus respectivos pesos relativos. A partir destes gráficos, os autores propõem uma série de equações com as quais podem ser obtidos os valores de pesos relativos. Da mesma forma, os autores propõem a determinação da estimativa do tempo médio de auto sustentação (t), do vão livre da seção (S), da coesão (C) e do ângulo de atrito (θ):

$$t = 1,19e^{0,178.RMR} \quad (9)$$

$$S = RMR/18 \quad (10)$$

$$C = 3,625.RMR \quad (11)$$

$$\theta = \begin{cases} 25[1 + 0,01RMR] & \text{para } RMR \geq 20 \\ 1,5RMR & \text{para } RMR \leq 20 \end{cases} \quad (12)$$

Para o estudo de fundações a determinação do módulo de deformabilidade (E_M) é de grande importância, e pode ser estimado através de correlações com o valor de RMR do maciço. A equação 12 é dada para valores de RMR maiores que 50 (Bieniawski, 1989), e a equação 13 (Serafim e Pereira, 1983) é dada para valores de RMR menores que 50, sendo E_M dado em GPa.

$$E_M = 2 \cdot RMR - 100 \quad (13)$$

$$E_M = 10^{(RMR-10)/40} \quad (14)$$

2.4.4. Classificações brasileiras utilizadas em barragens

2.4.4.1. Metodologia do IPT

A metodologia adotada pelo IPT, e que foi utilizada para os estudos da fundação da barragem de Ilha Solteira, é a que melhor se adaptou para as barragens no Brasil segundo Monticeli (1983). A classificação é estabelecida com base em estudos de testemunhos de sondagens ou sobre superfícies e paredes rochosas, e tem como finalidade estudar a estabilidade da fundação. Considera como parâmetros classificatórios o grau de alteração da rocha e o fraturamento, e através da conjunção destes dois parâmetros é obtida a classe do maciço rochoso. A realização de ensaios permite estabelecer parâmetros mecânicos quantitativos a cada uma das classes encontradas, como por exemplo, módulo de deformabilidade e parâmetros de cisalhamento.

2.4.4.2. Classificação geotécnica preliminar de Guidicini

Guidicini *et al* (1972a), utilizando testemunhos de sondagem, taludes rochosos, ou galerias subterrâneas, propõe um método de caracterização geotécnica preliminar de maciços rochosos. Para tal, são utilizados a classificação genética sumária da rocha, o grau de alteração, o grau de resistência, o grau de coerência, o grau de fraturamento e o tipo de fraturamento, com os quatro primeiros parâmetros definindo a classe da rocha, que combinada com os dois últimos (grau e tipo de fraturamento) definem a classe do maciço.

2.4.4.3. Modelo de compartimentação de Monticeli

Segundo Monticeli (1983) a caracterização e a compartimentação geológico-geotécnica resultam das investigações de campo e dos ensaios de laboratório, que para o estudo de barragens devem ser os seguintes:

Investigações de superfície – corresponde à primeira etapa dos estudos, e são apresentados na forma de mapeamento geológico e geomorfológico. São feitos em três etapas: trabalhos prévios de escritório (pesquisa bibliográfica, interpretação de fotos aéreas e imagens de satélite, elaboração de mapas fotointerpretados, e formulação de um plano de levantamento de campo); trabalhos de campo (descrição detalhada de afloramentos, reconhecimento de estruturas, contatos litológicos e feições geomorfológicas, e coleta de amostras); e elaboração do relatório (análise e interpretação dos dados, elaboração de mapas e texto explicativo).

Investigações de subsuperfície – correspondem às sondagens mecânicas (trado, percussão e rotativa), poços de investigação e ensaios geofísicos, que devem ser locados topograficamente.

Ensaio de laboratório – corresponde aos trabalhos de caracterização tecnológica e mecânica de amostras coletadas. Os resultados obtidos são analisados em conjunto com os demais trabalhos de investigação, e são correlacionados às unidades ou classes de maciço rochoso.

A caracterização geológico-geotécnica corresponde ao conjunto de informações obtidas através das investigações e dos ensaios tecnológicos e mecânicos. Monticeli (1983) sugere que as descrições geológicas sejam feitas separadas das descrições geotécnicas. As descrições geológicas devem conter o nome da rocha junto de uma breve descrição da litologia. As descrições geotécnicas são constituídas da recuperação por manobra, grau de alteração, grau de coerência, grau de fraturamento, índice de qualidade da rocha (IQR) ou RQD, índice de resistência a penetração, ensaio de lavagem por tempo, condutividade hidráulica, e condições das descontinuidades.

Os ensaios de laboratório são divididos pelo autor em ensaios principais (resistência a compressão uniaxial, módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson, velocidade sônica, ensaios de desagregabilidade, índices físicos, e ensaios em solo), que podem ser realizados em poucas amostras e a custos baixos, e ensaios acessórios (lâminas petrográficas, compressão diametral, cisalhamento direto, fluência, etc..) recomendados para obras de grande porte ou de complexidade geológica.

A caracterização do maciço rochoso reúne detalhadamente todo o conjunto de informações geológico-geotécnicas de interesse do projeto. A interpretação e a síntese desse conjunto de informações permite a elaboração da compartimentação do maciço rochoso que será utilizada no projeto. Segundo Monticeli (1983) a compartimentação pode ser feita através de classes ou de unidades geológico-geotécnicas. A compartimentação através de classes de maciço é bastante subjetiva, e reflete normalmente condições mais conservadoras e tentativas de universalização de classificações. Na compartimentação em unidades

geológico-geotécnicas estas dificuldades são superadas e o produto final retrata as necessidades do projeto.

2.4.5. Casos de aplicação de sistemas de classificação em barragens

São poucos os trabalhos publicados sobre a utilização de sistemas de classificação para estudos de barragens. No Brasil, o estudo de Dobereiner *et al* (1987) sobre a caracterização geomecânica do maciço rochoso de fundação da UHE Cachoeira Porteira, usa a classificação RMR em zonas pré-definidas com a finalidade de obter parâmetros geomecânicos, como coesão e módulo de deformabilidade, não sendo o sistema RMR a principal ferramenta na compartimentação do maciço. Da mesma forma, Carvalho *et al* (1987) sobre o estudo da compartimentação geomecânica da fundação da UHE de Babaquara, no Rio Xingu, o uso da classificação RMR tem apenas a finalidade de obter parâmetros de resistência para o maciço.

Figueiredo (1996) utilizou as classificações de Barton e Bieniawski, em galerias, para a caracterização geomecânica do maciço de fundação da UHE Tijuco Alto, na região do Vale da Ribeira entre os estados de São Paulo e Paraná. Para o autor os resultados obtidos foram compatíveis na caracterização do maciço. Além disso, comparando os módulos de deformação obtidos através de equações empíricas com os obtidos em ensaios in situ, a classificação de Barton, avaliou mais realisticamente o maciço estudado, principalmente devido a este sistema ser mais sensível no tocante às condições das descontinuidades.

Malafaia (2007) utilizou o sistema RMR e o SMR, *Slope Mass Rating* (Romana, 1993, apud Malafaia, op.cit), em um estudo comparativo para o maciço rochoso da UHE Batalha, constituído principalmente por filitos. Para o estudo, a classificação foi aplicada diretamente nos testemunhos de sondagem, nos quais foram determinados previamente trechos com características uniformes para o cálculo da nota do maciço.

Mesquita (2008), no estudo realizado na AHE de Jirau, no Rio Madeira, realizou o estudo da compartimentação do maciço de fundação utilizando seis métodos de classificação, e considerou que o RMR é o que melhor se aplicava ao estudo devido os valores obtidos serem compatíveis com o esperado, e pela sua forma simples de aplicação.

Há uma grande quantidade de estudos recentes sobre a caracterização de maciços rochosos para barragens, utilizando o sistema RMR, no Oriente Médio, como a barragem de Wadi Mujib, na Jordania (El-Naqa, 1994), a barragem de Tabarak Abad no Iran (Lashkaripour e Ghafoori, 2002), e as barragens de Urus (Özsan e Akin, 2002) e Obruk (Kocbay e Kilic, 2006) na Turquia. Nestes estudos, a classificação geomecânica é utilizada geralmente em conjunto com outros métodos, como o sistema Q ou o RQD, com o objetivo de estimar parâmetros geomecânicos do maciço. A classificação é aplicada no maciço rochoso como um todo, ou quando há mais de uma litologia, para cada tipo litológico, considerando-se sempre a pior condição do maciço.

3. MÉTODO

O desenvolvimento deste estudo pode ser dividido em quatro etapas: planejamento, coleta de dados, aplicação e análise dos resultados, sendo que o seqüenciamento de cada etapa é ilustrado no fluxograma da Figura 4.

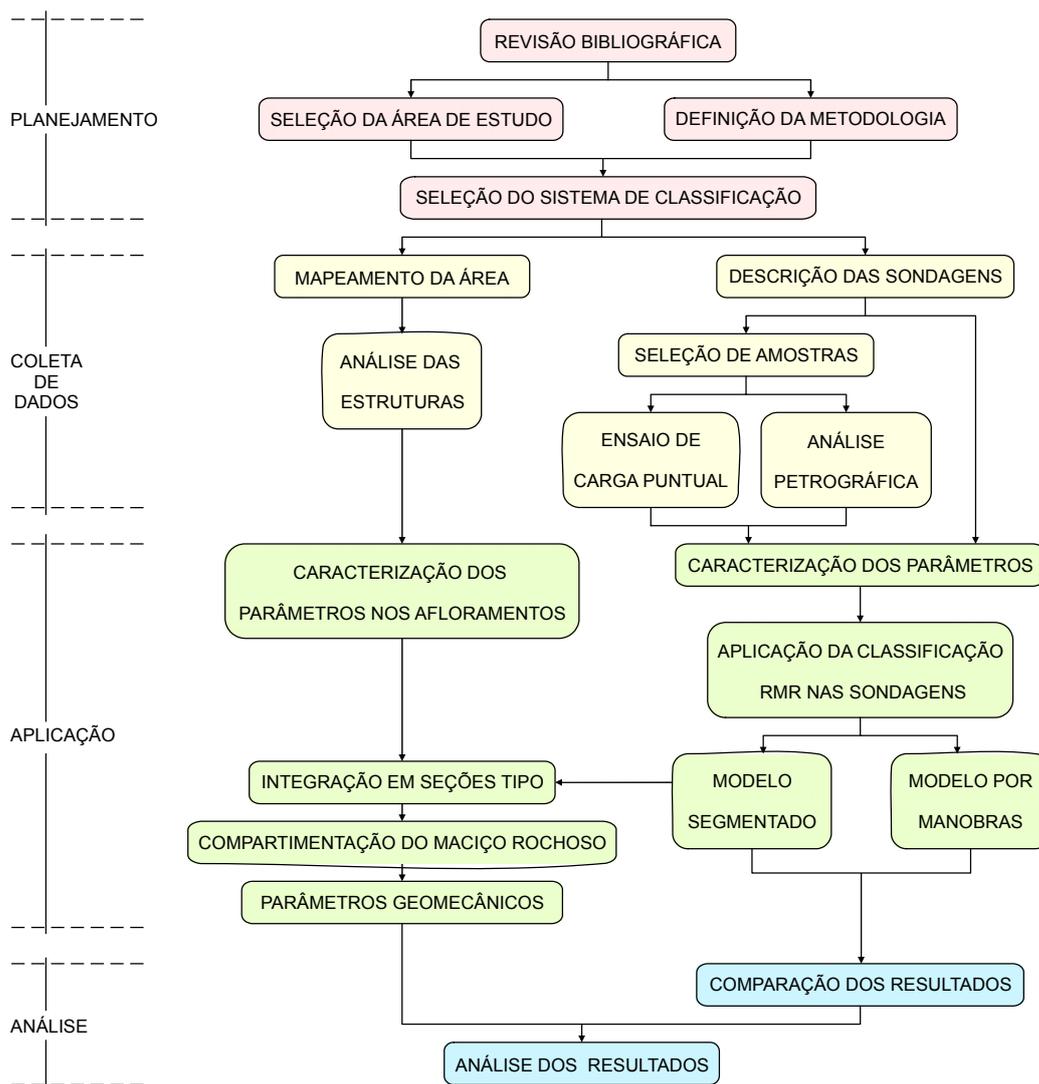


Figura 4 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.

3.1. Planejamento

Este estudo iniciou-se com uma revisão da bibliografia existente sobre as PCH's, sobre as metodologias de classificação de maciços rochosos, e sobre a aplicação de sistemas de classificação em barragens. A seleção da área para o estudo foi baseada em critérios como: a existência de sondagens rotativas, a possibilidade de acesso aos testemunhos de sondagem, e o consentimento de uso dessas informações.

3.1.1. Definição da metodologia e seleção do sistema de classificação

A definição da metodologia para a compartimentação do maciço rochoso foi baseada nas informações obtidas na bibliografia estudada e no tipo de dados que estariam disponíveis na área de estudo, que são: superficiais – obtidos pelo mapeamento da área; sub-superficiais – obtidos das sondagens rotativas; e dados de ensaios – possibilidade de realização de ensaios de baixo custo. Optou-se pela escolha de um sistema de classificação que permitisse a aplicação direta nas sondagens, de forma linear, onde as classes determinadas pelo sistema definiriam os compartimentos, e a compartimentação final pudesse ser representada de forma bi-dimensional em seções, obtidas pela interpolação da classificação feita nas sondagens, com o apoio das informações do mapeamento de campo.

Das metodologias de classificação estudadas, as que melhor se adequaram aos objetivos propostos foram os sistemas RMR e Q. O sistema RMR apresentou vantagens em relação ao sistema Q por poder ser aplicado aos diversos tipos de estruturas existentes na PCH, enquanto o sistema Q é mais voltado para túneis. Outros fatores que favorecem o sistema RMR são a grande disseminação desta classificação nas obras civis, sendo frequentemente utilizado por outros autores, a maior facilidade de aplicação do sistema, além de fornecer estimativas de parâmetros geomecânicos para o maciço.

3.2. Coleta de dados

3.2.1. Mapeamento da área

Um estudo preliminar da área foi feito com o apoio de fotos aéreas na escala 1:60.000, de 1964. Pela análise estereoscópica das fotos aéreas foram reconhecidas as principais feições estruturais, como lineamentos e quebras de relevo. O mapeamento de campo foi feito sobre a planta base da área, que apresenta um levantamento topográfico detalhado da área das estruturas. O estudo procurou mapear os afloramentos rochosos na área das estruturas, descrevendo a litologia, grau de alteração e famílias de fraturas. As fraturas foram descritas quanto a sua orientação, espaçamento, abertura, preenchimento e persistência. As direções das fraturas foram representadas em diagrama de rosetas, com o auxílio do programa EstereoNett, e plotadas no mapa base da área.

3.2.2. Descrição das sondagens

Foi feita a descrição dos testemunhos de sondagem em boletins, informando o tipo litológico, a presença de estruturas e a recuperação por manobra. A caracterização do grau de alteração foi baseada na proposta do IPT, conforme a Tabela 2 (página 6). Os segmentos de rocha foram medidos para os cálculos de RQD e IQR. Foram identificadas as fraturas causadas pelo processo de perfuração. As fraturas foram descritas quanto ao mergulho (horizontal, vertical ou inclinada) e plotadas nos boletins de sondagem com seu espaçamento real. O espaçamento das fraturas foi calculado como o espaçamento médio das fraturas em zonas de fraturamento homogêneos. As fraturas também foram descritas quanto a alteração, preenchimento e rugosidade, conforme a proposta de Bieniawski (1989) apresentada na Tabela 19 (página 30), sendo todas essas informações indicadas no boletim de sondagem.

3.2.2.1. Análise petrográfica

Foi feita a seleção de uma amostra representativa do maciço para análise petrológica através de lâmina delgada, no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas – Lamir – do Departamento de Geologia da UFPR.

3.2.2.2. Ensaio de carga puntual

Foram selecionadas amostras representativas dos diferentes graus de alteração, para determinação da resistência da rocha através do ensaio de compressão puntual, que foi escolhido por ser um ensaio simples e de baixo custo. Com base nas recomendações da ISRM (1985) se optou pelo ensaio diametral, por ser o que envolve cálculos mais simples para o formato das amostras. O número de amostras selecionadas respeitou o número mínimo de 10, sugerido pela ISRM. A seleção das amostras procurou ter uma distribuição homogênea ao longo das sondagens. O ensaio foi realizado no equipamento de compressão puntual do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (Figura 5), de acordo com as especificações sugeridas pela ISRM (1985).

Durante o ensaio foram medidos o diâmetro e o comprimento das amostras (Figura 6), e a pressão registrada no manômetro (p), em Kgf/cm^2 , no momento da ruptura da amostra. Para determinar resistência, a pressão lida no manômetro foi transformada em força através da equação 15, obtida pela calibração do equipamento, sendo Q a carga puntual em KN, e p a pressão lida no manômetro em Kgf/cm^2 .

$$Q = [(0,328 \times p) - 0,2158] \quad (15)$$

Para calcular o índice de carga puntual (I_s) é utilizada a equação 1 (página 11), que relaciona a carga aplicada (Q), e o diâmetro equivalente (D_e). O valor obtido deve ser multiplicado por 1000 para se obter o I_s em MPa. Para o ensaio diametral o diâmetro

equivalente D_e é igual ao diâmetro da amostra (equação 2). A correção do índice de carga puntual (I_s) para o diâmetro de 50 mm ($I_{s(50)}$) é feito através do cálculo do fator de correção F , da equação 6, sendo o $I_{s(50)}$ calculado pela equação 5.

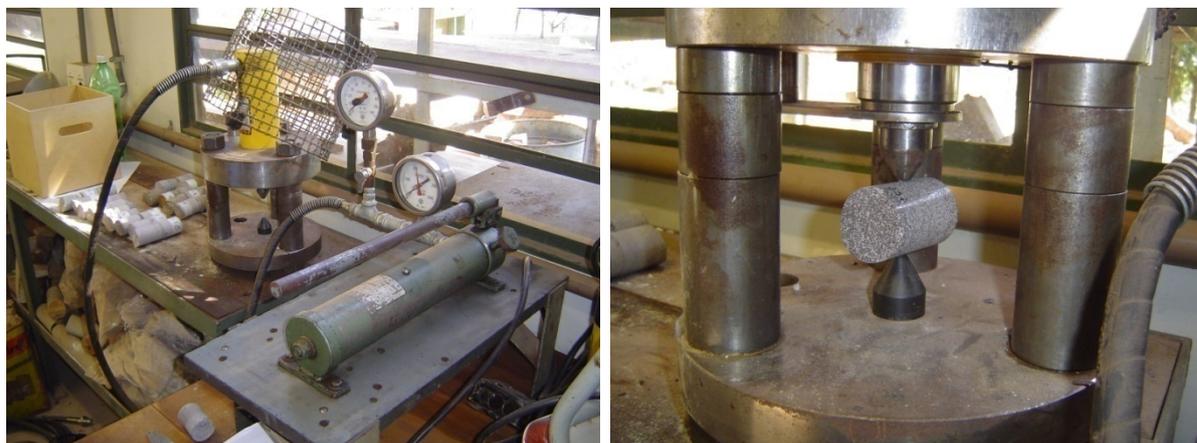


Figura 5 – Equipamento de compressão puntual, e posicionamento da amostra para o ensaio.

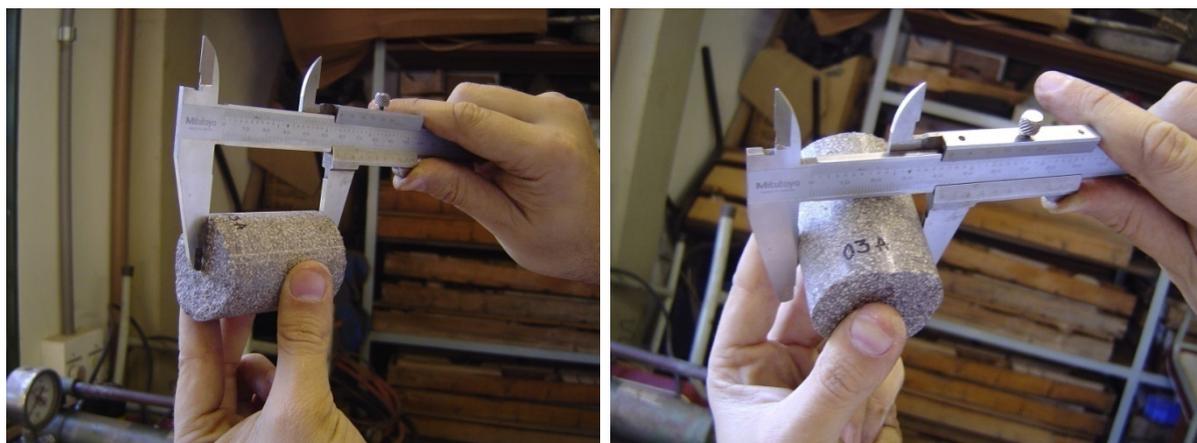


Figura 6 – Aferição das dimensões da amostra, largura e diâmetro.

3.3. Aplicação

O sistema RMR foi o sistema de classificação escolhido para a realização do estudo. Como o maciço rochoso da área em estudo se apresenta muito uniforme, optou-se por aplicar o sistema RMR de forma direta nos testemunhos de sondagem, e de forma parcial nos afloramentos, sem a pré-divisão de regiões estruturais para aplicação da classificação.

Algumas modificações foram feitas ao sistema classificação, com a intenção de deixá-lo mais sensível às variações dos parâmetros considerados. A primeira delas consiste em aplicar a classificação diretamente no boletim de descrição da sondagem, o qual foi modificado para incluir campos para a descrição dos parâmetros, e para a representação final da classificação. A segunda modificação foi não pré-compartimentar a sondagem em zonas homogêneas para aplicar a classificação, e deixar que a variação dos parâmetros determine a segmentação da sondagem. No final os segmentos com mesma classificação são agrupados, definindo um compartimento. A terceira modificação proposta foi vincular a resistência da rocha intacta ao grau de alteração, permitindo que ao longo da sondagem sejam identificadas as variações de resistência pela determinação do grau de alteração. A quarta modificação foi substituir o RQD pelo IQR.

3.3.1. Caracterização dos parâmetros nas sondagens

Para a aplicação do sistema RMR nas sondagens, cada um dos seis parâmetros considerados foram caracterizados e representados ao longo das sondagens nos boletins de descrição.

- O valor da resistência da rocha foi determinado para os diferentes graus de alteração da rocha, e foi obtido através dos ensaios de carga puntual.
- O valor do IQR foi obtido pela soma dos pedaços de testemunho maiores que 10 cm, divididos pelo comprimento total do trecho considerado, em percentagem. O diâmetro das sondagens é o BW, menor que o recomendado para o cálculo do RQD, o NW.
- O espaçamento das discontinuidades foi determinado através do cálculo do espaçamento médio das fraturas em zonas de espaçamento homogêneo.
- A condição das fraturas, que pode ser subdividida em persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e alteração, foi caracterizada com base na descrição detalhada dos testemunhos, e determinou zonas de mesmas características ao longo das sondagens.

- A ação da água subterrânea foi determinada através da relação entre a pressão de água e a tensão principal, ao longo da sondagem. Para os cálculos foram convencionados os seguintes valores de massa específica: água = 1g/cm^3 ; solo = $1,8\text{g/cm}^3$; rocha = $2,7\text{g/cm}^3$.
- O ajuste para orientação de descontinuidades foi determinado segundo a análise da influência das descontinuidades na estrutura encontrada na área de cada sondagem.

Determinados todos os parâmetros e os seus respectivos pesos relativos, foi feito o somatório final dos pesos de cada parâmetro, obtendo-se assim a nota final, para cada segmento, que foi representada no boletim de sondagem.

Para verificar se as modificações propostas melhoram o resultado final da compartimentação, a classificação também foi aplicada da forma convencional, denominada de 'classificação por manobras', permitindo a comparação entre os dois resultados.

3.3.2. Classificação dos afloramentos

A aplicação do sistema RMR nos afloramentos de campo foi parcial, e se ateve à atribuição de pesos relativos aos parâmetros descritos em campo, sendo eles: espaçamento, persistência, abertura, preenchimento e orientação das descontinuidades.

3.3.3. Integração em seções tipo

Foram elaboradas duas seções tipo ao longo dos eixos das principais estruturas previstas no projeto, buscando-se integrar e espacializar os resultados obtidos na aplicação do sistema RMR nos furos de sondagem e nos levantamentos de campo. Nestas seções foram lançados os resultados da aplicação do sistema RMR nas sondagens rotativas, e os pontos de campo. As sondagens e os pontos de campo foram relacionados de acordo com a proximidade entre si. Os pesos relativos dos parâmetros classificados nas sondagens foram

confrontados com os pesos atribuídos para os parâmetros classificados nos afloramentos, sendo considerado o peso de valor mais baixo para o cálculo da nota final.

Relacionadas as informações das sondagens e dos afloramentos, e determinadas a variações das classes no interior do maciço rochoso, foi possível esboçar a compartimentação do maciço. O traçado dos compartimentos buscou a interpolação da classificação obtida nas sondagens, e utilizou as informações resultantes do cruzamento da classificação das sondagens com os pontos de campo para auxiliar na determinação da continuidade, ou não, dos compartimentos no interior do maciço.

3.3.4. Estimativa de parâmetros geomecânicos

Para cada classe de maciço, a classificação RMR atribui uma estimativa de tempo médio de auto-sustentação e vão livre de seção para túneis, além de valores de coesão e ângulo de atrito (ver Tabela 21, página 30). As equações 9 a 12 (página 31) permitem que se calculem estes parâmetros através da nota RMR encontrada, enquanto as equações 13 e 14 (página 32) permitem que se calcule o módulo de deformabilidade. Com base nestas equações foram calculados os parâmetros geomecânicos para os compartimentos encontrados nas seções.

3.4. Análise

A análise dos resultados avaliou os ganhos obtidos com as modificações propostas, comparando as duas formas de classificação das sondagens, e a metodologia utilizada para se obter a compartimentação do maciço.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. Localização

A PCH Morro Grande foi o local escolhido para a aplicação do estudo, e fica localizado na porção nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 7), no município de Muitos Capões, a sudeste da localidade de Ituim, entre as coordenadas 6839500/6841000N e 469250/470250E do sistema de projeção UTM, datum SAD-69. Localiza-se no Rio Ituim, afluente da margem esquerda do Rio Turvo, que por sua vez é afluente da margem direita do Rio das Antas, pertencente ao sistema de drenagem do Rio Jacuí, que drena suas águas para a Lagoa dos Patos.

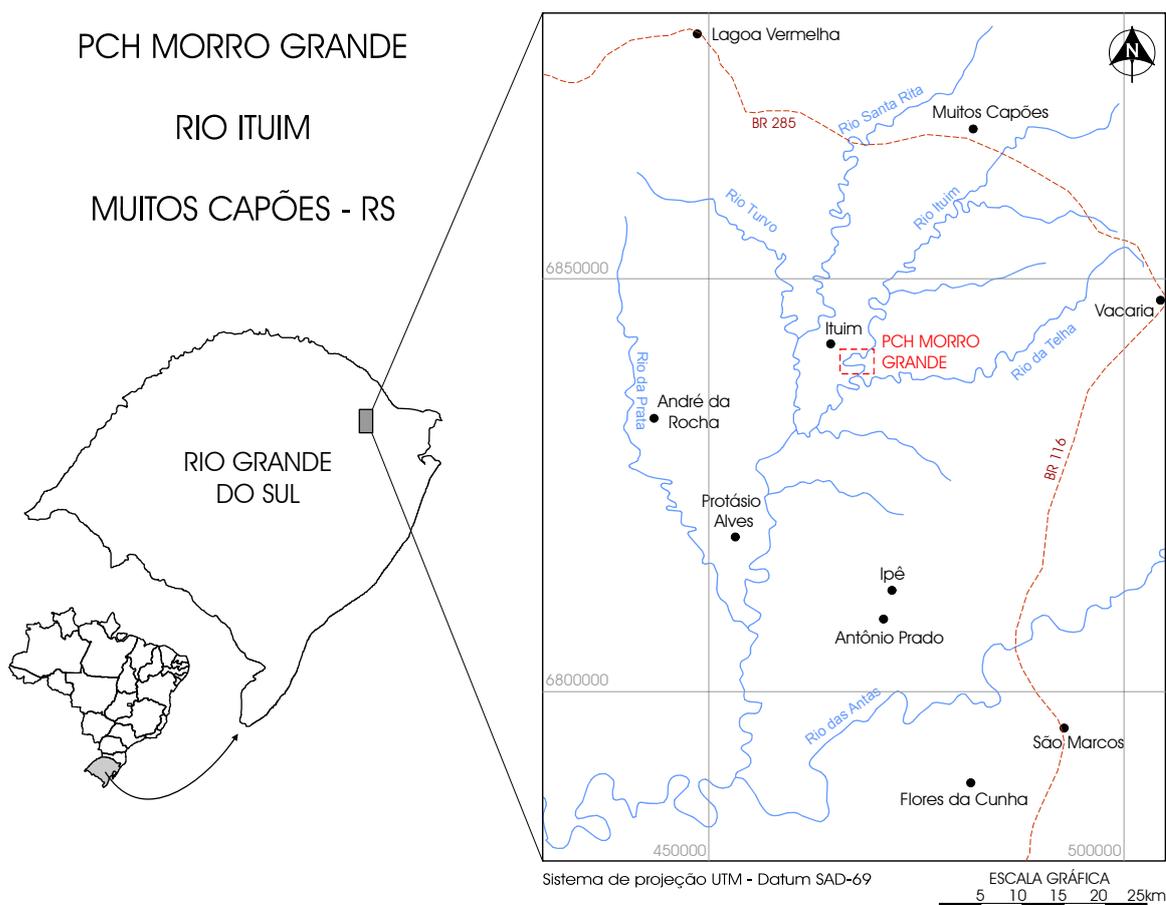


Figura 7 – Figura esquemática com a localização da área de estudo.

Na área estão disponíveis os dados de quatro sondagens rotativas, a planta da PCH com a localização das sondagens e demais estruturas, fotografias aéreas de escala 1:60.000, e os detalhes construtivos da obra, que foram gentilmente fornecidos pela Design Head Engenharia e Construtora e pela Hidrelétrica Morro Grande Ltda.

4.2. Caracterização da PCH

A Figura 8 mostra a área de estudo com a localização das estruturas da PCH Morro Grande, dos pontos das sondagens rotativas, e dos pontos de levantamento de campo.

O arranjo da PCH Morro Grande prevê um barramento misto, composto por um vertedor central em concreto na cota 640m com comprimento total de 150 metros e altura máxima de 6 metros, apoiado em contrafortes, e um dique de enrocamento com núcleo de argila sobre a ombreira esquerda, com topo na cota 644m, com extensão total de 107 metros, e altura máxima de 10 metros. O bloco de desvio será incorporado ao eixo da barragem, posicionado na margem esquerda justaposto ao muro de contenção do dique. No local existe uma sondagem – SR1, na margem esquerda, com 12 metros de profundidade.

O circuito hidráulico se inicia em uma tomada d'água incorporada ao dique da barragem. O canal de adução foi projetado encaixado na rocha. Sua seção é retangular com 6 metros de base por 3 metros de altura, com extensão total de 410 metros.

O túnel de adução será escavado em rocha, sem revestimento, em seção arco-retângulo com diâmetro 4,5 metros e uma extensão hidráulica total de 660 metros. O túnel trabalha afogado à baixa pressão e foi projetado para uma velocidade máxima de 1,05m/s. No local existem duas sondagens, uma no emboque – SR2, com 40 metros de comprimento, e outra no desemboque – SR3, com 23 metros de comprimento.

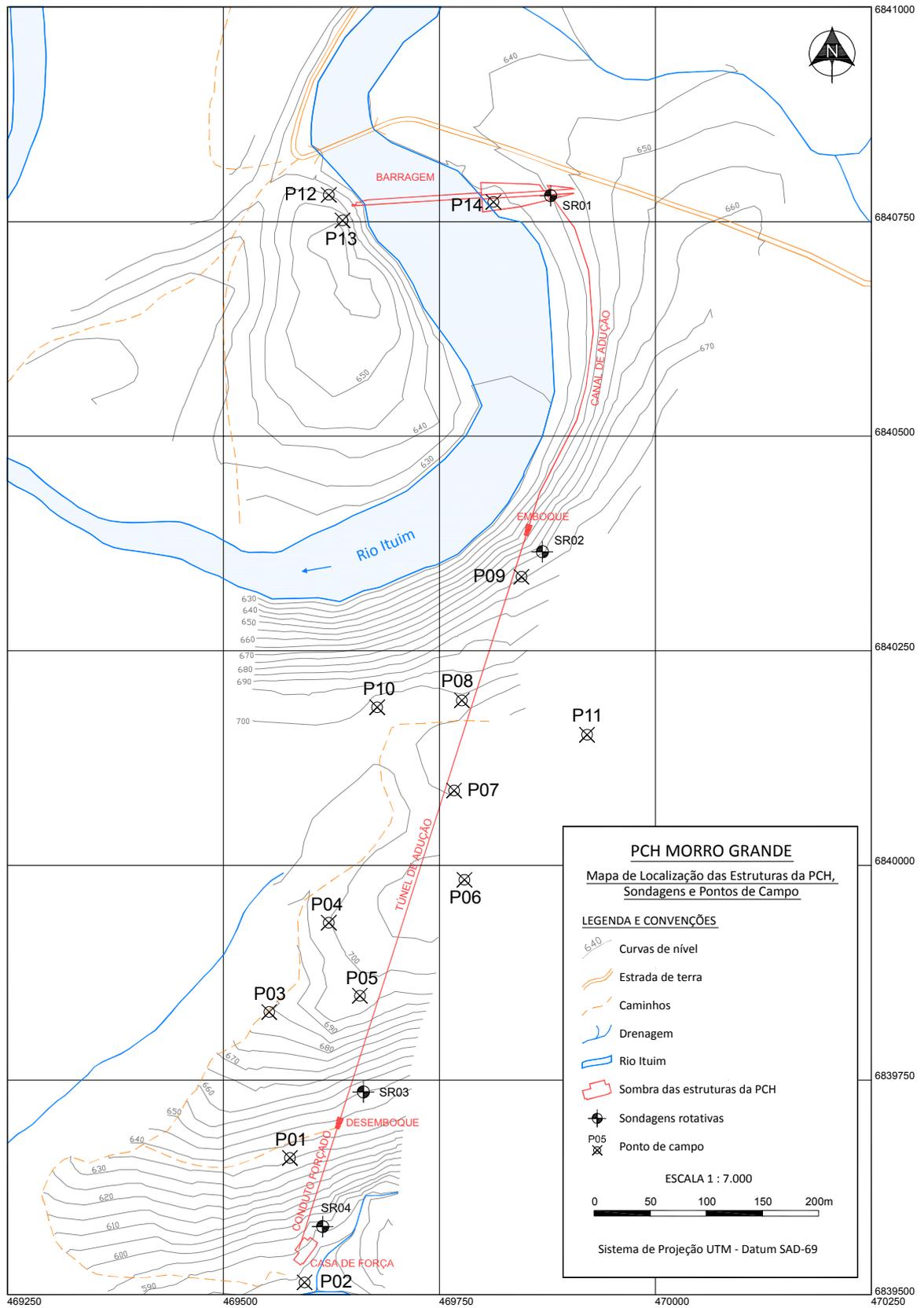


Figura 8 – Layout das estruturas da PCH Morro Grande.

Após o desemboque o fluxo segue por um canal de 52 metros de extensão escavado em rocha até a estrutura da câmara de carga. Este canal tem uma seção retangular com 6 metros de base por 5 metros de profundidade. Da câmara de carga segue em uma linha de conduto forçado com comprimento total de 146 metros, que se bifurca ao final para atender as duas unidades geradoras.

Após a passagem pela casa de máquinas a água é restituída ao rio através de um canal de fuga longo, que se desenvolve parcialmente dentro da própria calha do rio. No local da casa de força há outra sondagem – SR4, com 23 metros de comprimento.

4.3. Geologia regional da área

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, mais precisamente sobre os extensos derrames basálticos da Formação Serra Geral, na região serrana do Rio Grande do Sul.

4.3.1. Bacia do Paraná

A bacia intracratônica do Paraná ocupa uma área de aproximadamente 1.500.000 km² no Brasil, e ocupa ainda parte da Argentina, Paraguai e Uruguai. A sua dimensão norte-sul atinge quase 2000 km no território nacional, apresentado uma orientação NNW no seu eixo principal. Abrange parte dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Possui inclinação homoclinal em direção ao oeste, porção mais deprimida (Schobbenhaus *et al.* 1984, Milani *et al.* 1994).

É uma bacia sedimentar intracratônica, ou sinéclise, que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana. Sua formação teve início a cerca de 450 milhões de anos, no final do Período Ordoviciano, e termina no Cretáceo. A estratigrafia mais utilizada atualmente para a Bacia do Paraná é a proposta na revisão de Milani *et al.* (1994) com base no trabalho clássico de Schneider *et al.* (1974). Milani *et al.* (1994, 1998) dividiram o registro estratigráfico da Bacia do Paraná em seis superseqüências limitadas por discordâncias regionais, sendo elas: a Superseqüência Rio Ivaí de idade Ordovício-Siluriana; a Superseqüência Paraná correspondente às Formações de idade Devoniana; a Superseqüência Gondwana I, do Neo-Carbonífero ao Eo-Triássico; a Superseqüência Gondwana II correspondente às Formações Pirambóia e Rosário do Sul; a Superseqüência Gondwana III que corresponde ao Grupo São Bento, e por fim a Superseqüência Bauru do Neo-Cretáceo, onde novas condições de sedimentação continental foram instaladas na Bacia do Paraná, com a deposição dos Grupos Bauru e Caiuá (Figura 9).

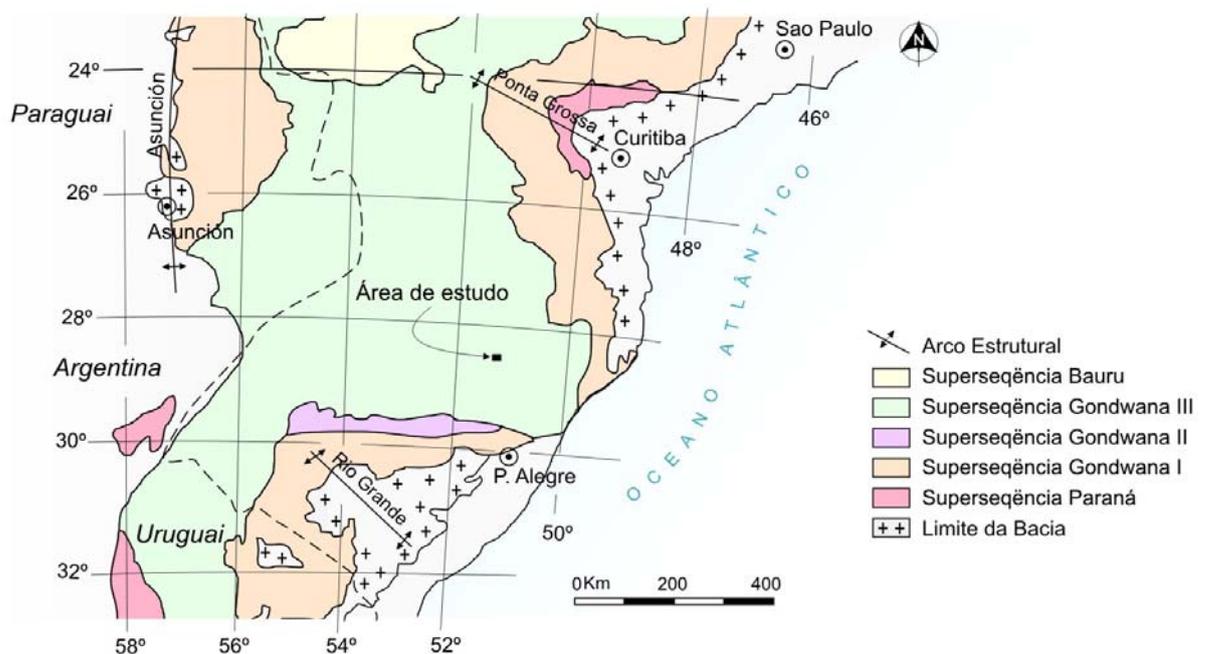


Figura 9 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (modificado de Milani, 1998).

Estas superseqüências correspondem a diferentes ciclos de subsidência da bacia, que são reflexos intracratônico de eventos orogênicos ocorridos na borda da placa. Neste contexto observa-se que a Formação Serra Geral é resultado dos esforços extencionais relacionados à separação do Gondwana, ou seja, da separação entre a América do Sul e a África.

4.3.1.1. Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral compreende um extenso conjunto de derrames de rochas ígneas de idade Eo-Cretácea, predominantemente basaltos. Os basaltos são rochas de composição básica (teor de sílica entre 45 e 52%) que, nas variedades maciças, apresentam coloração cinza escura a preta. Nas variedades afaníticas, certa porção é constituída de matéria vítrea, enquanto nas variedades de granulação mais grossa, os minerais formam cristais milimétricos visíveis a olho nu (Leinz, 1949).

Estas rochas ocorrem na forma de derrames tabulares cujas espessuras podem variar de metros a dezenas de metros. Cada derrame é formado de uma seqüência de litologias distintas. Esta seqüência é constituída por brecha vulcânica e vidro vulcânico na parte inferior, basaltos maciços no meio do derrame, e por basalto vesículo-amigdalóide e brechas basálticas no terço superior. O diaclasamento é horizontal na parte inferior e superior do derrame, e vertical na parte central. Os basaltos vesiculares e amidalóides, que têm presença constante no topo dos derrames, são rochas avermelhadas ou acinzentadas, cheias de vesículas formadas pelo escapamento dos gases durante o resfriamento das lavas. As vesículas podem variar no diâmetro, de milímetros a centímetros, apresentando preenchimentos parciais ou totais de ágata, quartzo, zeólitas, calcita e celadonita (Souza Júnior, 1986).

Intercalados aos derrames básicos ocorrem pacotes ácidos. Estas rochas são interpretadas como diferenciações do magma original ou modificações do mesmo, por assimilação de

materiais mais superficiais. Constituídas principalmente por riolitos e riodacitos, que de forma geral apresentam as mesmas características que suas correspondentes básicas, sendo a principal diferença a constituição mineralógica (Marimon *et al*, 1982).

4.3.1.2. Aspectos estruturais

Os lineamentos do arcabouço estrutural na área de estudo, assim como no restante da Bacia do Paraná, podem ser reunidos em duas direções principais: NE-SW e NW-SE. Nos lineamentos visíveis na Bacia do Paraná pode-se observar um marcante padrão de feições lineares em forma de X, podendo ser divididas em três grupos de acordo com suas orientações (NW-SE, NE-SW e E-W). As duas mais importantes são as orientações NW-SE e NE-SW, as quais constituem zonas de fraqueza antigas que foram reativadas durante a evolução da bacia (Zalán *et al*. 1987).

Segundo Zalán *et al*. (1987), as falhas de direção NE-SW são geralmente constituídas por uma única falha larga ou uma zona de falha retilínea, com freqüentes evidências de movimentações transcorrentes. Já os diversos lineamentos de direção NW-SE estão normalmente preenchidos por diques de diabásio dos arqueamentos estruturais relacionados ao vulcanismo fissural continental da Bacia do Paraná. As formações pertencentes ao Grupo São Bento têm densidade baixa de fraturamento, não apresentando um padrão definido. As fraturas têm pequenas aberturas apresentando descoloração devido à lixiviação. São geralmente de persistência e regularidade variáveis.

A área de estudo encontra-se próximo à Falha de Leão e da Zona de Falha de Blumenau/Soledade, ambas de direção NE. A Sinclinal de Torres constitui um baixo estrutural na área, apresentando direção preferencial NW, e a área também se encontra próxima ao lineamento de Bento Gonçalves que apresenta direção geral E-W (Figura 10). Estas estruturas comumente formam linhas de fraqueza e controlam as direções

preferenciais das drenagens. Nos basaltos desenvolve-se, geralmente, uma zona bastante densa de fraturas devida ao fraturamento conjugado, o qual forma duas famílias de juntas, oblíquas entre si nas vizinhanças dessa faixa cataclástica.

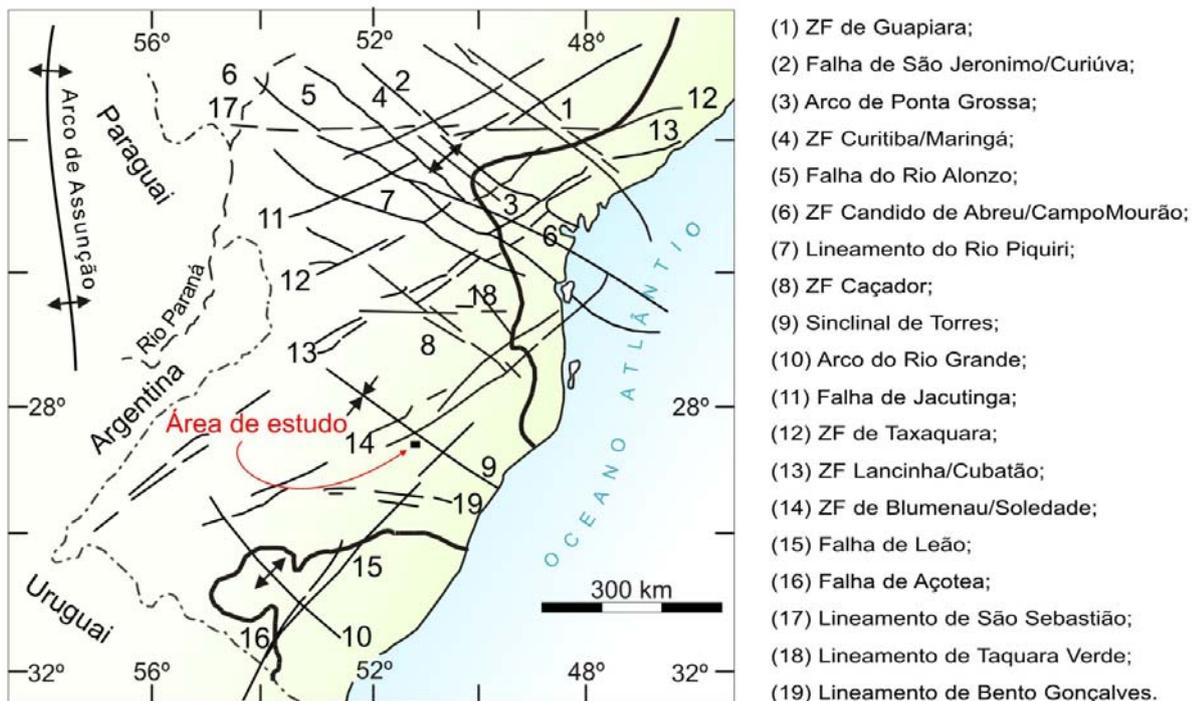


Figura 10 - Arcabouço Estrutural da Bacia do Paraná. (modificado Zalán *et al.* 1987).

5. COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

5.1. Mapeamento da área de estudo

O local compreende uma área de cerca de 1500m de comprimento, por 500m de largura. Foram levantados ao todo quatorze pontos de campo, sendo a grande maioria afloramentos em chão. O mergulho das fraturas medidas nos afloramentos foi predominantemente sub-vertical, em menor proporção sub-horizontal, e raramente inclinado.

Ponto 01

Afloramento em chão, próximo ao desemboque do túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 17 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N10W-10E/90 e a família 2 de direção N40-50E/90, e fraturas subordinadas de direções N25E/90 e N80W/90. Ocorre também um fraturamento sub-horizontal de direção NS/05E (Figura 11). O espaçamento médio das fraturas da família 1 e 2 é de um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.



Figura 11 – Afloramento do ponto 01, detalhe para o fraturamento sub-horizontal.

Ponto 02

Afloramento em chão no leito do córrego, próximo à casa de força. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A3. Foram realizadas 14 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta uma família de fraturas principal de direção N50-70E/90 e fraturas subordinadas de direção N25E/90, NS/90 e N45W/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 03

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 7 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N80E/90 e a família 2 de direção N20-30W/90, e fraturas subordinadas de direções N60E/90 e N50W/90. No local há ocorrência de minerais magnéticos. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento, por vezes curviplanas.

Ponto 04

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 28 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N50-70E/90, e a família 2 de direção N20W/90, e fraturas subordinadas de direção N80W/90 e N20-40E/90. Ocorre também uma fratura inclinada de direção N60E/45NW. No local há ocorrência de minerais magnéticos. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento, exceto por uma fratura de direção N70E/90 com abertura de 5 mm preenchida por material argiloso de coloração clara.

Ponto 05

Afloramento em chão, próximo ao túnel (Figura 12). Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 10 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta uma família principal de direção N80W/90, e fraturas subordinadas de direção N50-60W/90 e N05-20E/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.



Figura 12 – Afloramento do ponto 05.

Ponto 06

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 7 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta uma família principal de direção N30-40E/90, e fraturas subordinadas de direção N80W/90 e N20W/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento, exceto por uma fratura de direção EW/90 que apresentou uma abertura de 5 mm preenchida por material argiloso de coloração avermelhada.

Ponto 07

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 18 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N60-80W/90, e a família 2 de direção N50E/90. Ocorre também uma fratura inclinada de direção N70W/60NE. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 08

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 6 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta uma família principal de direção N60-70E/90, e fraturas subordinadas de direção N50W/90 e N50E/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 09

Afloramento em chão, próximo ao emboque do túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 13 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N50-60E/90, e a família 2 de direção N70W/90, e fraturas subordinadas. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 10

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 10 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N40-60W/90, e a família 2 de direção N50-60E/90, e fraturas subordinadas de direção N30E/90 e EW/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 11

Afloramento em chão, próximo ao túnel. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 10 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N30-60W/90, e a família 2 de direção N70-80W/90, e fraturas subordinadas de direção N70E/90 e N20W/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 12

Afloramento em corte, na margem direita da barragem. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A3, chegando a A4 em algumas porções, onde se observa decomposição esferoidal da rocha (Figura 13). Foram realizadas 4 medidas de fraturas sub-verticais no afloramento. O corte apresenta direção N50W, e foram observadas fraturas nas direções N40E/90, N65E/90 e N85W/90. O alto grau de alteração do afloramento não permitiu a determinação das condições das fraturas. As fraturas sub-horizontais são predominantes, apresentando uma persistência maior que 5 metros, e espaçamento entre 5 e 15 cm.



Figura 13 – Afloramento do ponto 12, detalhe para o forte fraturamento sub-horizontal, e para decomposição esferoidal da rocha.

Ponto 13

Afloramento em chão, na margem direita da barragem, em cota superior à do ponto 12. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 16 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N20-30W/90, e a família 2 de direção N40-50E/90, e fraturas subordinadas. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

Ponto 14

Afloramento em chão, na margem esquerda da barragem. Encontrado litotipo basáltico com grau de alteração A2. Foram realizadas 10 medidas de fraturas no afloramento. Apresenta duas famílias principais, a família 1 de direção N50-60E/90, e a família 2 de direção N30W/90, e fraturas subordinadas de direção N20E/90, N80W/90 e EW/90. O espaçamento médio das fraturas da família 1 é de meio a um metro, com persistência menor que 5 metros. As fraturas encontram-se fechadas e sem preenchimento.

5.1.1. Análise estrutural das fraturas

Como a grande maioria das fraturas apresenta o ângulo de mergulho sub-vertical, optou-se pela apresentação dos resultados em diagrama de rosetas para representar a tendência geral do fraturamento (Figura 14).

A análise da área através de fotografia aérea mostra um forte controle estrutural, estando os rios e drenagens encaixados nestas fraturas. As direções mais marcantes são as N60E e N30E, formando longos alinhamentos, com traços maiores que 3 km, podendo atingir até 5 km de comprimento, e com espaçamento de 1 a 0,5 km entre eles. Os alinhamentos de direção N30W também são bem marcados no terreno, formando traços longos, mas com afastamento entre 1,5 a 2 km. Os alinhamentos de direção N80W e EW apresentam traços mais curtos, menores que 1 km, e são bem evidenciados apenas em uma faixa um pouco ao sul da área de estudo.

No diagrama geral da área, com as atitudes de todos os pontos plotadas, pode-se observar que as direções gerais observadas por foto aérea se repetem nas fraturas medidas em campo. A direção N60-50E formando a família principal de fraturas, as direções N80W e N20W também muito importantes na área, com fraturas subordinadas de direções NS. Com os diagramas plotados no mapa de pontos da área (Figura 15), percebe-se que há uma tendência nos pontos próximos aos alinhamentos de que a família principal de fraturas esteja paralela ao alinhamento, confirmando em campo as estruturas observadas por foto aérea. Isso fica bem marcado no ponto 2 ao sul da área; nos pontos 8, 9 e 10 no centro da área; e nos pontos 12 e 13 ao norte.

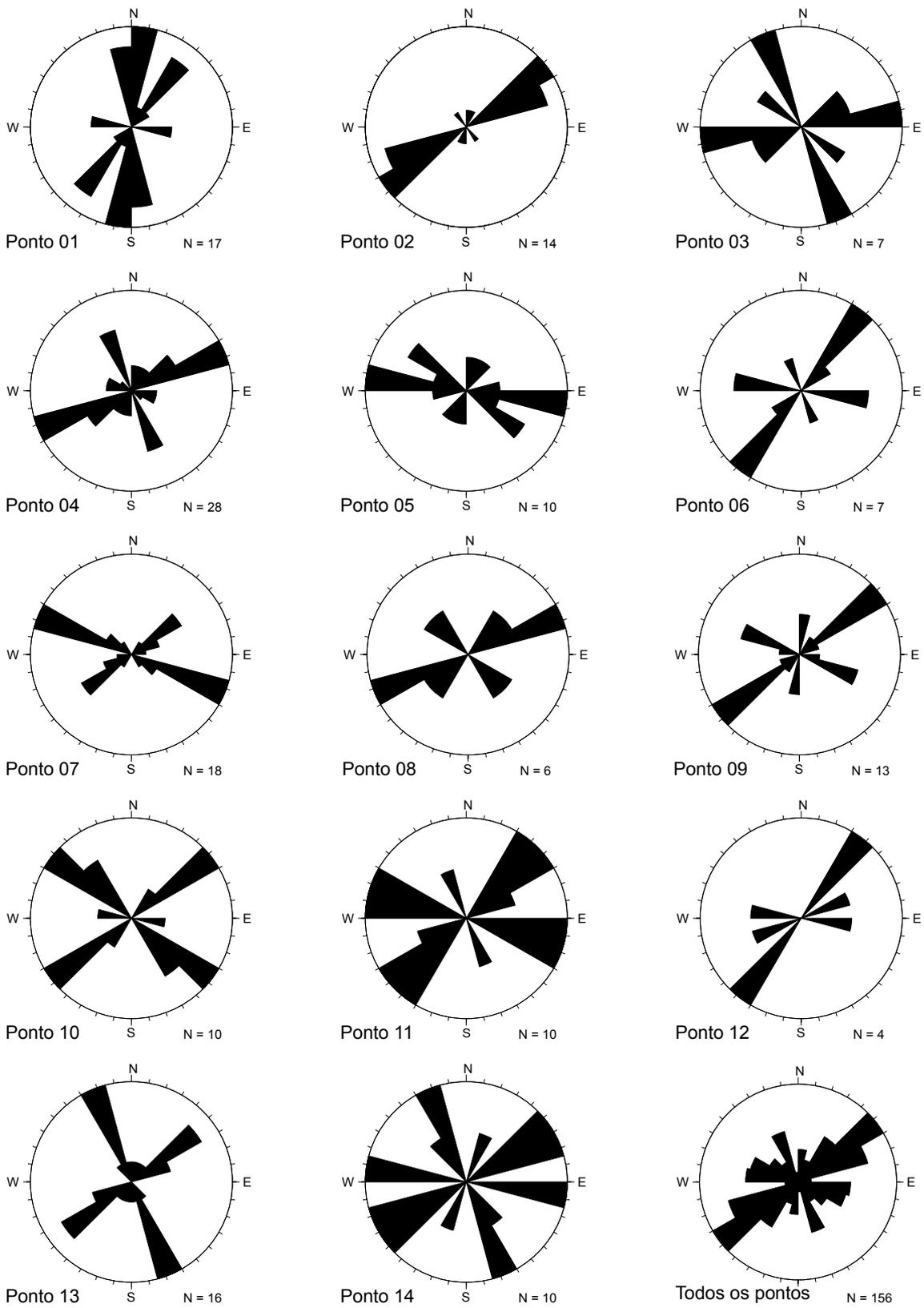


Figura 14 – Diagramas de rosetas das fraturas. (N = número de medidas)

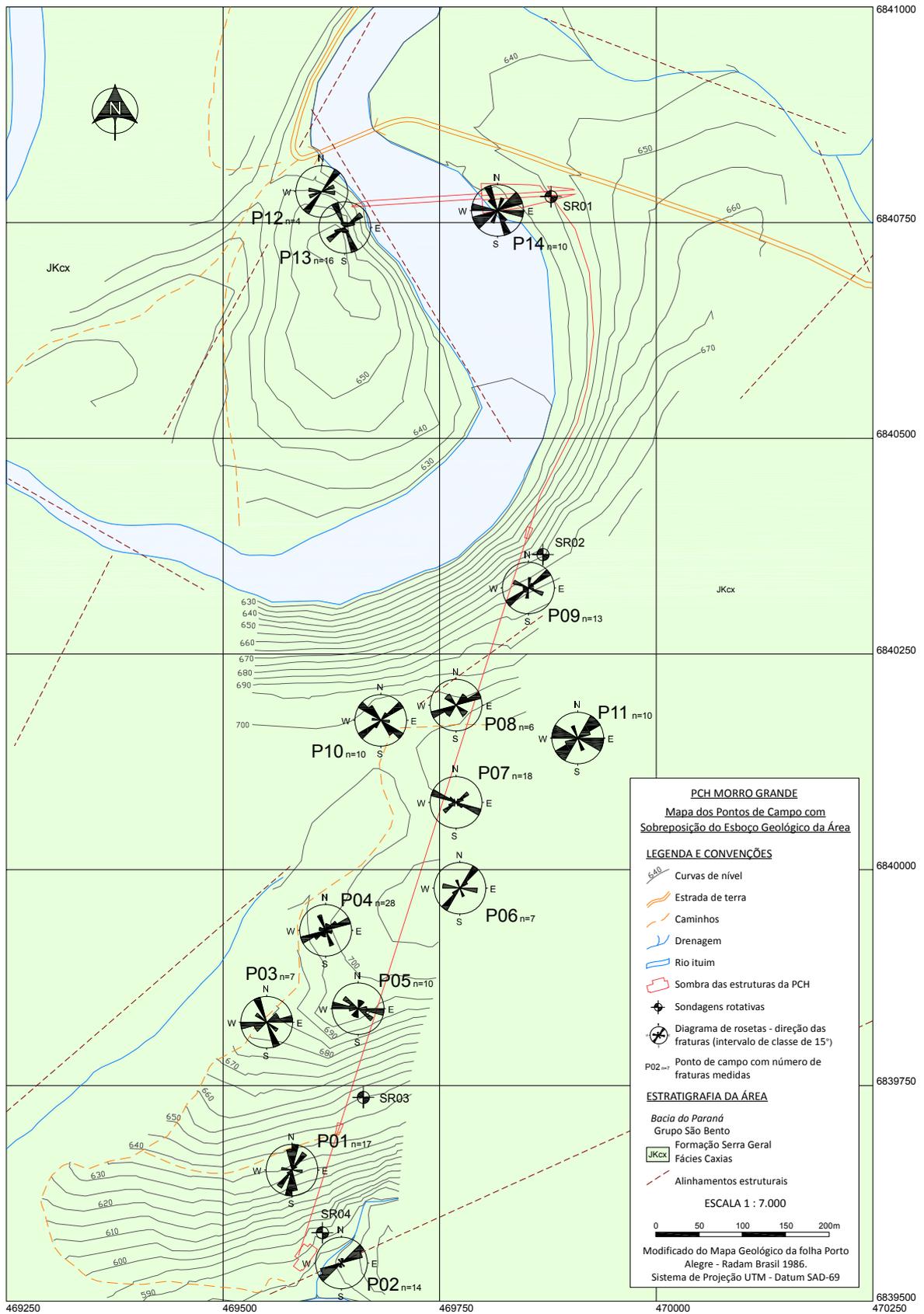


Figura 15 – Mapa de pontos de campo com diagrama de roseta das fraturas sobreposto ao esboço geológico da área.

5.2. Descrição das sondagens

A área dispõe de 4 furos de sondagem rotativa: o SR1 com 12,60 metros localizado na área da barragem (Figura 16); o SR2 com 40,90 metros localizado na área de emboque do túnel (Figura 17 e 16); o SR3 com 23 metros localizado na área de desemboque do túnel (Figura 19); e o SR4 com 22,90 metros localizado na área da casa de força (Figura 20).

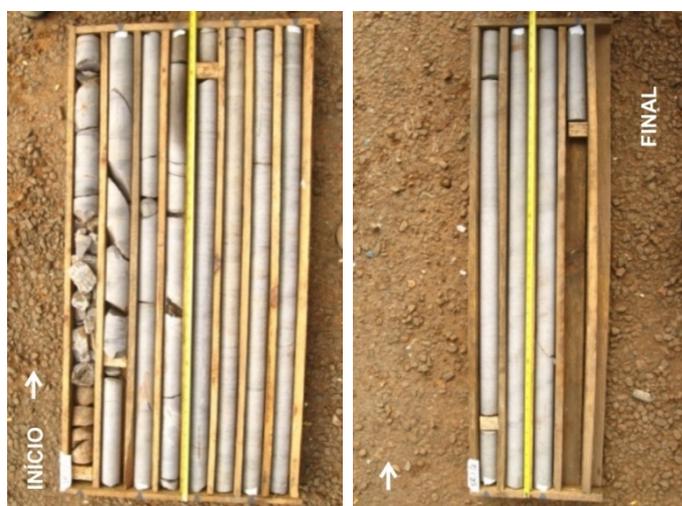


Figura 16 – Foto dos testemunhos da sondagem SR1, caixas 1 e 2.

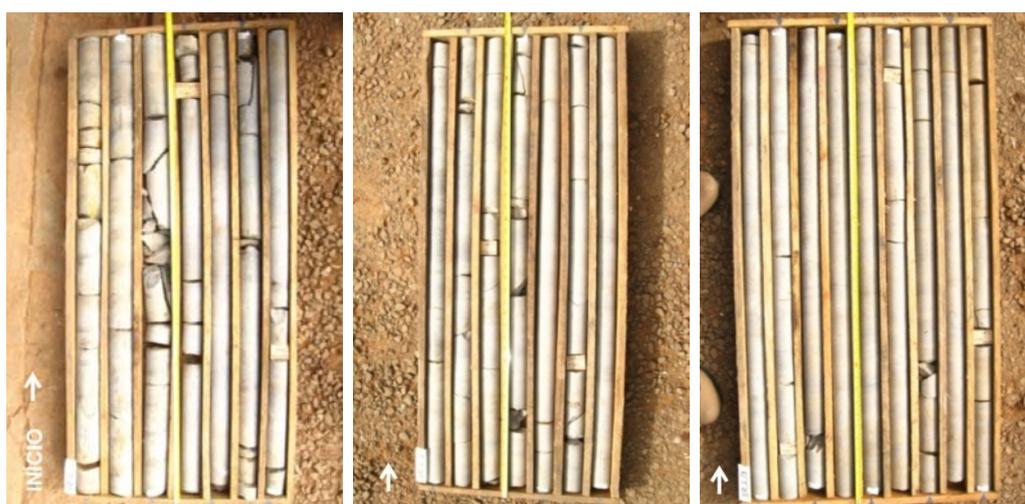


Figura 17 – Foto dos testemunhos da sondagem SR2, caixas 1, 2 e 3.



Figura 18 – Foto dos testemunhos da sondagem SR2, caixas 4, 5 e 6.



Figura 19 – Foto dos testemunhos da sondagem SR3, caixas 1 e 2.



Figura 20 – Foto dos testemunhos da sondagem SR4, caixas 1, 2 e 3.

5.2.1. Litologia

O litotipo perfurado nas quatro sondagens é o mesmo, ocorrendo pequenas variações de textura e coloração. Trata-se de uma rocha basáltica, de coloração cinza clara, de granulação fina a afanítica, de estrutura maciça, provavelmente um dacito. Cortando a rocha ocorrem alguns veios preenchidos por zeólita, que em veios mais abertos podem desenvolver cristais maiores (Figura 21).



Figura 21 – Amostra de dacito com fratura aberta preenchida por veio de zeólita.

5.2.2. Grau de alteração

Na descrição dos testemunhos foram identificados três graus de alteração (Figura 22). O grau A1 é predominante nas sondagens, estando a maioria das rochas no estado ‘praticamente sã’, caracterizado por uma alteração insipiente dos feldspatos, e poucas no estado ‘sã’. O grau de alteração A2, ‘moderadamente alterada’, ocorre em poucos trechos, sendo estas rochas caracterizadas por uma alteração mais acentuada dos minerais, e uma descoloração da rocha tendendo para um tom esverdeado. O grau de alteração A3, ‘muito alterada’, ocorre apenas nas sondagens SR1 e SR4, nas porções mais próximas ao início do furo. Esse grau de alteração é caracterizado por uma intensa alteração dos minerais, e rochas friáveis e muito descoloridas.



Figura 22 – Amostras de rocha no diferentes graus de alteração encontrados.

5.2.3. Descontinuidades

As sondagens apresentam uma predominância de ocorrência de fraturas horizontais, sendo em menor quantidade e muito mais esparsas as fraturas inclinadas. As fraturas verticais, apesar de serem mais difíceis de serem amostradas em furos verticais, mostram-se presentes ao longo de quase todas as sondagens.

A descrição da condição das descontinuidades foi feita em relação a persistência, a abertura, a rugosidade, o preenchimento, e a alteração das paredes da fratura. A Figura 23 mostra os diferentes perfis de rugosidade encontrados nas fraturas descritas.



Figura 23 – Exemplos de rugosidade encontrados nas fraturas das sondagens.

A descrição da abertura da fratura é difícil de determinar em amostras de testemunhos, pois a distância original das paredes não é preservada após a retirada dos testemunhos do furo de sondagem. A solução tomada foi verificar o encaixe das duas partes, quando ele se mostrava perfeito foi adotada a abertura menor que 0,1 mm, e quando o encaixe das duas partes não era tão perfeito foi adotada abertura entre 0,1 e 1 mm. Nos casos das amostras fragmentadas foi adotada abertura de 1 a 5 mm. Preferiu-se não adotar em nenhum caso abertura igual a zero.

5.3. Ensaio de laboratório

Alguns ensaios e análises de laboratório foram realizados para melhorar a caracterização da rocha, sendo eles a análise petrográfica, e o ensaio de carga puntual, para determinação da resistência da rocha intacta, um dos parâmetros solicitados pela classificação adotada.

5.3.1. Análise petrográfica

Foi feita a análise petrográfica da amostra 12, sendo a rocha identificada como um dacito de coloração marrom acinzentada com pontuações esbranquiçadas, constituída por

microfenocristais de andesina e diopsídio em matriz hipocristalina formada por quartzo, feldspato alcalino, andesina, minerais opacos e vidro vulcânico. Os microfenocristais perfazem até 15% da rocha, sendo 10% andesina e 5% diopsídio. Apresenta estrutura maciça.

5.3.2. Ensaio de carga puntual

A determinação da resistência da rocha intacta foi feita através do ensaio de compressão puntual, que foi escolhido por ser um ensaio simples e de baixo custo. O objetivo foi determinar a resistência da rocha em seus diferentes graus de alteração. Ao todo foram selecionadas 13 amostras no grau de alteração A1, 17 no A2 e 3 no A3.

O baixo número de amostras no grau de alteração A3 deve-se ao fato da pouca quantidade de rochas neste grau de alteração com as dimensões necessárias para o ensaio. A diferença entre o número de amostras no grau A1 (13) e A2 (17) deve-se ao fato que a maioria das amostras apresenta um comprimento maior que o solicitado pelo ensaio, podendo ser serradas em 2 ou 3 partes. Depois de serradas as amostras, foi obtido um número de 25 amostras no grau A1, e 27 amostras no grau A2. Das 55 amostras ensaiadas, 4 falharam por apresentarem padrão de rompimento inválido, ou seja, a ruptura não ocorreu em toda a seção diametral da amostra.

Desta forma, obteve-se para as rochas com alteração A1 um índice de carga puntual médio $I_{s(50)}$ igual a 11,13 MPa, e para as com alteração A2 igual a 6,74 MPa. Para as A3 o valor obtido foi muito baixo, não sendo adequado utilizar valores de carga puntual, sendo neste caso mais indicado o uso da compressão uniaxial. As planilhas completas com os dados obtidos nos ensaios encontram-se no anexo A.

6. APLICAÇÃO DO SISTEMA RMR

A classificação pelo sistema RMR é comumente aplicada a regiões estruturais pré-determinadas, que apresentem características mais ou menos homogêneas. Considerando que na área em estudo ocorre apenas um tipo litológico, uma pré-divisão do maciço resultaria na identificação de dois grandes compartimentos, o maciço rochoso e terroso. Para a subdivisão do maciço rochoso teriam que ser analisadas características como fraturamento e alteração. Desta forma optou-se por testar o sistema RMR, sem a pré-divisão do maciço rochoso, aplicando a classificação continuamente ao longo das sondagens, uma vez que as alterações propostas visam melhorar a identificação daquelas características. Com este procedimento as variações dos parâmetros determinam a segmentação da sondagem, onde o valor RMR é calculado para cada segmento. Para que se possa verificar o efeito causado pelas modificações propostas, a classificação das sondagens foi feita tanto com estas modificações (segmentada), quanto na forma original (por manobras), onde a subdivisão é dada principalmente pelo comprimento das manobras devido ao uso do RQD.

6.1. Parâmetros

Quanto a caracterização dos parâmetros ao longo das sondagens destacam-se os seguintes aspectos:

- Para rochas com grau de alteração A1 o índice puntiforme médio é de 11,13 com peso relativo igual a 15. Para rochas com grau de alteração A2 o índice puntiforme médio é de 6,74 com peso relativo igual a 12. As rochas com grau de alteração A3 têm um índice puntiforme médio inferior a 1, sendo que Bieniawski (1989) aconselha neste caso que se utilize a compressão simples. Visto que se dispunham poucas amostras neste grau de

alteração, não foi possível realizar os ensaios de compressão simples, convencionando-se utilizar para as rochas com alteração A3 o valor médio do campo, ou seja, 1.

- Neste estudo optou-se pela utilização do IQR no lugar do RQD, pois o cálculo do IQR é feito para zonas de fraturamento homogêneo, o que evita a diluição das características ruins do maciço, como podem acontecer com a utilização do RQD, que é calculado por manobra.

- A ação da água subterrânea foi determinada através da relação entre a pressão de água e a tensão principal, sendo que a planilha com a memória dos cálculos realizados para cada uma das sondagens encontra-se no Anexo B.

A influência da orientação de descontinuidades foi determinada para cada sondagem, sendo considerada em todos os casos como moderada:

- A sondagem SR1 foi realizada na área da barragem, onde as principais descontinuidades são (i) fraturas sub-horizontais, associadas à (ii) fraturas sub-verticais de direções oblíquas ao eixo da barragem, e em menor número (iii) fraturas sub-verticais sub-paralelas ao eixo.

- A sondagem SR2 foi realizada no emboque do túnel, onde as principais descontinuidades são (i) fraturas sub-horizontais, associadas à (ii) fraturas sub-verticais de direções oblíquas ao eixo do túnel, e em menor número (iii) fraturas sub-verticais perpendiculares ao eixo.

- A sondagem SR3 foi realizada no desemboque do túnel, onde as principais descontinuidades são (i) fraturas sub-horizontais, associadas à (ii) fraturas sub-verticais de direções oblíquas ao eixo do túnel, e em menor número (iii) fraturas sub-verticais paralelas ao eixo.

- A sondagem SR4 foi realizada na área da casa de força, onde as principais descontinuidades são (i) fraturas sub-horizontais, associadas à (ii) fraturas sub-verticais de direções oblíquas ao eixo do alinhamento.

6.2. Classificação das sondagens

As notas atribuídas a cada um dos parâmetros classificados foram transformadas em planilhas, de forma a facilitar o cálculo da nota final. Abaixo segue como exemplo a planilha utilizada para a sondagem SR1, com as notas obtidas por cada parâmetro, no modelo segmentado proposto neste estudo e no modelo por manobras (Tabela 22). As planilhas de todas as sondagens encontram-se no Anexo C.

As sondagens rotativas analisadas são apresentadas da Figura 24 à Figura 27. No boletim de descrição da sondagem destaca-se: a coluna Nível d'água, onde está representada a variação em profundidade da relação entre a pressão da coluna d'água e a tensão principal; a representação tanto do RQD quanto do IQR; a posição de cada uma das amostras utilizadas para a realização dos ensaios; a representação das fraturas com espaçamento real, e a classificação do espaçamento segundo o sistema RMR, representada por uma escala de cores; a representação da condição das fraturas; e duas colunas onde é representada a classificação da sondagem pelo sistema RMR, uma por segmentos e outra por manobra, para facilitar a comparação dos resultados.

**Tabela 22 – Planilha de aplicação do sistema RMR na sondagem SR1.
Modelo segmentado e modelo por manobras.**

SR1		SEGMENTOS										MANOBRAS				
PARÂMETROS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5
Resistência		1	12	15	15	15	15	15	15	15	15	-	15	15	15	15
RQD		5	5	17	17	17	20	20	20	20	20	-	8	17	20	20
Espaçamento		5	5	8	8	8	15	15	20	15	15	-	8	10	15	15
Fraturas	Persistência	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	2
	Abertura	1	1	4	5	5	5	5	5	5	5	-	4	5	5	5
	Rugosidade	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	3	3	3	3
	Preenchimento	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-	6	6	6	6
	Alteração	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	-	5	5	5	5
Água		15	15	15	15	15	15	10	7	7	4	-	15	15	10	7
Direção		-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-	-7	-7	-7	-7
RMR		32	43	68	69	69	79	74	76	71	68	0	59	71	74	71

Figura 24 – Boletim de descrição da sondagem SR1, com a classificação RMR.

Figura 25 – Boletim de descrição da sondagem SR2, com a classificação RMR.

Figura 26 – Boletim de descrição da sondagem SR3, com a classificação RMR.

Figura 27 – Boletim de descrição da sondagem SR4, com a classificação RMR.

As classes de maciço da classificação RMR são representadas por uma escala de cores: azul - muito bom; verde - bom; amarelo - regular; e laranja - pobre. Nenhuma classe foi identificada como muito pobre.

6.1. Classificação dos afloramentos

A aplicação parcial do sistema RMR nos afloramentos levou a atribuição de pesos aos parâmetros descritos em campo: espaçamento, persistência, abertura, preenchimento e orientação das descontinuidades. A Tabela 23 apresenta as notas atribuídas a cada parâmetro, para cada ponto de campo.

Tabela 23 – Planilha de atribuição dos pesos relativos aos afloramentos de campo.

PARÂMETROS	NÚMERO DO PONTO DE CAMPO													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Espaçamento	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	8	15	15
Persistência	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4
Abertura	5	5	5	1	5	1	5	5	5	5	5	-	5	5
Preenchimento	6	6	6	2	6	2	6	6	6	6	6	-	6	6
Direção	-7	-7	-2	-2	-2	-12	-2	-2	-2	-2	-2	-15	-2	-2

7. INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS EM SEÇÕES TIPO

Foram elaboradas duas seções tipo ao longo dos eixos das principais estruturas previstas no projeto da PCH Morro Grande, uma das seções foi feita ao longo do eixo da barragem, possuindo uma extensão total de 330 metros. A outra seção representa o circuito hidráulico da PCH (canal e túnel de adução, conduto forçado e casa de força) com uma extensão total de 1330 metros. Esta seção não é totalmente retilínea, acompanhando um trecho curvo do canal de adução. As seções são as mesmas utilizadas para o projeto de engenharia, facilitando a integração dos resultados da caracterização geotécnica com os aspectos construtivos da obra. O maciço terroso não foi classificado nas seções, por esse motivo apresentando-se como cobertura de solo indiferenciada.

Os pontos de campo, por não serem coincidentes com os traçados das seções, foram transportados para locais da seção de mesma cota. Os pontos 3, 4, 10 e 11 foram desconsiderados por estarem muito distantes da linha da seção.

As sondagens e os pontos de campo foram relacionados de acordo com a proximidade entre si, sendo a sondagem SR1 relacionada com os pontos 12, 13 e 14, a SR2 com os pontos 7, 8 e 9, a SR3 com os pontos 1, 5 e 6, e a SR4 com o ponto 2. Os resultados obtidos neste procedimento foram:

- Ponto 1 x SR3 – A nota atribuída para a influência da orientação das descontinuidades apresenta uma redução de 2 pontos ao longo de toda a sondagem. Essa redução na nota final não causa alteração das classes do maciço.

- Ponto 2 x SR4 – Não ocorre alteração das notas dos parâmetros.
- Ponto 5 x SR3 – Não ocorre alteração das notas dos parâmetros.

- Ponto 6 x SR3 – Ocorre redução das notas atribuídas para abertura (- 4 pontos), preenchimento (- 4 pontos), e orientação (- 7 pontos). A redução da nota da influência da orientação deve-se a direção principal das fraturas no ponto 6 que é paralela à direção do túnel, caracterizando uma situação muito desfavorável. Essa redução de 15 pontos na nota final causou a alteração das classes de maciço, com os segmentos classificados como ‘muito bom’ passando para ‘bom’ e os classificados como ‘bom’ para ‘regular’.
- Ponto 7, 8 e 9 x SR2 – Não ocorre alteração das notas dos parâmetros.
- Ponto 12 x SR1 – As informações do ponto 12 não puderam ser correlacionadas com as da sondagem SR1, pois as descontinuidades classificadas no afloramento são sub-horizontais.
- Ponto 12 x SR2 – As informações do ponto 12 apresentam certa correlação com os segmentos 21 e 22 da sondagem SR2, caracterizado por um forte fraturamento sub-vertical, e apresentando-se na mesma cota altimétrica, entre 642 e 647m, sugerindo uma continuidade lateral para o fraturamento sub-horizontal.
- Ponto 13 e 14 x SR1 – Não ocorre alteração das notas dos parâmetros.

A seção da barragem é apresentada na Figura 28, e a seção do circuito hidráulico é apresentada na Figura 29. Para uma melhor visualização dos perfis foi empregado um exagero em relação a escala horizontal de 4 vezes. Destaca-se o caráter inferido do contato entre os compartimentos no interior do maciço.

Nas duas seções destaca-se a presença de um compartimento sub-horizontal definido entre as cotas 642 e 647m, caracterizado por um forte fraturamento sub-horizontal com espaçamento entre 5 e 15 cm, verificado na sondagem SR2 e no ponto de campo 12. Na seção do circuito hidráulico destaca-se a influência do ponto 6 na determinação da não continuidade lateral dos compartimentos de classe ‘muito bom’ definidos na sondagem SR3, e a continuidade do compartimento de classe ‘regular’ definido na sondagem SR2.

8. PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

A estimativa dos parâmetros geomecânicos pode ser obtida para cada classe de maciço através da Tabela 21 (página 30) proposta por Bieniawski (1989), ou pelo cálculo direto desses valores pelas equações propostas por Sen e Sadagah (2003, ver página 31). Para cada um dos compartimentos principais encontrados nas seções da barragem e do circuito hidráulico, foram calculados os parâmetros geomecânicos com base nas equações das páginas 31 e 32, conforme apresentado na Tabela 24.

Comparando os resultados obtidos com os propostos por Bieniawski (1989), observa-se que os valores encontrados através das equações 10, 11 e 12 mostram-se discordantes dos encontrados na Tabela 21. Os valores de vão da seção e coesão apresentam-se em média mais baixos, enquanto os valores de ângulo de atrito apresentam-se em média mais altos. Os valores de tempo de auto-sustentação mostram uma correlação melhor. Devido a essa divergência de resultados, é preferível a utilização dos valores sugeridos pelo sistema RMR (Tabela 21) para a estimativa dos parâmetros que se apresentaram discordantes.

Tabela 24 – Parâmetros geomecânicos calculados a partir da nota RMR.

Compartimento	Barragem		Túnel - emboque		Túnel - desemboque		Casa de Força	
	Regular	Bom	Regular	Bom	Muito Bom	Bom	Pobre	Regular
RMR médio	59	72	58	70	83	75	27	51
Auto-sustentação	-	-	25 dias	7 meses	6 anos	17 meses	-	-
Vão livre de seção (m)	-	-	3,2	3,9	4,6	4,2	-	-
Coesão (KPa)	214	261	210	254	301	272	98	185
Ângulo de atrito	40°	43°	40°	43°	46°	44°	32°	38°
Módulo de deformabilidade (GPa)	18	44	16	40	66	50	3	11

Em vermelho, valores mais baixos que os propostos por pelo sistema RMR
Em azul, valores mais altos que os propostos por pelo sistema RMR

Figura 28 – Seção da barragem com compartimentação pelo sistema RMR.

Figura 29 – Seção do circuito hidráulico com compartimentação pelo sistema RMR.

9. ANÁLISE DOS RESULTADOS

9.1. Classificação RMR aplicada às sondagens

A aplicação do sistema RMR nas sondagens (Figura 24 a Figura 27) resultou na classificação linear do maciço rochoso em 5 classes, que são definidas de acordo com o intervalo de notas obtidas, como 'muito pobre', 'pobre', 'regular', 'bom' e 'muito bom', dos valores mais baixos para os mais altos.

Na sondagem SR1 o maciço foi classificado como 'bom', sendo apenas a porção superficial mais alterada, inferior a 1 metro, classificada como 'regular' e 'pobre'.

Na sondagem SR2 o maciço apresenta uma predominância da classe 'bom', ocorrendo intercalações com zonas 'regular' e 'muito bom'. A ocorrência de zonas de classe regular está relacionada diretamente à porções com fraturamento mais elevado, e à ocorrência de rochas no grau de alteração A2 entre a profundidade de 23 e 27 metros. Já a ocorrência de zonas de classe 'muito bom' está relacionada à porções de muito baixo fraturamento.

Na sondagem SR3 o maciço apresenta no primeiro meio metro uma classe 'regular', relacionada ao grau de alteração A2 da rocha. Predomina a classe de maciço 'muito bom' com intercalações de zonas de classe 'bom', relacionadas à ocorrência de regiões mais fraturadas.

Na sondagem SR4 o maciço foi classificado como 'regular', o que se deve principalmente ao elevado grau de fraturamento e às condições das fraturas. Na porção superficial ocorre uma classe 'pobre' de cerca de 1,7 metros, relacionada ao grau de alteração A3 da rocha.

9.2. Comparação: Modelo Segmentado X Modelo por Manobra

O resultado final da compartimentação das sondagens mostra que as alterações propostas melhoram a sensibilidade do sistema às variações dos parâmetros.

Na sondagem SR1, onde se tem bem definida a condição pior do maciço no primeiro metro pelo modelo segmentado, no modelo por manobra essa informação é diluída nas características melhores da rocha no restante da manobra, deixando todo o trecho da manobra na classe 'regular'. No restante da sondagem não há diferença entre os dois modelos, pois o maciço se apresenta bem homogêneo.

Na sondagem SR2, onde se têm definidas diversas zonas de classes de maciço pelo modelo segmentado, no modelo por manobras essas informações são homogeneizadas, sendo o maciço classificado quase que inteiramente como 'bom'. Entre a profundidade de 23 e 27 metros, onde ocorrem rochas no grau de alteração A2, o modelo por manobra consegue detectar a ocorrência da zona mais fraturada.

Na sondagem SR3, o maciço antes classificado com 'muito bom' com algumas intercalações de zonas da classe 'bom', passa a ser classificado totalmente como de classe 'bom', não sendo identificada a porção superficial de características piores.

Na sondagem SR4, não ocorre muita variação de um modelo para o outro, principalmente pela grande homogeneidade do maciço. Ocorre apenas uma redução da zona inicial de classe 'pobre', continuando o restante do maciço classificado como de classe 'regular'.

Observa-se que a aplicação do sistema RMR no modelo por manobras apresenta a tendência de homogeneizar as características do maciço rochoso dentro do comprimento da manobra, o que ocorre também em outros modelos de aplicação, seja por segmentos pré-definidos, ou em zonas homogêneas.

A aplicação do sistema RMR no modelo segmentado, onde são identificadas primeiramente as variações das características do maciço, permite que os segmentos sejam determinados de maneira a não englobarem características diferentes de um mesmo parâmetro, evitando a homogeneização das informações.

9.3. Classificação RMR aplicada aos afloramentos

A aplicação do sistema RMR nos afloramentos rochosos teve como objetivo auxiliar a interpolação da classificação das sondagens, e foi feita de forma parcial, classificando apenas os parâmetros que pudessem refletir características internas do maciço. Os parâmetros considerados são os relacionados às descontinuidades, por apresentam continuidade espacial. Destes, os que puderam ser determinadas em campo foram o espaçamento, a persistência, a abertura, o preenchimento, e a orientação. Todos estes parâmetros, exceto a influência da orientação, representam 38 pontos pela classificação RMR, suficientes para causar uma mudança de classe de maciço, que varia a cada 20 pontos.

De maneira geral, os pesos atribuídos aos parâmetros classificados nos afloramentos de campo apresentam valor igual ou maior que os atribuídos aos classificados nas sondagens. As exceções ocorrem nos pontos 4 e 6, onde são observadas fraturas abertas e preenchidas por material argiloso, e no ponto 12, onde é observado um fraturamento horizontal com espaçamento entre 5 e 15 centímetros.

A atribuição de pesos para a influência da orientação das descontinuidades, em relação ao fraturamento sub-vertical, permitiu que se definisse a variação do parâmetro ao longo da seção. Como exemplo destaca-se o ponto 6, onde a direção principal das fraturas é paralela ao eixo do túnel, caracterizando uma condição muito desfavorável, enquanto que nos outros pontos de campo as fraturas perpendiculares ao eixo caracterizam uma condição favorável.

9.4. Integração em seções tipo

Para a obtenção da compartimentação final do maciço rochoso, a classificação RMR das sondagens foi plotada nas seções tipo, e integrada com os dados obtidos no mapeamento de campo. A integração foi feita com a interpolação da classificação das sondagens, que foi cruzada com a classificação feita para os pontos de campo, prevalecendo a condição pior do maciço, ou seja, o peso de valor mais baixo.

O cruzamento da interpolação da classificação das sondagens com a classificação dos afloramentos só foi possível porque os parâmetros classificados nos pontos de campo estão relacionados às fraturas sub-verticais, às quais se admite certa continuidade espacial. Desta forma, as informações dos pontos de campo permitiram a correção da interpolação da classificação, determinando a continuidade, ou não, dos compartimentos definidos no interior do maciço.

A compartimentação do maciço rochoso na seção da barragem foi baseada na classificação de apenas uma sondagem, a SR1 localizada na margem esquerda, e na descrição de 3 afloramentos de campo, pontos 12, 13 e 14.

No ponto 12 o fraturamento principal identificado é sub-horizontal, diferente dos outros pontos onde o fraturamento principal é sub-vertical, não sendo possível a sua correlação com a sondagem SR1. Contudo, observou-se uma forte correlação deste afloramento com a faixa descrita na sondagem SR2 de mesma cota, entre 642 e 647m. Na encosta de desemboque do túnel observa-se uma quebra de relevo na mesma cota, reforçando a idéia de que nesta cota ocorre uma zona de fraturamento sub-horizontal intenso, caracterizado por um espaçamento entre 5 e 15 centímetros. Por esse motivo as seções da barragem e do circuito hidráulico apresentam um compartimento de classe 'regular' entre essas cotas.

O ponto 13, localizado próximo ao ponto 12, mas em cota superior, bem como o ponto 14, localizado em cota inferior, apresentam fraturamento principal sub-vertical, que puderam ser correlacionadas com a classificação da sondagem SR1. Como o confronto dos pesos dos parâmetros classificados nesses pontos com os da sondagem SR1 não causaram modificação da classe, o maciço abaixo da cota 640, na seção da barragem, foi mantido com a classificação obtida na sondagem SR1, de classe 'bom'. A porção superficial do maciço, no leito do rio, foi mantida como de classe 'regular', conforme identificado na sondagem SR1, admitindo-se que as regiões superficiais apresentam condições piores dadas principalmente pelo avanço da capa de alteração.

Na seção do circuito hidráulico a compartimentação do maciço rochoso foi baseada na classificação das 4 sondagens, e na descrição de 8 afloramentos de campo, e se ateve as áreas próximas às sondagens, e nas regiões das estruturas como canal, túnel e conduto forçado.

A comparação dos pesos dos parâmetros classificados nos afloramentos dos pontos 2, 5, 7, 8, 9 e 14, com os classificados nas sondagens não causa a alteração da classificação RMR das sondagens. A comparação do ponto 1 com a sondagem SR3 mostra uma redução de 2 pontos na classificação da sondagem, mas não causa a mudanças de classes. A comparação do ponto 6 com a sondagem SR3 mostra uma redução de 15 pontos, causando mudanças de classes em toda a classificação da sondagem.

A alteração das classes de maciço obtidas na comparação do ponto 6 com a sondagem SR3 determinaram a menor continuidade lateral dos compartimentos de classe 'muito bom' definidos na sondagem SR3, a maior continuidade do compartimento de classe 'regular' definido na sondagem SR2 na cota 635. Na encosta do conduto forçado, entre as sondagens SR2 e SR3, foi definido um compartimento de transição de classe 'bom' entre os compartimentos de classe 'muito bom' e 'regular'.

9.5. Compartimentação do maciço rochoso

A compartimentação do maciço rochoso, ao longo das seções levantadas, mostra a variação da qualidade do maciço, representada pelas diferentes classes definidas pelo sistema RMR. Os compartimentos foram determinados de acordo com a distribuição espacial das classes encontradas com a classificação do maciço rochoso. Das 5 classes definidas pelo sistema RMR, apenas uma não foi encontrada, a classe 'muito pobre'. Nas seções da barragem (Figura 28) e circuito hidráulico (Figura 29), além dos compartimentos de classe 'muito bom', 'bom', 'regular' e 'pobre', difere-se ainda a cobertura de solos indiferenciada.

Na seção da barragem definem-se dois compartimentos de classe 'pobre' na porção superficial do maciço, associados à ação intempérica mais intensa nesta porção. O compartimento de classe 'regular', entre as cotas 642 e 647m, é definido devido à ocorrência de uma zona de fraturamento sub-horizontal intenso neste nível, e é estendido na porção superficial do maciço no leito do rio devida ao intemperismo mais intenso nesta área. O compartimento de classe 'bom' é definido com base na sondagem SR1 na margem esquerda, sendo esta condição também atribuída para as porções sub-superficiais do leito do rio e da margem direita.

Na seção do circuito hidráulico observa-se que na região do canal adutor ocorre um compartimento delgado superficial de classe 'pobre', e que em sub-superfície predominam as classes 'regular' e 'bom'. Na região do túnel destaca-se um compartimento de classe 'regular' definido entre as cotas 642 e 647m, associados à ocorrência de uma zona de fraturamento sub-horizontal intensa neste nível. A porção do maciço acima da cota 647 apresenta compartimentos de classe 'bom' intercalados com compartimentos de classes 'muito bom' e 'regular'.

A área de emboque do túnel encontra-se sobre um compartimento de classe 'regular' intercalada com um compartimento de classe 'bom', e na área de desemboque predominam

compartimentos de classe 'muito bom' com intercalações de compartimentos de classe 'bom'. Na região da casa de força ocorre um compartimento delgado superficial de classe 'pobre', e em sub-superfície predomina um compartimento de classe 'regular'. Na região do conduto forçado ocorre um compartimento de classe 'bom' definido pela transição dos compartimentos de classes 'muito bom' e 'regular'.

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista o recente aumento no número de projetos de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), e a importância das investigações geológico-geotécnicas para este tipo de obra, os estudos desenvolvidos na presente pesquisa contribuem para melhorar o estado de conhecimento do maciço rochoso na fase inicial do projeto.

A metodologia proposta para o estudo da compartimentação do maciço rochoso da PCH Morro Grande, baseada em dados já disponíveis e em dados obtidos em ensaios de baixo custo, visou à classificação do maciço rochoso a partir das sondagens rotativas, usando o sistema RMR, e a integração dos resultados em seções tipo, com o apoio da classificação parcial dos afloramentos rochosos.

Quanto ao desenvolvimento da pesquisa, destacam-se os seguintes aspectos:

- A obtenção de dados para o estudo do maciço rochoso da PCH Morro Grande foi realizada de três formas: através da coleta de dados superficiais, obtidos pela descrição de afloramentos de campo; de dados de sub-superfície, obtidos pela descrição de testemunhos de sondagens rotativas; e de ensaios de laboratório. O levantamento de dados foi baseado na metodologia de classificação escolhida para o estudo, o sistema RMR.

- A descrição dos afloramentos de campo permitiu um reconhecimento geral da área, com a descrição da litologia, do grau de alteração e das famílias de fraturas. A aplicação do sistema RMR nos afloramentos foi feita de forma parcial, classificando apenas os parâmetros que podem refletir características do interior do maciço. As informações referentes ao fraturamento do maciço (espaçamento, persistência, abertura, preenchimento e orientação) são as que foram consideradas devido à continuidade espacial.

- A classificação do maciço rochoso foi realizada sobre os testemunhos de sondagens rotativas. Para a descrição dos parâmetros solicitados pelo sistema RMR o boletim de descrição das sondagens foi reformulado, de modo a incluir campos para a representação dos parâmetros, e para a representação do resultado da classificação. Para os parâmetros que são representados por intervalos de valores, como é o caso do RQD/IQR, do espaçamento e da própria classificação RMR, foram utilizadas escalas de cores de forma a tornar visual a variação das classes. Esta forma de representação dos parâmetros, com a aplicação da classificação diretamente no boletim de sondagem, permitiu que a descrição pudesse ser feita de forma detalhada e que a classificação fosse feita de forma segmentada, baseada na variação dos parâmetros.

- A resistência da rocha intacta foi determinada através de ensaios de carga puntual, para os diferentes graus de alteração da rocha encontrados. O ensaio permitiu estabelecer de forma clara faixas de resistência da rocha para cada grau de alteração, permitindo a utilização do parâmetro 'grau de alteração' como parâmetro auxiliar na determinação da resistência ao longo da sondagem.

- A utilização do IQR no lugar do RQD permitiu uma melhor sensibilidade da classificação ao longo da sondagem, uma vez que considera trechos de fraturamento homogêneos, enquanto o RQD é baseado no comprimento da manobra, o que pode causar a homogeneização das informações. O cálculo do RQD utilizou sondagens em um diâmetro menor que o recomendado, visando o aproveitamento dos dados disponíveis, entretanto, recomenda-se que as sondagens sejam realizadas no diâmetro mínimo NW.

- A comparação da classificação RMR aplicada no modelo segmentado, que foi realizado com as alterações propostas, com a aplicada no modelo por comprimento de manobras, mostra que as alterações propostas neste estudo aumentam a sensibilidade da classificação às variações dos parâmetros.

- A integração nas seções tipo da classificação RMR das sondagens com os dados de afloramento de campo, resultou na compartimentação final do maciço rochoso. A integração foi realizada comparando-se os pesos dos parâmetros classificados nos afloramentos com os classificados nas sondagens, prevalecendo o de valor mais baixo por caracterizar a condição menos favorável do maciço. Os pontos de campo e as sondagens foram relacionados de acordo com a proximidade entre eles.

- Os compartimentos definidos neste estudo correspondem às classes de maciço encontradas na classificação pelo Sistema RMR, sendo elas no total 5, 'muito bom', 'bom', 'regular', 'pobre' e 'muito pobre', das quais apenas a classe 'muito pobre' não foi encontrada.

- O cálculo de parâmetros geomecânicos não foi o objetivo principal desta pesquisa, tendo sido feito de forma expedita apenas para ilustrar as possibilidades da aplicação do sistema RMR. Para a aplicação destes parâmetros no projeto recomenda-se a realização de ensaios para a checagem dos resultados, salientando que os valores obtidos nos cálculos apresentados são estimados.

- O cálculo dos parâmetros geomecânicos para os compartimentos encontrados mostra certa discordância dos valores sugeridos pelo sistema RMR para cada classe, com exceção do tempo de auto-sustentação, preferindo-se a utilização dos valores sugeridos pela classificação.

A metodologia proposta permitiu elaborar a compartimentação do maciço rochoso nas áreas das estruturas da PCH. O detalhamento obtido no estudo deve-se a elaboração da compartimentação baseada na classificação do maciço ao longo das sondagens, e não teria sido alcançado com a pré-compartimentação deste, e posterior classificação.

Os principais resultados do estudo da compartimentação na PCH Morro Grande são:

- Entre as cotas 642 e 647m ocorre uma zona de fraturamento sub-horizontal intenso, marcado por um espaçamento entre 5 e 15 cm, onde a classificação pelo sistema RMR indica a classe 'regular' para o compartimento.
- O maciço de fundação da barragem encontra-se principalmente sobre um compartimento de classe 'bom', com a presença do compartimento de classe 'regular' acima da cota 642m, e classes 'regular' e 'pobre' nas porções superficiais, relacionadas ao avanço da capa de alteração.
- Na região do canal adutor, as escavações concentram-se sobre um compartimento de classe 'regular', e pode ocorrer uma cobertura de solos indiscriminados de espessura variável.
- Na região de emboque do túnel predominam compartimentos de classes 'regular' e 'bom'. Na primeira metade do túnel as escavações concentram-se sobre um compartimento de classe 'regular', passando na segunda metade para classes 'bom' e 'muito bom'. Na região de desemboque predominam compartimentos de classes 'regular' e 'muito bom'.
- O teto do túnel está em um compartimento de classe 'bom' com cerca de 2 metros de espessura, seguido logo acima pelo compartimento de classe 'regular' definido entre as cotas 642 e 647m.
- O maciço de fundação da casa de força encontra-se principalmente sobre um compartimento de classe 'regular', com a presença do compartimento de classe 'pobre' nas porções superficiais, relacionadas ao avanço da capa de alteração, e pode ocorrer uma cobertura de solos indiscriminados de espessura variável.

- Os valores de vão máximo de seção e tempo médio de sustentação na região do túnel são de 15m e 6 anos para os compartimentos de classe ‘muito bom’, 10m e 7 a 17 meses para os de classe ‘bom’, e 5m e 25 dias para os de classe ‘regular’.
- Os valores de módulo de deformabilidade do compartimento de classe ‘bom’ na área da barragem é de 44 GPa, e de 18 GPa para o de classe ‘regular’.

Destaca-se que os compartimentos representados com contato inferido apresentam caráter interpretativo, e as regiões onde as condições se apresentam mais críticas refletem os locais onde a realização de outras sondagens é mais necessária.

A principal dificuldade encontrada foi a pouca quantidade de dados, principalmente de sondagens rotativas, exigindo interpolações extensas entre um ponto de classificação e outro. Para este estudo, a classificação parcial dos afloramentos foi utilizada para auxiliar esta interpolação, entretanto, este método apresenta limitações, como o caráter superficial das informações. O ideal é que os projetos tenham mais sondagens rotativas, principalmente nas áreas de barramento e túnel, permitindo a elaboração de modelos mais detalhados e confiáveis do maciço rochoso.

A utilização conjunta da metodologia proposta com outros métodos de investigação do maciço rochoso, em especial os métodos geofísicos, apresenta grande potencial para melhorar a compartimentação do maciço, e é necessária em casos onde o número de sondagens é reduzido, e a distância entre elas é grande.

Destaca-se que esta pesquisa procurou desenvolver uma metodologia para o estudo da compartimentação de maciços rochosos, usando para isso as sondagens disponíveis na área, sendo que o resultado obtido tem caráter orientativo para a realização de investigações posteriores.

Por fim conclui-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados. O sistema RMR e as alterações propostas se mostraram uma ferramenta útil na elaboração da compartimentação de maciços rochosos, principalmente em maciços homogêneos, onde a pré-divisão de zonas com características uniformes é difícil. A metodologia proposta pode ser aplicada de forma rápida e a um custo baixo para os projetos de PCH.

REFERENCIAS

ABGE (1983). Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo. (tradução n. 12).

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. v. 6:4, p. 189-236.

BASU, A.; AYDIN, A. (2006). Predicting uniaxial compressive strength by point load test: significance of cone penetration. Technical note. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. v.39:5, p. 483-490.

BROOK, N. (1985). The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing. *International Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics Abstract*. v.22:2, p 61-70.

BIENIAWSKI, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Trans South African Institut of Civil Engineering*. v.15:12, p 335-344.

BIENIAWSKI, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*. v.9, p. 1-11.

BIENIAWSKI, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In: *SYMPOSIUM ON EXPLORATION FOR ROCK ENGINEERING, 1976, Johannesburg*. Proceedings. p. 97-107.

BIENIAWSKI, Z. T.; ORR, C. M. (1976). Rapid system appraisal for dam foundations by the geomechanics classification. In: *CONGRESS ON LARGE DAMS, 12., 1976, Cidade do México*. ICOLD. p. 483-501.

BIENIAWSKI, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 4., 1979, Montreux. Proceedings. ISRM, v.2, p 41-48.

BIENIAWSKI, Z. T. (1988). The rock mass rating (RMR) system (geomechanics classification) in engineering practice. KIRKALDIE, L. Rock classification systems for engineering purposes, Philadelphia. ASTM STP 984. p.17-34.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). Engineering rock mass classification – A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. Nova York, Wiley Interscience. 251p.

BRASIL (1998). Resolução nº 395, de 04 de dezembro de 1998 – Estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação de estudos de viabilidade e projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica, assim como da autorização para exploração de centrais hidrelétricas até 30 MW e dá outras providências.

CAMARGO, F. P.; LEITE, C. A. G.; BERTIN NETO, S.; MALDONADO, F.; CRUZ, P.T. (1978). Development of conceptual geomechanical models for foundations of concrete dam – approach applied to three projects. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS RELATED TO DAM FOUNDATION, 1978, Rio de Janeiro. Proceedings. ISRM/ABMS, Tema 2, p 57-78.

CARVALHO, R. M.; PAYOLLA B. L.; REZENDE, M. A. (1987). Compartimentação geomecânica das fundações das estruturas de concreto da UHE de Babaquara, Rio Xingu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987. Anais. São Paulo. ABGE. Vol. 1, p 227- 240.

CBGB, (1983). Diretrizes para a inspeção e avaliação de segurança de barragens em operação. Rio de Janeiro, 26p.

CRUZ, P. T. (1996). 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. São Paulo. Oficina de Textos. 648p.

DEERE, D. U.; DEERE, D. W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. KIRKALDIE, L. Rock classification systems for engineering purposes, Philadelphia. ASTM STP 984. p.91-101.

DOBEREINER, L.; CAMARGO, F. P.; E JÁCOMO, A. A. C. (1987). Caracterização geomecânica do maciço rochoso de fundação da UHE Cachoeira Porteira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987. Anais. São Paulo. ABGE. Vol. 1, p 181- 195.

EL-NAQA, A. (1994). Rock mass characterization of Wadi Mujib dam site, central Jordan. Engineering Geology. v. 38 p. 81-93.

FIGUEIREDO, A. L. C. (1996). Caracterização geomecânica do maciço de fundação da UHE Tijuco Alto (Rio Ribeira-SP/PR). Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GABRIELSEN, R. H. (1990). Characteristics of joints and faults. BARTON, N. e STEPHANSSON, O. Rock Joints; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK JOINTS, Proceedings. Loen, Norway. Balkema. p. 11-19.

GUIDICINI, G.; SANTOS OLIVEIRA, A. M.; PIRES DE CAMARGO, F.; KAJI, N. (1972a). Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., Anais. São Paulo. p 275 - 282.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M.; CORNIDES, A.T. (1972b). Análise do método de compressão puntiforme em fragmentos irregulares, na caracterização geotécnica preliminar de rochas. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., Anais. São Paulo. p 237-264.

GEHRING, J.G.; (1987). Aspectos Atuais na Avaliação da Segurança de Barragens em Operação. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 249p.

HOEK, E. (2000). Practical Rock Engineering. 2007 Edition. Disponível em: <<http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>> Acesso em: 01/03/2009.

IPT. (1983). Uma proposta sistemática de estudos geológico-geotécnicos para projetos de túneis. Relatório 19 173. São Paulo. 100p.

ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics. Abstract. v.15 p. 319-368.

ISRM (1985). Suggested methods for determining point load strength. International Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics. Abstract. v.22:2 p. 51-60.

KAHARMAN, S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. v. 38 p. 981-994.

KIRKALDIE, L. (1988). Rock classification systems for engineering purposes, Philadelphia. ASTM STP 984.

KIRSTEN, H. A. D. (1988). Discussion. In: KIRKALDIE, L. Rock classification systems for engineering purposes, Philadelphia. ASTM STP 984.

KOCBAY, A.; KILIC, R. (2006). Engineering geological assessment of the Obruk dam site (Corum, Turkey). Engineering Geology. v. 87 p. 141-148.

LASHKARIPOUR, G. R.; GHAFoori, M. (2002). The engineering geology of the Tabarak Abad dam. Engineering Geology. v. 66 p. 233-239.

LEINZ, V. (1949). Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras. USP. 3:5 61p.

MAGALHÃES, F. S.; CELLA, P. R. C. (1998). Estruturas dos maciços rochosos. OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S. N. A.. Geologia de Engenharia. São Paulo. ABGE. Oficina de Texto. p. 39-55.

MALAFAIA, A. L. (2007). Estudo de sistemas de classificação dos maciços rochosos da UHE Batalha. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

MARIMON, M. P. C.; AYALA, L.; MOREIRA, M. L. O. (1982). Formação Serra Geral no Sul do Brasil, rochas básicas e ácidas: sua distribuição, petrografia e litoquímica. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32, 1982, Salvador. Anais. Salvador : SBG. v. 2 p. 402-414.

MESQUITA, J. B. (2008). Maciços rochosos de projetos hidrelétricos: metodologia de classificação. Tese (Doutorado) – UNESP. Rio Claro.

MILANI E.J.; FRANÇA A.B.; SCHNEIDER R.L. (1994). Bacia do Paraná. Boletim de Geociências Petrobrás v. 8:1 p. 69-82.

MILANI E.J.; RAMOS V.A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências v. 28:4 p. 473-484.

MONTICELI, J. J. (1983). Influência da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos no projeto de fundações de barragens – fase de viabilidade. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 149p.

NIEBLE C. M.; FRANCIS F. O. (1976). Classificação de maciços rochosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., Anais. Rio de Janeiro. v. 2. p. 378-394.

OJIMA, L. M. (1982). Metodologia de classificação de maciços rochosos aplicável a túneis. São Paulo. ABGE. Síntese de tese. 100p.

ÖZSAM, A.; AKIM, M. (2002). Engineering geological assessment of the proposed Urus dam, Turkey. Engineering Geology. v. 66 p. 271-281.

PAULON, J.; MARTINS NETO, J. M. (2000). Pequenas centrais hidrelétricas – Histórico e perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2., Anais. Canela, Rio Grande do Sul. p. 267-280.

PINCUS, H. J. (1988). Opening Remarks. KIRKALDIE, L. Rock classification systems for engineering purposes, Philadelphia. ASTM STP 984.

SEN Z.; SADAGAH B. H. (2003). Modified rock mass classification system by continuous rating. Engineering Geology. v. 67 p. 269-280.

SERAFIM, J. L.; PEREIRA, J. P. (1983). Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND UNDERGROUND CONSTRUCTION. Lisboa. Proceedings. v. 1: 2, p 33-42.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. (1998). Classificação de maciços rochosos OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S. N. A.. Geologia de Engenharia. São Paulo. ABGE. Oficina de Texto. p. 15-38.

SCHNEIDER R.L.; MUHLMANN H.; TOMMASI E.; MEDEIROS R.A.; DAEMON R.F.; NOGUEIRA A.A. (1974). Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre. Anais. SBG. v. 1 p. 41-65.

SCHOBENHAUS C.; ALMEIDA CAMPOS D.; DERZE G.R.; ASMUS H.E. (1984). Geologia do Brasil. Brasília, DNPM, 501p.

SOUZA JUNIOR, N. N. (1986). Feições lito-estruturais de interesse geológico e geotécnico em maciços basálticos. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 183p.

TERZAGHI, K. (1946). Rock Defects and Loads on Tunnel Supports. PROCTOR R.V. e WHITE T.L., Rock Tunnelling with Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio.

VAZ, L. F. (1996). Grau de alteração de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8., Anais. ABGE. Rio de Janeiro. v. 1 p. 71-80.

ZALÁN P.V.; WOLF S.; ASTOLFI M.A.M.; VIERA .S.; CONCIEÇÃO J.C.J.; NETO E.V.S.; MARQUES A. (1987). Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., Anais. v.1 p.441-473.

ANEXO A

(Resultado dos ensaios de carga puntual)

SR	Amostra	Alteração	Diâmetro (mm)	p – Pressão manômetro (Kgf/cm ²)	Q - Carga calculada (KN)	Is (Índice de Carga Puntual)	F (fator de correção)	Is (50) (MPa)
SR1	1	A1	54,3	90	29,3	9,94	1,038	10,31
	2A	A1	42,1	85	27,7	15,61	0,926	14,45
	2B	A1	42,1	80	26,0	14,68	0,926	13,59
	2C	A1	42,1	76	24,7	13,94	0,926	12,90
	3A	A1/A2	42,1	61	19,8	11,17	0,926	10,34
	3B	A1/A2	42,1	56	18,2	10,24	0,926	9,48
SR2	4	A1/A2	54,3	95	30,9	10,49	1,038	10,89
	5A	A1/A2	42,1	66	21,4	12,09	0,926	11,19
	5B	A1/A2	42,1	64	20,8	11,72	0,926	10,85
	5C	A1/A2	42,1	63	20,4	11,54	0,926	10,68
	6A	A2	42,1	-	-	-	0,926	-
	6B	A2	42,1	47	15,2	8,58	0,926	7,94
	7A	A2	42,1	-	-	-	0,926	-
	7B	A2	42,1	38	12,2	6,91	0,926	6,40
	8A	A2	42,1	-	-	-	0,926	-
	8B	A2	42,1	43	13,9	7,84	0,926	7,25
	8C	A2	42,1	32	10,3	5,80	0,926	5,37
	9A	A1/A2	42,1	66	21,4	12,09	0,926	11,19
	9B	A1/A2	42,1	69	22,4	12,65	0,926	11,71
	10A	A1/A2	42,1	65	21,1	11,91	0,926	11,02
10B	A1/A2	42,1	65	21,1	11,91	0,926	11,02	
10C	A1/A2	42,1	74	24,1	13,57	0,926	12,56	
SR3	11	A1/A2	42	68	22,1	12,52	0,925	11,58
	12A	A1/A2	42,1	66	21,4	12,09	0,926	11,19
	12B	A1/A2	42,1	73	23,7	13,39	0,926	12,39
	13	A1/A2	42,1	66	21,4	12,09	0,926	11,19
	14	A3	41,7	4	1,1	0,63	0,922	0,58
SR4	15	A2	41,9	53	17,2	9,78	0,924	9,03
	16A	A1/A2	41,9	44	14,2	8,10	0,924	7,48
	16B	A1/A2	41,9	60	19,5	11,09	0,924	10,24
	17A	A1/A2	41,9	63	20,4	11,65	0,924	10,76
	17B	A1/A2	41,9	66	21,4	12,21	0,924	11,27
	18A	A1/A2	42	52	16,8	9,55	0,925	8,83
	18B	A1/A2	42	65	21,1	11,96	0,925	11,06

SR	Amostra	Alteração	Diâmetro (mm)	p – Pressão manômetro (Kgf/cm ²)	Q - Carga calculada (KN)	Is (Índice de Carga Puntual)	F (fator de correção)	Is (50) (MPa)
SR2	22A	A2	42,1	46	14,9	8,39	0,926	7,77
	22B	A2	42,1	23	7,3	4,13	0,926	3,83
	23	A2	42,1	47	15,2	8,58	0,926	7,94
	24A	A2	42,1	41	13,2	7,47	0,926	6,91
	24B	A2	42,1	27	8,6	4,87	0,926	4,51
	25	A2	42,1	26	8,3	4,69	0,926	4,34
	26	A2	42,1	35	11,3	6,36	0,926	5,88
	27	A2	42,1	31	10,0	5,62	0,926	5,20
	28A	A2	42,1	-	-	-	0,926	-
	28B	A2	42,1	38	12,2	6,91	0,926	6,40
	29	A2	42,1	34	10,9	6,17	0,926	5,71
	30A	A2	42,1	49	15,9	8,95	0,926	8,28
	30B	A2	42,1	41	13,2	7,47	0,926	6,91
	31A	A2	42,1	41	13,2	7,47	0,926	6,91
	31B	A2	42,1	35	11,3	6,36	0,926	5,88
32	A2	42,1	45	14,5	8,21	0,926	7,59	
SR4	33	A3	41,7	8	2,4	1,38	0,922	1,28
	34	A3	41,7	5	1,4	0,82	0,922	0,75
	35	A2	41,9	51	16,5	9,41	0,924	8,69
	36A	A2	41,9	55	17,8	10,15	0,924	9,38
	36B	A2	41,9	50	16,2	9,22	0,924	8,51

Para o ensaio diametral D_e é igual a D

$$Q = (0,328 \times p) - 0,2158 \quad (\text{KN})$$

$$I_s = \frac{Q}{D_e^2} \times 1000 \quad (\text{MPa})$$

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45}$$

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (\text{MPa})$$

Amostra A1	Is (50)
16A	7,48
18A	8,83
3B	9,48
16B	10,24
1	10,31
3A	10,34
5C	10,68
17A	10,76
5B	10,85
4	10,89
10A	11,02
10B	11,02
18B	11,06
5A	11,19
9A	11,19
12A	11,19
13	11,19
17B	11,27
11	11,58
9B	11,71
12B	12,39
10C	12,56
2C	12,90
2B	13,59
2A	14,45

Amostra A2	Is (50)
22B	3,83
25	4,34
24B	4,51
27	5,20
8C	5,37
29	5,71
26	5,88
31B	5,88
7B	6,40
28B	6,40
24A	6,91
30B	6,91
31A	6,91
8B	7,25
32	7,59
22A	7,77
6B	7,94
23	7,94
30A	8,28
36B	8,51
35	8,69
15	9,03
36A	9,38

Amostra A3	Is (50)
14	0,58
33	1,28
34	0,75

MÉDIA

(Excluindo os dois valores maiores e menores)

A1	11,13
A2	6,74
A3	0,87

ANEXO B

(Planilhas do cálculo da ação da água subterrânea)

SR1
 solo=1,4m
 NA=634m

$\rho_{\text{água}} = 1$
 $\rho_{\text{solo}} = 1,8$
 $\rho_{\text{rocha}} = 2,7$

Profundidade	Cota	Espessura de solo	Espessura de rocha	Coluna d'água	<u>Págua</u> (Psolo+Procha)	NOTA
2	638	1,4	0,6	0	0,00	15
4	636	1,4	2,6	0	0,00	15
6	634	1,4	4,6	0	0,00	15
7	633	1,4	5,6	1	0,06	10
8	632	1,4	6,6	2	0,10	10
9	631	1,4	7,6	3	0,13	7
10	630	1,4	8,6	4	0,16	7
11	629	1,4	9,6	5	0,18	7
12	628	1,4	10,6	6	0,19	7
13	627	1,4	11,6	7	0,21	4

SR2
 solo=0,0m
 NA=630m

$\rho_{\text{água}} = 1$
 $\rho_{\text{solo}} = 1,8$
 $\rho_{\text{rocha}} = 2,7$

Profundidade	Cota	Espessura de solo	Espessura de rocha	Coluna d'água	<u>Págua</u> (Psolo+Procha)	NOTA
10	660	0	10	0	0,00	15
20	650	0	20	0	0,00	15
30	640	0	30	0	0,00	15
40	630	0	40	0	0,00	15
41	629	0	41	1	0,01	10

SR3
 solo=7,7m
 NA=abaixo de 627m

$\rho_{\text{água}} = 1$
 $\rho_{\text{solo}} = 1,8$
 $\rho_{\text{rocha}} = 2,7$

Profundidade	Cota	Espessura de solo	Espessura de rocha	Coluna d'água	<u>Págua</u> (Psolo+Procha)	NOTA
5	645	5	0	0	0,00	15
10	640	7,7	2,3	0	0,00	15
15	635	7,7	7,3	0	0,00	15
20	630	7,7	12,3	0	0,00	15
23	627	7,7	15,3	0	0,00	15

SR4
 solo=2,5m
 NA=6,9m

$\rho_{\text{água}} = 1$
 $\rho_{\text{solo}} = 1,8$
 $\rho_{\text{rocha}} = 2,7$

Profundidade	Cota	Espessura de solo	Espessura de rocha	Coluna d'água	<u>Págua</u> (Psolo+Procha)	NOTA
1	591	1	0	0	0,00	15
2	590	2	0	0	0,00	15
3	589	2,5	0,5	0	0,00	15
4	588	2,5	1,5	0	0,00	15
5	587	2,5	2,5	0	0,00	15
6	586	2,5	3,5	0	0,00	15
7	585	2,5	4,5	0,1	0,01	10
8	584	2,5	5,5	1,1	0,06	10
9	583	2,5	6,5	2,1	0,10	10
10	582	2,5	7,5	3,1	0,13	7
11	581	2,5	8,5	4,1	0,15	7
12	580	2,5	9,5	5,1	0,17	7
13	579	2,5	10,5	6,1	0,19	7
14	578	2,5	11,5	7,1	0,20	7
15	577	2,5	12,5	8,1	0,21	4
16	576	2,5	13,5	9,1	0,22	4
17	575	2,5	14,5	10,1	0,23	4
18	574	2,5	15,5	11,1	0,24	4
19	573	2,5	16,5	12,1	0,25	4
20	572	2,5	17,5	13,1	0,25	4
21	571	2,5	18,5	14,1	0,26	4
22	570	2,5	19,5	15,1	0,26	4
23	569	2,5	20,5	16,1	0,27	4

ANEXO C

(Planilhas de aplicação da classificação)

SR1											
Segmento	Resistência	RQD	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Alteração	Água	Direção	RMR
1	1	5	5	2	1	3	6	1	15	-7	32
2	12	5	5	2	1	3	6	1	15	-7	43
3	15	17	8	2	4	3	6	5	15	-7	68
4	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-7	69
5	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-7	69
6	15	20	15	2	5	3	6	5	15	-7	79
7	15	20	15	2	5	3	6	5	10	-7	74
8	15	20	20	2	5	3	6	5	7	-7	76
9	15	20	15	2	5	3	6	5	7	-7	71
10	15	20	15	2	5	3	6	5	4	-7	68

SR3											
Segmento	Resistência	RQD	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Alteração	Água	Direção	RMR
1	12	5	5	2	1	5	2	3	15	-5	45
2	15	20	10	2	5	5	6	5	15	-5	78
3	15	20	15	2	5	5	6	5	15	-5	83
4	15	20	15	2	5	5	6	5	15	-5	83
5	15	17	10	2	5	5	6	5	15	-5	75
6	15	20	15	2	5	5	6	5	15	-5	83
7	15	20	15	2	5	5	6	5	15	-5	83
8	15	17	10	2	5	5	6	5	15	-5	75
9	15	20	15	2	5	5	6	5	15	-5	83

SR4											
Segmento	Resistência	RQD	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Alteração	Água	Direção	RMR
1	1	5	5	2	1	1	2	1	15	-7	26
2	1	5	5	2	4	1	2	1	15	-7	29
3	1	5	5	2	4	1	2	1	15	-7	29
4	12	5	8	2	4	1	2	1	15	-7	43
5	12	5	8	2	4	1	2	3	15	-7	45
6	12	13	8	2	4	1	2	3	15	-7	53
7	15	13	10	2	4	1	2	3	15	-7	58
8	15	13	8	2	4	1	2	3	15	-7	56
9	15	13	8	2	4	1	2	3	10	-7	51
10	15	13	8	2	4	1	2	3	10	-7	51
11	15	13	8	2	4	1	2	3	10	-7	51
12	15	13	8	2	4	1	2	3	7	-7	48
13	15	13	8	2	4	1	2	3	7	-7	48
14	15	17	8	2	4	1	2	3	7	-7	52
15	15	17	10	2	4	1	2	3	4	-7	51
16	15	17	8	2	4	1	2	3	4	-7	49
17	15	20	10	2	4	1	2	3	4	-7	54

SR2											
Segmento	Resistência	RQD	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Alteração	Água	Direção	RMR
1	15	17	8	2	4	1	2	5	15	-5	64
2	15	20	10	2	4	1	2	5	15	-5	69
3	15	8	8	2	4	1	2	5	15	-5	55
4	15	20	10	2	4	1	2	5	15	-5	69
5	15	13	8	2	4	1	2	5	15	-5	60
6	15	20	10	2	5	1	2	5	15	-5	70
7	15	17	10	2	5	3	6	5	15	-5	73
8	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-5	71
9	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-5	71
10	15	20	8	2	5	3	6	5	15	-5	74
11	15	13	8	2	5	3	6	5	15	-5	67
12	15	20	15	2	5	3	6	5	15	-5	81
13	15	13	8	2	5	3	6	5	15	-5	67
14	15	20	20	2	5	3	6	5	15	-5	86
15	15	17	10	2	5	3	6	5	15	-5	73
16	15	20	10	2	5	3	6	5	15	-5	76
17	15	17	10	2	5	3	6	5	15	-5	73
18	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-5	71
19	15	17	8	2	4	3	6	5	15	-5	70
20	15	17	8	2	4	1	2	0	15	-5	59
21	12	17	8	2	4	1	2	0	15	-5	56
22	12	13	8	2	4	1	2	0	15	-5	52
23	15	20	10	2	4	3	2	3	15	-5	69
24	15	13	10	2	4	3	2	3	15	-5	62
25	15	20	10	2	4	3	2	3	15	-5	69
26	15	13	8	2	4	3	2	3	15	-5	60
27	15	13	8	2	4	1	2	3	15	-5	58
28	15	13	8	2	4	1	2	3	15	-5	58
29	15	20	8	2	4	3	2	3	15	-5	67
30	15	17	8	2	4	3	2	3	15	-5	64
31	15	17	8	2	5	3	2	3	15	-5	65
32	15	20	10	2	5	3	2	3	15	-5	70
33	15	17	10	2	5	3	2	3	15	-5	67
34	15	17	8	2	5	3	2	3	15	-5	65
35	15	17	8	2	5	3	2	3	10	-5	60

SR1											
MANOBRA	Resistência	RQD	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento	Alteração	Água	Direção	RMR
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2	15	8	8	2	4	3	6	5	15	-7	59
3	15	17	10	2	5	3	6	5	15	-7	71
4	15	20	15	2	5	3	6	5	10	-7	74
5	15	20	15	2	5	3	6	5	7	-7	71

SR2											
1	15	17	8	2	4	1	2	5	15	-5	64
2	15	17	8	2	4	1	2	5	15	-5	64
3	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-5	71
4	15	17	8	2	5	3	6	5	15	-5	71
5	15	17	10	2	5	3	6	5	15	-5	73
6	15	20	10	2	5	3	6	5	15	-5	76
7	15	17	10	2	5	3	6	5	15	-5	73
8	15	13	8	2	4	1	2	0	15	-5	55
9	15	13	8	2	4	1	2	0	15	-5	55
10	15	17	8	2	4	3	2	3	15	-5	64
11	15	17	8	2	4	3	2	3	15	-5	64
12	15	17	10	2	5	3	2	3	15	-5	67
13	15	20	8	2	5	3	2	3	10	-5	63

SR3											
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2	15	17	8	2	5	5	6	5	15	-5	73
3	15	20	10	2	5	5	6	5	15	-5	78
4	15	20	10	2	5	5	6	5	15	-5	78
5	15	20	10	2	5	5	6	5	15	-5	78
6	15	20	10	2	5	5	6	5	15	-5	78

SR4											
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2	15	5	5	2	1	1	2	1	15	-7	40
3	15	8	8	2	4	1	2	1	15	-7	49
4	15	13	8	2	4	1	2	3	10	-7	51
5	15	13	8	2	4	1	2	3	7	-7	48
6	15	17	8	2	4	1	2	3	7	-7	52
7	15	17	8	2	4	1	2	3	4	-7	49
8	15	20	10	2	4	1	2	3	4	-7	54