UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E COMPARTIMENTAÇÃO GEOLÓGICA E
GEOMECÂNICA DE MACIÇO BASÁLTICO HETEROGÊNEO, APLICADOS A
ENGENHARIA**

Manolo Morales Melo

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO
2010

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador Marcos Egydio pela paciência e disposição durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

À Comissão de Pós-Graduação do Instituto de Geociências.

Aos funcionários do Instituto de Geociências, em especial, aos da biblioteca pela paciência e pela presteza.

À CNEC Projetos de Engenharia, à equipe profissional e aos demais colaboradores por terem me incentivado e apoiado durante a realização desta pesquisa. Em especial, ao Geólogo Martim Afonso Camargo pelas idéias, pelas conversas, pela confiança, pela amizade que se desenvolveu ao longo destes anos de convivência – que são de fundamental importância para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos colegas e aos amigos geólogos que me acompanham desde o meu início na carreira.

Aos meus pais, Rita Izabel e Giovani, e aos meus irmãos, Estevam e Jonas, por estarem cada um à sua maneira ao meu lado e à minha sobrinha Sophya por alegrar minhas tardes.

Em especial, gostaria de agradecer minha saudosa avó Divina, responsável por tudo que sou.

RESUMO

Nesta dissertação, são apresentados os processos de caracterização, classificação e de compartimentação geomecânica dos maciços rochosos, com a utilização dos dados pertinentes às fases de estudos nos projetos de engenharia. Como área de pesquisa analisou-se os dados referentes aos estudos da fundação da barragem, de uma Usina Hidroelétrica, localizada no Rio Pelotas, entre os estados do Rio Grande do Sul (Margem esquerda) e Santa Catarina (Margem Direita) em um sítio constituído por uma seqüência de derrames basálticos da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná. Este maciço revela-se verticalmente heterogêneo, constituído por uma seqüência de 15 (quinze) derrames (relativamente pouco espessos) que possuem distintas características tanto sobre os aspectos geomecânicos, estruturais e tectônicos; quanto da diferenciação litológica de cada um – que compreende a seqüência de basalto denso, basalto vesículo amigdaloidal e brecha basáltica. O intuito da pesquisa foi mostrar a caracterização do maciço abrangendo aspectos estratigráficos, litológicos, estruturais, tectônicos e geomecânicos, para que fosse possível a formulação da compartimentação e dos modelos geológicos e geomecânicos do maciço. Na composição da base de dados foi realizado um levantamento de campo por meio de investigações de superfície e subsuperfície, para que posteriormente fossem realizados os trabalhos de gabinete e as análises laboratoriais. Para o estabelecimento do modelo geológico orientou-se pelos dados litoestratigráficos, estruturais e tectônicos obtidos através dos mapeamentos de superfície e das investigações de subsuperfície. A compartimentação geomecânica foi composta por informações oriundas dos itens de caracterização do maciço (alteração, fraturamento, “*Rock quality designation*” – “RQD”, e permeabilidade); e pela classificação geomecânica, quanto a esta, empregaram-se as metodologias “*Rock Mass Rating*” – “RMR”, “*Quality*” – “Q” e “*Geological Strength Index*” – “GSI”. O propósito dessa classificação visava estabelecer um paralelo entre os parâmetros metodológicos utilizados e os resultados obtidos – em que se notou uma grande dependência da compartimentação geomecânica ao modelo geológico.

Palavras chave: Caracterização, Classificação e Compartimentação.

ABSTRACT

In this dissertation, the processes of characterization, classification and geomechanical compartmentation of the rocky mass range are investigated with the utilization of data resulting from the study phases in engineering projects. As a research area, the data referring to the studies of the foundation of a hydroelectric power plant dam, located on Rio Pelotas, between the states of Rio Grande do Sul (left bank) and Santa Catarina (right bank) on a site formed by a sequence of basaltic flood of Serra Geral formation at the Paraná Basin have been analyzed. This rock mass range, vertically heterogeneous, is formed by a sequence of 15 (fifteen) floods (relatively little solid) which possess distinct characteristics on the geomechanical, structural and tectonic aspects, as well as on the lithological differentiation of each one – which includes the sequence of dense basalt, vesicles-amygdaloidal basalt and basaltic breach. The intention of the research was to show the characterization of the mass range, embracing stratigraphic, lithological, structural, tectonic and geomechanical aspects, so that it would be possible the formulation of the compartmentation and geological and geomechanical models of the mass range. In the database composition, a field survey was carried out through surface and subsurface investigations, so that afterwards the laboratorial analysis could be accomplished. For the establishment of the geological model, the lithostratigraphic, structural and tectonic data have been examined, which have been obtained through the mapping of the surface and subsurface investigations. The geomechanical compartmentation was put together by the information resulting from the characterization items of the mountain range (alteration, fracture, Rock quality designation – “RQD” and permeability); and by the geomechanical classification; for that matter, the Rock Mass Rating – “RMR”, Quality – “Q” and Geological Strength Index – “GSI” methodologies have been employed. The purpose of this classification was to establish a parallel between the methodological parameters used and the results obtained – where a large dependence of the geomechanical compartmentation on the geological model had been observed.

Keywords: Characterization, Classification and Compartmentation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. MATERIAIS E MÉTODOS	4
2. FASES DE PROJETO	7
2.1. INVENTÁRIO	7
2.2. VIABILIDADE	8
2.3. PROJETO BÁSICO.....	9
2.4. PROJETO EXECUTIVO	10
3. CARACTERIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO, COMPARTIMENTAÇÃO E MODELOS DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	11
3.1. INTRODUÇÃO	11
3.2. CARACTERIZAÇÃO	11
3.2.1. Obtenção dos Dados	12
3.2.2. Descrição Geológico-Geotécnica.....	26
3.3. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	40
3.3.1. Barton – “Quality” - “Q”	44
3.3.2. Bieniawski – “Rock Mass Classification” - “RMR”	48
3.3.3. Hoek & Brown - “Geological Strength Index” - “GSI”	52
3.3.4. Correlações entre os Sistemas “RMR”, “Q” e “GSI”	56
3.4. COMPARTIMENTAÇÃO E MODELAMENTO GEOLÓGICO - GEOMECÂNICO.....	61
4. ÁREA DE ESTUDO	65
4.1. ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	65
4.1.1. Geomorfológicos	65
4.1.2. Geológicos	67
4.2. ASPECTOS LOCAIS	72
4.2.1. Investigações de Subsuperfície Realizados.....	72
4.2.2. Aspectos Geológicos Locais.....	73
4.2.3. Aspectos Estruturais.....	77
4.2.4. Aspectos Geomecânicos.....	93
4.3. ENSAIOS “IN SITU”	104
4.4. ESTUDOS LABORATORIAIS	109

4.4.1. Estudos Petrográficos	109
4.4.2. Ensaios Geomecânicos	112
4.5. CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO.....	121
4.5.1. Classificação de Barton (Índice “Q”)	122
4.5.2. Classificação de Bieniawski (Índice “RMR”)	127
4.5.3. Classificação de Hoek e Brown (Índice “GSI”).....	130
4.5.4. Comparação dos resultados obtidos com os três métodos de classificação	134
4. COMPARTIMENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	139
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
6. SUGESTÕES	147
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
ANEXO	i

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimento para o estabelecimento da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochoso em fundações de barragens (Monticeli, 1983).....	11
Figura 2 – Galeria realizada sob a fundação de uma barragem, com o intuito de identificação possíveis estruturas que possam interferir na estabilidade do maciço.	15
Figura 3 – Equipamento para o ensaio de fraturamento hidráulico (Hainson, 1989).	19
Figura 4 – Esquema ilustrando o comportamento físico e mecânico das rochas, como resultado da interação entre os de aspectos petrográficos definidos pela mineralogia, textura e estrutura (modificado de Navarro, 2002).	27
Figura 5 – Obtenção de dados geométricos/geográficos das discontinuidades.....	28
Figura 6 – Tipos de espaçamentos: (a) espaçamento total; (b) espaçamento de uma família de fraturas; (c) espaçamento ao longo da normal da família de fraturas.	31
Figura 7 – Representações simples e blocos diagramas para exemplificar a continuidade relativa das famílias das discontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).....	32

Figura 8 – Abertura de uma fratura (Telles et al., 2005).	32
Figura 9 – Representação esquemática dos tipos de abertura das descontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).	33
Figura 10 – Representação dos perfis de rugosidade (modificado de Barton et al., 1978).	34
Figura 11 – Exemplo de obtenção do “RQD” (modificado de Deere & Deere, 1988).	39
Figura 12 – Valores de “RQD” idêntico para casos diferentes (Deere, 1989).	40
Figura 13 – Imagem de Satélite da área afetada pelo empreendimento (Embrapa)	65
Figura 14 – Imagem de Satélite do local de implantação do eixo (Google 2009).	67
Figura 15 – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, (Bellieni et al., 1986; Nardy et al., 2001).	68
Figura 16 – Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná destacando a acumulação de sedimentos ao longo de sua evolução (Extraído de Milani, 1997).	69
Figura 17 – Mapa geológico da ocorrência do Serra Geral nos estados do sul do Brasil (CPRM, 2003).	71
Figura 18 – Planta com a distribuição das investigações realizadas (separadas por cor de acordo com a campanha).	75
Figura 19 – Figura do modelo geológico da região da barragem com as investigações realizadas (separado os derrames).	76
Figura 20 – Influência do efeito escala na adoção do critério de ruptura e da metodologia de estudo de um maciço rochoso (modificado de Hoek & Brown, 1998).	78
Figura 21 – Distribuição das sondagens ao longo do perfil da barragem	94
Figura 22 – Modelo de distribuição do grau de alteração ao longo da seção da barragem	96
Figura 23 – Modelo de distribuição do grau de fraturamento ao longo da seção da barragem	99
Figura 24 – Modelo de distribuição do índice “RQD” ao longo da seção da barragem	102
Figura 25 - Modelo de distribuição da permeabilidade ao longo da seção da barragem	107

Figura 26 – Modelo com a distribuição da classificação eomecânica “Q” ao longo da seção da barragem.....	125
Figura 27 – Modelo com distribuição da classificação geomecânica “RMR” ao longo da seção da barragem.....	128
Figura 28 – Modelo com a distribuição da classificação geomecânica “GSI” ao longo da seção da barragem.....	132

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1 – Equipamento de sondagem a percussão.....	14
Foto 2 – Equipamento de sondagem rotativa.....	14
Foto 3 – Ensaio de infiltração (coluna de revestimento a 1 m do terreno) – Realizada no trecho em solo.....	16
Foto 4 – Ensaio perda d’água (manômetro à esquerda e hidrômetro à direita) – Realizada no trecho em rocha.....	16
Foto 5 – Ensaio de resistência a penetração (martelo de Schmidt).....	20
Foto 6 – Pesagem das amostras saturadas submersas.....	21
Foto 7 – Laboratório – Sistema para ensaio uniaxial (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).....	22
Foto 8 – Laboratório – Sistema para Ensaio Uniaxial - Instrumentação utilizada para medida da deformação axial nos ensaios de compressão uniaxial (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).	22
Foto 9 – Equipamento para ensaios de tração indireta – Carga Pontual (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).....	24
Foto 10 – Proteção dos testemunhos para execução do ensaio (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).	25
Foto 11 – Câmera triaxial (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).....	25

Foto 12 – Lâmina metálica em cinzel acoplado com as hastes sendo inserido no furo de sondagem...	29
Foto 13 – Haste centralizada, direcionada com a ponteira para receber o golpe de marreta.....	29
Foto 14 – Testemunho marcado pela lâmina metálica em cinzel.....	29
Foto 15 – Prolongamento no testemunho da “marca” deixada pela Lâmina metálica em cinzel.....	29
Foto 16 – Câmera de imageamento digital - Componente de leituras das paredes do furo de sondagem (www.alfageos.com.br).....	30
Foto 17 – Imagem típica do relevo próximo as grandes drenagens (vista da porção inferior).....	66
Foto 18 – Imagem típica do relevo próximo as grandes drenagens (vista da porção superior).....	66
Foto 19 – Vista do vale do rio Pelotas - Local do estudo (montante para jusante na esquerda e topo da ombreira esquerda na direita).....	66
Foto 20 – Amostra de basalto em testemunhos de sondagem.....	73
Foto 21 – Amostra de riodacido em testemunhos de sondagem.....	73
Foto 22 – Amostra de brecha com pouca porção terrosa em testemunhos de sondagem.....	74
Foto 23 – Amostra de brecha com aspecto terroso argila em testemunhos de sondagem.....	74
Foto 24 – Amostra de vesiculo-amigdaloidal em testemunhos de sondagem.....	74
Foto 25 – Amostra de basalto com vesículas e amígdalas maiores que 5 cm em testemunhos de sondagem.....	74
Foto 26 – Amostra de rocha basáltica interceptada por pequena apófice de diabásio com 4,0 cm no derrame M, abaixo do leito do rio - em testemunhos de sondagem.....	77
Foto 27 – Equipamentos utilizados para medição das fraturas nos testemunhos de sondagem.....	79
Foto 28 – Amostra de testemunhos de sondagem com disqueamento (“Core discing”)......	87
Foto 29 – Falha (plano estriado) apresentando estria de atrito e ressaltos que indicam o movimento relativo transcorrentes sinistral (movimento lateral para esquerda).....	88

Foto 30 – Maciço rochoso apresentando a família de juntas principal (N44°/88°NW) com espaçamento centimétricas entre planos.	89
Foto 31 – Maciço rochoso apresentando planos da família regional principal com persistências decamétricas. Notar traços de juntas subhorizontais.....	89
Foto 32 – Zona de falha subvertical N50°/82°NW	90
Foto 33 – Zona de falha subvertical N48°/88°SE.....	90
Foto 34 – À esquerda observa-se, no centro da lâmina, feldspato alcalino, associado plagioclásio em contato irregular. À direita matriz com “vidro amorfo” – Manchas escuras.....	109
Foto 35 – À esquerda matriz com argila disseminada. À direita amígdala preenchida por argila castanha.	110
Foto 36 – Foto em lupa onde se observa à esquerda a presença de amígdalas preenchidas por zeólitas na borda com sílica no centro e pouca argila. À direita observam-se amígdalas preenchidas argilas do grupo das esmectitas, com zeólitas de cor branca no centro na matriz observa-se a presença de argila escura.	110
Foto 37 – No lado esquerdo trata-se de um argilomineral, esse material ocorrem em amígdalas e entre os interstícios de plagioclásio. À direita preenchendo as amígdalas observa-se um filossilicatos de cor verde (clorita), associado a um argilo mineral de coloração esverdeada (esmectitas).	111
Foto 38 – À esquerda observa-se o aspecto geral da lâmina onde os minerais ripiformes são formados por plagioclásios. À direita observa-se a presença de um veio preenchida por quartzo.	111
Foto 39 – À esquerda dois grandes cristais um de piroxênio e um de plagioclásio, em meio à matriz mais fina. À direita uma maior concentração de material vítreo desvitrificado.....	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de medição das tensões virgens do maciço (modificado de Mafra, 2001).....	18
Tabela 2 – Classificação de rochas em função da resistência uniaxial (modificado de ISRM, 1981)...23	
Tabela 3 – Espaçamento de descontinuidades (ABGE, 1983).....	31
Tabela 4 – Persistência das descontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).	32

Tabela 5 – Tipos de contato das descontinuidades (modificado de Oliveira,1986).	33
Tabela 6 – Grau de alteração para basaltos, metassedimentos, granitos e gnaisses (Camargo et al., 1976).	36
Tabela 7 – Graus de coerência (Guidicini, & Nieble, 1984).	36
Tabela 8 – Graus de fraturamento (modificado de Oliveira, 1986).	37
Tabela 9 – Perda d'água específica (ABGE, 1999).....	38
Tabela 10 – Designação da qualidade (“RQD”) de acordo com o Sistema “Q” (Barton, 1974).	39
Tabela 11 – Parâmetros adotados para a obtenção do índice de qualidade do sistema “Q” (Barton, 1974).	44
Tabela 12 – Índice das famílias de juntas “Jn” - sistema “Q” (Barton, 1974).	45
Tabela 13 – Índice de rugosidade das juntas “Jr” - sistema “Q” (Barton, 1974).	45
Tabela 14 – Grau de alteração das descontinuidades “Ja” - sistema “Q” (Barton, 1974)	46
Tabela 15 – Índice de percolação das juntas “Jw” - sistema “Q” (Barton, 1974).	46
Tabela 16 – Fator de redução de tensões “SRF” - sistema “Q” (Barton, 1974).	47
Tabela 17 – Índice de segurança “ESR” - Sistema “Q” (Barton, 1974).	48
Tabela 18 – Categoria do maciço rochoso- Sistema “Q” (modificado de Barton, 1974).	48
Tabela 19 – Classificação geomecânica de Bieniawski - “RMR” (Bieniawski, 1989)	50
Tabela 20 – Classificação das condições das descontinuidades - “RMR” (Bieniawski, 1989).	50
Tabela 21 – Classificação geométrica das descontinuidades - “RMR” (Bieniawski, 1989).	51
Tabela 22 – Classe do Maciço - “RMR” (Bieniawski, 1989).	51
Tabela 23 – Parâmetros geomecânicos do maciço “RMR” (Bieniawski, 1989)	51
Tabela 24 – Classificação “GSI” – “Geological Strength Index” (modificado de Hoek et al., 2002)...	54

Tabela 25 – Classificação “GST” – “Geological Strength Index” – (modificado de Hoek et al., 2002).	55
Tabela 26 – Valores típicos de das constantes do material (Hoek et al., 2002).	59
Tabela 27 – Cotas médias de ocorrência dos derrames no sítio.....	73
Tabela 28 – Estereogramas das descontinuidades do derrame C.....	84
Tabela 29 – Algumas correlações entre as atitudes e as características das juntas neste derrame.....	85
Tabela 30 – Planos preferenciais das descontinuidades levantadas para cada derrame.....	85
Tabela 31 - Amostra e gráfico da amostra 3.	119
Tabela 32 – Amostra e gráfico da amostra 4.....	120
Tabela 33 – Resumo dos ensaios	120

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histograma das localizações das atitudes distribuídas por margem.	79
Gráfico 2 – Histograma das quantidades de medidas por litologia.....	79
Gráfico 3 – Histograma das texturas das descontinuidades	79
Gráfico 4 – Histograma do tipo de alteração nas juntas.....	79
Gráfico 5 – Histograma da ocorrência das descontinuidades de acordo com a profundidade.....	80
Gráfico 6 – Histograma com a distribuição dos mergulhos	80
Gráfico 7 – Histograma das direções predominantes no levantamento	81
Gráfico 8 – Estereograma das direções predominantes no levantamento	81
Gráfico 9 – Estereograma das descontinuidades rugosas alteradas ou com traços de alteração	82
Gráfico 10 – Estereograma de juntas lisas, com paredes sãs.	82
Gráfico 11 – Estereograma de juntas rugosas, com paredes sãs.	83

Gráfico 12 – Algumas correlações entre as atitudes e as características das juntas neste derrame.	85
Gráfico 13 – Planos preferenciais das descontinuidades levantadas para cada derrame e o fluxo do rio.	86
Gráfico 14 – Estereograma com as medidas obtidas na região do eixo.....	89
Gráfico 15 – Estereograma com as medidas obtidas	90
Gráfico 16 – Estereograma com as medidas obtidas nos planos de cisalhamento.	91
Gráfico 17 – Estereograma de pólos de plano de movimento (método de Arthaud), definindo uma concentração e uma guirlanda de distribuição de pólos.....	91
Gráfico 18 – Projeção ciclográfica das falhas transcorrentes levantadas	92
Gráfico 19 – Método de Arthaud com as indicações dos eixos de tensão/deformação.	92
Gráfico 20 – Estereograma do método dos “Diedros Retos”, com a indicação de σ_1 e σ_3	93
Gráfico 21 – Grau de alteração separada pela porcentagem de ocorrência nas litologia.....	97
Gráfico 22 – Grau de alteração separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.	98
Gráfico 23 – Grau de Fraturamento separados pela porcentagem de ocorrência nas litologias.	100
Gráfico 24 – Grau de fraturamento separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.	101
Gráfico 25 – “RQD” separados porcentagem de ocorrência nas litologias.	103
Gráfico 26 – “RQD” separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.	104
Gráfico 27 – Condutividade hidráulica separados pela porcentagem de ocorrência nas litologias.	106
Gráfico 28 – Condutividade hidráulica separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.	108
Gráfico 29 – Associação da porosidade aparente de acordo com a concentração de vesículas e amígdalas.	113
Gráfico 30 – Associação da absorção de água, de acordo com a concentração de vesículas e amígdalas.	114
Gráfico 31 – Associação da massa específica seca concentração de vesículas e amígdalas.	115

Gráfico 32 – Associação da massa específica saturada com concentração de vesículas e amígdalas. ...	115
Gráfico 33 - Resistência a compressão uniaxial das amostras de acordo com a porcentagem de vesículas e amígdalas (sendo as Brechas colocadas no extremo do gráfico) – dados do gráfico no anexo – quadro 9.	115
Gráfico 34 – Módulo de elasticidade das amostras de basalto e brecha basáltica.	116
Gráfico 35 – Módulo de elasticidade versus resistência a compressão uniaxial das amostras de rocha.	117
Gráfico 36 – Resistência a tração em amostras de acordo como a porcentagem de vesículas e amígdalas (sendo as brechas colocadas no extremo do gráfico).	117
Gráfico 37 – Resistência a tração versus resistência a compressão simples.	118
Gráfico 38 – Círculos de Mohr representativos dos estados de tensões na ruptura para os ensaios (uniaxiais e triaxiais) nas amostras de basalto vesículo-amigdaloidal (resultados no Quadro 10 - anexo)	118
Gráfico 39 – Círculos de Mohr representativos dos estados de tensões na ruptura para os ensaios (uniaxiais e triaxiais) nas amostras de basalto denso (resultados no Quadro 10 - anexo).....	119
Gráfico 40 – Distribuição das qualidades do maciço (“Q”) de acordo com da porcentagem investigada.	123
Gráfico 41 – Valores de “Q” obtidos no maciço de acordo com a concentração em espessura investigada individualizado pelos tipos de rocha.....	123
Gráfico 42 – Classificação do maciço pelo sistema “Q” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre as litologias que ocorrem no sítio estudado.....	124
Gráfico 43 – Classificação do maciço pelo sistema “Q” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre os derrames ao longo do eixo da barragem.	126
Gráfico 44 – Comparação entre os dados de “RMR” utilizando a Tabela 21 (efeitos da orientação das descontinuidades e das estruturas) e o “RMR” considerando este com extremamente favorável.	127

Gráfico 45 – Classes do maciço no sistema “RMR” e separados entre as litologias que ocorrem no eixo estudado	129
Gráfico 46 – Classificação pelo sistema “RMR” – Separados entre os derrames ao longo do eixo da barragem.	129
Gráfico 47 – Comparação entre os dados de “GSI” utilizando as Tabelas e o “GSI” calculado utilizando os valores do “RMR” e do Q’	130
Gráfico 48 – Classificação do maciço pelo sistema “GSI” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre as litologias que ocorrem no sítio estudado.	133
Gráfico 49 – Classificação pelo sistema “GSI” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre os derrames ao longo do eixo da barragem.	133
Gráfico 50 – Classificação geomecânica do riolito em comparação com os três métodos de classificação.	134
Gráfico 51 – Classificação geomecânica do basalto em comparação com os três métodos de classificação.	135
Gráfico 52 – Classificação Geomecânica do basalto vesiculo-amigdaloidal em comparação com os métodos.	136
Gráfico 53 – Classificação geomecânica da brecha basáltica em comparação com os três métodos..	137

SIGLAS

2D -	Duas dimensões
3D -	Três dimensões
pasat -	Massa Específica Aparente Seca
ABGE -	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
BVA -	Basalto Vesículo Amigdaloidal
EM -	Eletro Magnético - Domínio do Tempo
GPR -	<i>Ground Penetration Radar</i>
GSI -	<i>Geological Strength Index</i>
ISRM -	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
K -	Permeabilidade
NW -	Diâmetro do furo de sondagem (75,69 mm furo e 54,73 mm testemunho)
P -	Porosidade Aparente
Q -	<i>Quality</i>
R -	Resistência (Schmidt)
RMR -	<i>Rock Mass Rating</i>
RQD -	<i>Rock Quality Designation</i>
S -	Absorção de água
S1 -	Valor Máximo de Tensão
S2 -	Valor Intermediário de Tensão
S3 -	Valor Mínimo de Tensão
SPT -	<i>Standard Penetration Test</i>
UHE -	Usina Hidroelétrica
USP -	Universidade de São Paulo
VLF -	Very low Frequency

UNIDADES

cm^3	- Centímetro cúbico
GPa	- Giga Pascal (pressão e tensão)
g/cm^3	- Gramas por centímetro cúbico
Km^2	- Quilometro quadrado (área)
l/min.m/kg/cm^2	- Litro por Minuto vezes Metro por Quilograma por Centímetro cúbico (medida de condutividade hidráulica);
m	- Metros (dimensão)
mm	- Milímetros (dimensão)
Mpa	- Mega Pascal (pressão e tensão)
$^{\circ}\text{C}$	- Graus Celsius (temperatura)

1. INTRODUÇÃO

A Geologia de Engenharia abrange um segmento aplicado à área das Geociências e é definida como a “ciência dedicada à investigação, estudo e solução de problemas de engenharia e meio ambiente, decorrente da interação entre geologia e as atividades humanas, bem como à previsão e o desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de acidentes geológicos” (Ruiz & Guidicini, 1998).

Com base nessas referências, aconselha-se que os estudos geológicos, geomecânicos e geotécnicos sejam programados por fases, utilizando métodos de reconhecimento progressivamente mais sofisticados e dispendiosos. Nesses estudos, cada fase de aplicação é acompanhada por um responsável que conduz o projeto de modo a esclarecer as questões relevantes e apresentar possíveis soluções e/ou adequações para os aspectos geológicos levantados.

Por serem de origem natural, os maciços freqüentemente apresentam características irregulares quanto às suas propriedades e, em alguns casos, de difícil identificação, este fator pode incorrer em conseqüências técnicas econômicas e ambientais indesejadas.

Com o intuito de evitar gastos desnecessários e impactos ambientais como os citados acima, as investigações devem passar por uma análise qualitativa criteriosa com o levantamento das diversas propriedades do maciço rochoso, sejam estas favoráveis ou desfavoráveis, objetivando integrá-los a compartimentação e aos modelos (geológico e geomecânico) que abrangem todas as características relevantes identificadas.

Nesse sentido esses estudos orientam às futuras decisões de projeto, abrindo possibilidades para novas alternativas, que sejam adequadas às mais diversas condições geológicas previstas (Oliveira & Brito, 2000).

Por este motivo, convém analisar sob diversas perspectivas todas as informações geológicas possíveis de serem determinadas para que – na fase construtiva e de operação do empreendimento – o maciço apresente uma “*performance*” que agregue aos estudos preliminares a melhor alternativa para reduzir tais fatores de incerteza.

Cabe então ao geólogo, a responsabilidade de identificar e interpretar os dados obtidos, criando assim um modelo conceitual que represente a morfologia e a classificação de cada unidade definida no maciço, com o intuito de subsidiar a execução do projeto. De modo geral, as características mais visadas, pelos estudos geológicos e geotécnicos nos maciços

rochosos estão ligadas a deformabilidade, a resistência ao corte, a permeabilidade e ao estado de tensão “*In situ*” (em especial no caso das obras hidráulicas e subterrâneas).

A formulação de um modelo geológico associado à compartimentação geomecânica é de extrema importância para a definição do “*Lay-out*” do empreendimento, sendo que este se associa aos métodos de escavação, às estimativas de tempo de auto-sustentação, aos tratamentos a serem aplicados para a estabilidade final do maciço, entre outras aplicações realizadas durante o projeto, a construção e a operação do empreendimento.

Para aproximar o projeto conceitual da realidade a ser encontrada, é necessário o cruzamento do modelo geológico com a compartimentação geomecânica do maciço utilizando-se para este fim mais de um método de classificação com o intuito de reduzir os diversos riscos interpretativos (Hoek, 2007).

O projetista deve ter a consciência quanto à possibilidade do maciço ter suas características geológicas e, por conseguinte, geomecânicas modificadas em decorrência de novos levantamentos ou do resultado dos trabalhos de implantação da obra e a obtenção de novos dados. Dessa forma, o modelo idealizado no início das investigações pode vir a sofrer substanciais modificações, exigindo-se para sua manutenção um constante controle.

1.1. JUSTIFICATIVA

A divulgação dos resultados obtidos – através dos estudos de caracterização, de compartimentação e da construção dos modelamentos geológicos e geomecânicos aplicados a grandes empreendimentos de engenharia – é condição necessária para o aprofundamento das questões relacionadas aos estudos de fundação. Sob esse aspecto, é preciso desenvolver entre empresas e técnicos especialistas uma mentalidade mais aberta para a franca divulgação dos dados, resultados e conclusões, desde que preservados determinados quesitos de caráter ético (Vargas, 1983).

Essa é uma postura que já vem sendo assumida há alguns anos, por meio da divulgação em periódicos, comunicados e relatos (mesmo de forma preliminar de elementos descritos e problemas surgidos durante o desenvolvimento dos projetos e das escavações das fundações. Sendo este é o meio mais objetivo e eficiente para criar um cadastro de ocorrências com a vantagem adicional de não haver distorções dos verdadeiros eventos ou perda de interesse por influência de lapsos do tempo decorrido (Bjornberg & Kutner, 1983).

Orientando-se por esses pressupostos, este trabalho torna-se pertinente na medida em que pretende contribuir para a divulgação de resultados obtidos nesta área do conhecimento aos profissionais que são responsáveis por caracterizar as propriedades físicas dos maciços que eventualmente possam afetar a sociedade e o meio ambiente – sobre estes se apresentam os seguintes exemplos:

- Junta Falha em fundações de derrames basálticos (Barragem da Usina Hidroelétrica de Itaipu);
- Camadas suscetíveis ao processo de dissolução, como calcários e evaporitos de regiões cársticas (Usina Hidroelétrica de Peixe Angical);
- Concentrações de grafita, sulfeto e lentes ricas em mica que potencializem instabilidades de cortes ou encostas, como o caso das barragens da Usina Hidroelétrica de Kariba (rio Zambezi no Zâmbia), Usina Hidroelétrica da Serra do Facão (Rio São Marcos em Goiás) e Usina Hidrelétrica de Irapé (rio Jequitinhonha, em Minas Gerais);
- Diferenças no perfil de alteração como no poço da estação Pinheiros do Metrô de São Paulo, Usina Hidrelétrica de Machadinho (rio Uruguai, em Santa Catarina);
- Camadas sujeitas ao inchamento por presença de minerais expansivos (nontronita em basaltos e esmectitas em filitos ou argilitos), como nas rodovias do interior de São Paulo e do Paraná;
- Elevadas tensões no Maciço (Complexo Hidrelétrico do rio das Antas).

Deve-se ressaltar que o tempo e os encargos financeiros gastos na adequada caracterização, classificação e compartimentação de um maciço é muito inferior aos utilizados para descobrir soluções para situação não previstas durante as escavações.

Os estudos de compartimentação e de modelagem dos maciços rochosos têm se revelado um dos aspectos chave para que os trabalhos – desenvolvidos na geologia aplicada à engenharia – apresentem bons resultados.

Por isso, este trabalho pretende mostrar, de forma sucinta, as formas possíveis de se realizar uma investigação adequada para se realizar uma caracterização do maciço, para fins de fundação adequada a sua fase de estudo. Com estes dados se aplicam as técnicas de classificação geomecânicas adequadas ao maciço possibilitando estabelecer a partir desses dados a formulação da compartimentação do maciço associados aos modelos geológicos do Sítio.

1.2. OBJETIVOS

O geólogo por deter o conhecimento do funcionamento das estruturas geológicas e das técnicas de reconhecimento de campo, de prospecção, de ensaios, este profissional tem por responsabilidade – no estudo de um projeto de engenharia – elaborar um programa de investigações geológicas e geotécnicas que permita responder de forma menos dispendiosa e mais eficiente às possíveis questões que possam influenciar nas características do maciço que se colocam no decorrer dos estudos.

Por esta razão, o objetivo desta pesquisa consiste em desenvolver uma análise comparativa entre o modelo geológico, este desenvolvido ao longo dos estudos em comparação com a compartimentação geomecânica do maciço rochoso que se baseou em diferentes metodologias de classificação, visando estabelecer um paralelo entre os aspectos metodológicos utilizados e os resultados obtidos.

Para estes estudos serão aplicados dados adquiridos durante as fases do projeto de Viabilidade e Básico de uma Usina Hidrelétrica (UHE) projetada em um maciço basáltico verticalmente heterogêneo constituído por uma grande seqüência de derrames basálticos relativamente delgados.

Nesse sentido, esta pesquisa pretende contribuir para o entendimento dos processos geológicos/geomecânicos que ocorrem no sítio e como estes podem afetar ou influir diretamente o empreendimento, permitindo definir, da forma mais adequada possível, os procedimentos a serem adotados com o propósito de reduzir as incertezas a respeito do maciço.

1.3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o alcance dos objetivos propostos foram realizados levantamentos de campo, laboratoriais e trabalhos de gabinete.

Nos levantamentos de campo visou-se o desenvolvimento de trabalhos geológicos / geotécnicos que consistiram em um mapeamento geológico estrutural de superfície na região do eixo, a jusante e montante, o acompanhamento das investigações das sondagens e dos ensaios de campo (ensaios de condutividade hidráulica por carga de pressão em cinco ciclos). As posteriores descrições geológicas estruturais associadas à caracterização e a classificação geomecânica dos testemunhos obtidos. Sendo estas etapas de trabalho

documentadas através de desenhos, Logs de sondagem e fotografias (do sítio e dos testemunhos das sondagens).

As atividades laboratoriais foram realizadas utilizando-se de amostras obtidas em testemunhos de sondagens rotativas. Nestas foram realizadas ensaios específicos de mecânica e tecnologia de rochas (Oliveira & Brito, 2000). Através de levantamentos petrográficos macro e microscópicos, caracterização física (porosidade aparente, absorção de água, massa específica seca, massa específica saturada) e resistência mecânica (compressão uniaxial, triaxiais e diametral - tração).

Em todos os ensaios realizados tentou-se utilizar amostras que mantivessem, durante os ensaios, as características físicas e mecânicas mais próximas possíveis do local onde foram obtidas e que de forma geral representam o maciço. Dados exatos nem sempre são possíveis, devido às fissuras ocorridas durante o transporte e coleta além de outras situações que possam ter alterado seu comportamento diante aos ensaios e a interpretação dos resultados, sendo sempre aconselhável a utilização de fatores de segurança para os valores obtidos.

Para reduzir os erros procurou-se trabalhar sempre em sintonia entre os resultados levantados em campo durante as investigações e os ensaios realizados no laboratório, visando adequar de forma precisa os dados disponíveis e os necessários, que podem ser obtidas através dos ensaios aplicadas em amostras obtidas durante as investigações de acordo com as solicitações do maciço para o projeto.

O trabalho em gabinete contou com extensa revisão bibliográfica para o embasamento teórico da pesquisa, visando o reconhecimento da geologia e da geomorfologia do sítio estudado associado às caracterizações, classificações e a compartimentação com a aplicação de modelos geológicos e geomecânicos possíveis de serem aplicadas com os dados disponíveis do local estudado. Sendo estes dados, tratados por meio da elaboração de figuras, desenhos, seções geológicas, planilhas, gráficos e na elaboração da redação da presente dissertação.

2. FASES DE PROJETO

Os trabalhos realizados e a precisão dos dados possíveis de serem obtidos pelo geólogo que trabalha com a Geologia de Engenharia variam muito de acordo com a fase em que se encontra o projeto. Os estudos partem de uma toada regional (com poucos detalhes), evoluindo para um trabalho de caracteres locais, com o detalhamento de um determinado sítio, que além dos levantamentos dos aspectos geológicos gerais, passam a serem necessários e relevantes, os aspectos geomecânicos e geotécnicos (Oliveira & Brito, 2000).

Para a implantação dos aproveitamentos hídricos onde existe a necessidade da construção de barramentos e a formação de um reservatório. Os estudos normalmente, se iniciam pelos “Estudos de Inventário”, seguido pelos “Estudos de Viabilidade”, com a consolidação no “Projeto Básico” e o detalhamento no “Projeto Executivo” que estarão associados ao “Projeto Construtivo” com as definições das estratégias de canteiro (este ultimo desenvolvido habitualmente pela construtora).

2.1. INVENTÁRIO

Esta fase é estritamente regional de características multidisciplinares, com o objetivo de identificar, ao longo dos rios ou em bacias hidrográficas, locais mais favoráveis – do ponto de vista geológico, topográfico, hidráulico e ambiental – para a implantação de um empreendimento hidroenergéticos levando-se em consideração as interferências que os empreendimentos projetados possam promover ao meio.

O enfoque dos trabalhos geológicos nesta fase, frisa a identificação preliminar das características e dos problemas dos sítios (fundação e materiais naturais de construção).

Nesta fase se inicia com o reconhecimento do local e das proximidades do eixo, com o objetivo de identificar:

- A ocorrência dos litotipos principais;
- As qualidades geomecânicas aparentes inferida;
- O topo rochoso inferido, associado a espessuras médias de coberturas de solo e sua tipologia;
- A presença de pontos de fugas d’água;
- A estanqueidade a estabilidade das encostas naturais;

- A potencialidade de erosão e assoreamento em todo o reservatório.

São também definidas as disponibilidades e a adequabilidade prévia das áreas de exploração de rocha, solos impermeáveis e materiais granulares, que irão ser utilizadas durante a construção do empreendimento.

Estas informações são obtidas através de dados bibliográficos, de fotointerpretação, reconhecimento geológico de superfície, e a um reconhecimento de subsuperfície preliminar utilizando-se de métodos indiretos geofísicos (sondagem elétrica vertical / caminhamento elétrico / sísmica de refração) e diretos (sondagem a trado e poços de inspeção).

2.2. VIABILIDADE

Nesta etapa, os levantamentos se concentram em um único sítio pré-definido nos estudos de inventário. Têm por objetivo a determinação de forma mais detalhada, das características do meio físico e ambiental, bem como o estudo e o desenvolvimento de diversas alternativas de “*Layout*”.

Os estudos geológicos devem se concentrar na correta identificação de possíveis riscos geológicos da região afetada pelo projeto, que possam inviabilizar os estudos se utilizando de ferramentas de prospecção que possibilitam o levantamento de dados mais precisos como:

- Mapeamento geológico de superfície (1:5.000), com a caracterização das distintas litologias, feições estruturais, estabilidade de encostas, estanqueidade, assoreamento e possíveis sismos induzidos;
- Foto-interpretção em escala adequada (1:30.000 e 1:5.000);
- Caracterização e Classificação geológico/geotécnicas/geomecânicas de subsuperfície, ao longo dos eixos das principais estruturas projetadas;
- Caracterização volumétrica dos materiais naturais de construção (rocha/solo/granulares);
- Investigações sistemáticas por meios diretos e indiretos;
- Ensaio “*In Situ*” e laboratoriais;

Estas investigações, ao longo do maciço, devem obter resultados que permitam, juntamente com os demais estudos multidisciplinares, processar as análises técnico-econômicas comparativas entre as alternativas elaboradas, considerando as possibilidades de posicionamento e arranjo das estruturas, elegendo a alternativa mais interessante que serão mais bem detalhadas nas fases seguintes.

2.3. PROJETO BÁSICO

Nesta fase se realiza a complementação e o detalhamento dos estudos com um grau de minúcia que fica dependente do porte da obra e das dificuldades geológico-geotécnicas identificadas nos estudos de viabilidade.

Devem ser identificados corretamente os riscos geológicos ao longo do sítio, que requeiram cuidados especiais estimando-se tratamentos mais adequados para as fundação das estruturas, dos túneis e das obras auxiliares.

No desenvolvimento desta etapa de projeto são realizados no maciço:

- Mapeamento geológico detalhado de superfície, da área de interesse da obra, incluindo o reservatório e sua área de influência (1:1.000);
- Detalhamento de subsuperfície objetivando a caracterização geológico-geotécnica (elaboração de um mapa do topo rochoso com precisão métrica);
- Hierarquização e combinação adequada das características geológico-geomecânicas mais importantes, objetivando a classificação de maciços terrosos e rochosos, que possibilitem a formulação de modelo geomecânicos finais;
- Detalhe e estudo de soluções, relacionadas ao projeto através de tratamentos, estabilizações, contenções, consolidações e impermeabilizações, associadas à escavação e à fundação das obras civis;
- Definição e detalhamento de possíveis soluções e tratamentos para os eventuais problemas detectados no sítio e na área do reservatório;
- Caracterização detalhada e cubagem das áreas definidas como fonte de material natural de construção.

Além das informações sobre as fundações, nesta fase se devem obter dados precisos sobre os materiais naturais de construção, estes devem ser investigados com segurança, em termos de suas características geotécnicas, quantidades, técnicas de manuseio e transporte de forma precisa (Oliveira & Brito, 2000).

A grande alteração em relação a fase de estudo anterior (viabilidade) se restringe ao número de investigações associado ao detalhamento de cada estrutura, possibilitando a diminuição da incerteza quanto às condições de escavabilidade e fundação do empreendimento, assim como a cubagem mais precisa dos materiais naturais de construção.

2.4. PROJETO EXECUTIVO

Esta etapa do projeto contempla atividades de detalhamento e refinamento dos projetos anteriores, que devido a algum impedimento ou necessidade de recursos mais amplos, não tenham sido realizadas anteriormente. Ressalta-se que esta fase de estudo que anda em paralelo com o projeto construtivo e a execução da obra, utilizando-se como fonte de novos dados a infra-estrutura disponível nas escavações do empreendimento. O que possibilita a escavação de trincheiras, poços, ensaios especiais, aterros experimentais e ensaios de injeção, além do acompanhamento das escavações superficiais e subterrâneas com a indicação de tratamento e a realização do mapeamento geológico e geomecânico.

Normalmente as investigações nesta fase são menos numerosas do que na maioria das fases anteriores de projetos, no entanto elas são mais minuciosas quanto aos resultados obtidos, o que permite um maior refinamento dos modelos, com funções efetivas de análises de percolação, tensão e deformações dos maciços e detalhamento do topo rochoso.

3. CARACTERIZAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO, COMPARTIMENTAÇÃO E MODELOS DE MACIÇOS ROCHOSOS.

3.1. INTRODUÇÃO

Para a fundamentação dos estudos utilizou-se como base, os conceitos adotados por Camargo et al. (1972) e Tognon *et al.* (1981) onde se define “Caracterização”, “Classificação”, “Compartimentação” e “Modelagem”.

Monticeli (1983) estabelece o fluxograma apresentado na Figura 1, que sintetiza os procedimentos para o estabelecimento da evolução dos estudos dentro do maciço.

Figura 1 – Procedimento para o estabelecimento da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos em fundações de barragens (Monticeli, 1983).

3.2. CARACTERIZAÇÃO

A caracterização geológico-geomecânica, corresponde ao conjunto de informações obtidas através das investigações e dos ensaios tecnológicos e mecânicos de um maciço rochoso (Monticeli, 1983), que deverão ser apresentados através de tabelas, gráficos, perfis individuais de sondagem e mapeamentos geológicos e geotécnicos.

Guidicini et al. (1972) apresentam um método de caracterização geotécnica preliminar de maciços rochosos para obras de engenharia, em geral, utilizando-se testemunhos de sondagem, paredes e abóbadas de túneis e taludes de escavações superficiais.

3.2.1. Obtenção dos Dados

A obtenção dos dados deve ser realizada de acordo com as necessidades de cada sítio, ou dos objetivos da fase de estudo a qual está sendo realizado o levantamento.

Estes dados podem ser obtidos por investigações realizadas na superfície através de mapeamentos geológicos, interpretações de imagens e na subsuperfície por investigações diretas e indiretas, que podem se associar aos ensaios “*In Situ*” e laboratoriais, que possibilitam a obtenção de dados mais precisos quanto às características geológicas e geomecânicas do sítio.

A caracterização geológica é iniciada, por um reconhecimento de superfície, e pela implantação (em carta topográfica) de locais para a abertura de furos de sondagem ao longo das estruturas da usina (o número de sondagens a realizar deve permitir uma amostragem representativa do maciço em estudo). Sendo necessária à realização de descrições litológicas e estruturais detalhadas, associada a obtenção de parâmetros geotécnicos como graus de alteração coerência e fraturamento (Silva et al., 2001).

A caracterização geomecânica do maciço rochoso é realizada mediante a análises visuais e a ensaios em campo (nos furos de sondagens, galerias, poços,...) e laboratoriais (testemunhos), levantando as características petrográficas, índices físicos, permeabilidade e resistência da rocha.

3.2.1.1. Investigações de Superfície

Os levantamentos bibliográficos (pesquisas de referências de estudos anteriores) associado aos estudos de superfície são a primeira etapa para a obtenção de dados de um determinado sítio. Estas investigações de superfície são realizadas através da:

- ***Interpretação de imagens:*** utilização de imagens da superfície da Terra (satélite e fotografias) constitui-se no procedimento inicial para o estudo de um determinado local com o objetivo de conseguir dados do meio físico, tais como texturas e lineamentos visualizados através de tratamentos digitais, óticos e por estereoscópica de fotos aéreas;
- ***Mapeamento Geológico:*** método de investigação que procura identificar e caracterizar as diferentes unidades geológicas presentes na área de estudo e do seu

comportamento, quando submetidas a diferentes solicitações. Este estudo visa estabelecer uma associação entre as características geológicas e geotécnicas, para o entendimento dos possíveis problemas técnicos da região estudada. Sendo imprescindível a caracterização das litologias que constitui o sítio, identificando possíveis aspectos de interesse como a presença de grafitas, sulfetos, carst, minerais expansivos e o estudo das descontinuidades/feições como acamamentos, fraturas, falhas, dobras, etc.

3.2.1.2. Investigações de Subsuperfície – Métodos Diretos

São os principais métodos de investigação utilizados para o reconhecimento geológico-geotécnicos das condições do maciço.

- ***Trecho em Solo e Coberturas Sedimentares Recentes:*** São apresentados a seguir alguns métodos utilizados para a investigação das coberturas sedimentares;

- ***Sondagem com Sondina:*** Utilizado predominantemente para a investigação de corpos aluvionares, onde há a necessidade de se obter amostras deformadas de sedimentos e a identificação da espessura do depósito. Este equipamento é constituído por uma broca que tem um “tampa” que abre no avanço do equipamento e fecha na remoção;

- ***Sondagem a trado:*** Investigação das camadas de solos de cobertura ou solos de alteração com a coleta de amostras deformadas para identificação tátil visual e a realização de ensaios geotécnicos;

- ***Poço ou Trincheira de inspeção:*** Investigação das camadas de solos de cobertura, dos solos de alteração e da interface solo-rocha, com a execução de mapeamentos e da amostragem com a coleta de blocos indeformadas para a realização de ensaios geomecânicos;

- ***Sondagem a percussão:*** Investigação das camadas de solos superficiais, com amostragem deformada e a realização de ensaio de “*Standard Penetration Test*” – “SPT”, que fornece à resistência a penetração do solo de cobertura. Esta sondagem possibilita a execução dos ensaios de lavagem por tempo e de infiltração, o primeiro mede a velocidade de avanço no terreno e o segundo a absorção de água em um determinado tempo (Foto 1).

- ***Trecho em Rocha:*** São apresentadas a seguir algumas metodologias para

obtenção de informações sobre o maciço rochoso;

– *Sondagem rotativa*: Permite identificar a espessura “exata” da cobertura de solo sobre o maciço, a realização de ensaios “*In-Situ*” e a obtenção de testemunhos que possibilitam a realização de ensaios laboratoriais, a caracterização e a classificação geomecânica (Foto 2).

Foto 1 – Equipamento de sondagem a percussão.

Foto 2 – Equipamento de sondagem rotativa.

– *Rotopercussão*: Investigação que identificam espessuras de solo sobre o maciço e caracteriza a rocha através da velocidade verificação do avanço do equipamento durante a perfuração (o que depende de diversos fatores como condições do equipamento e a experiência do operador da sonda) e a obtenção de amostras deformadas (pó de rocha e fragmentos associados ao fluido de perfuração). Sendo possível no local do furo a realização de ensaios geomecânicos e tecnológicos e o televisamento do maciço rochoso, que possibilita uma caracterização estrutural precisa.

– *Galeria de Inspeção*: Investigação de grande porte executado na porção rochosa com extensão horizontal e/ou de pequena inclinação, a qual possibilita o mapeamento de estruturas, a realização de ensaios no local da escavação, assim como a coleta de amostras de maiores dimensões para ensaios em laboratório (Figura 2).

3.2.1.3. Investigações de Subsuperfície – Métodos Indiretos

Métodos que permitem determinar a distribuição de alguns parâmetros físicos dos maciços, através de características indiretas como a velocidade de propagação de ondas, resistividade elétrica, constantes de densidade e possíveis campos magnéticos.

Figura 2 – Galeria realizada sob a fundação de uma barragem, com o intuito de identificação possíveis estruturas que possam interferir na estabilidade do maciço.

Propriedades que guardam estreitas relações com algumas características geológicas e geomecânica do maciço como a litologia, o grau de alteração, o grau de fraturamento, os contatos – litológicos e tectônicos –, o topo rochoso e as inferências quanto à resistência do maciço (onda sísmica ou resistividade versus resistência mecânica).

Este levantamento é um meio de se obter de forma rápida e prática alguns destes parâmetros fundamentais na investigação de uma determinada área. Em Geologia de Engenharia os métodos mais utilizados são o Geoeletricos e os Sísmicos.

- **Métodos Geoeletricos:** Eletroresistividade através de (sondagens elétricas verticais e caminhamento elétrico), polarização induzida, potencial espontâneo, eletromagnetismo como “EM” (Eletromagnético - Domínio do Tempo), “VLF” (“*Very Low Frequency*”) e “GPR” (“*Ground Penetration Radar*”).

- **Métodos Sísmicos:** Refração e reflexão – utilizadas em superfície através de levantamentos lineares e perfilagem sísmica contínua –, a ecobatimetria – utilizados na investigação de áreas submersas em rios, lagos e na plataforma continental – “*Cross Hole*” e Tomografia – ensaios entre furos de sondagem.

3.2.1.4. Ensaios “*In Situ*”

Ensaios realizados na superfície ou em subsuperfície do terreno, durante a execução das investigações. A seguir são apresentados exemplos dos ensaios mais difundidos e utilizados no Brasil:

- **Condutividade Hidráulica:** Ensaios que determinam a permeabilidade do maciço, obtida através de ensaios de infiltração (trecho em solo), ou pelo ensaio de perda d'água sob pressão (trecho em rocha), nos avanços das sondagens.

- **Ensaio de Infiltração:** constituído por uma coluna d'água colocada sobre o furo de sondagem com a utilização de um revestimento no trecho acima do ensaiado, onde é medida em um determinado intervalo de tempo, a absorção de água no trecho ensaiado, estas leituras são realizadas até a estabilização da absorção do maciço ou de um limite de leituras imposta pelo projeto (ABGE, 1999). Este ensaio pode ser aplicado no horizonte de solo de cobertura ou de rocha decomposta, obtidas em sondagens a percussão, rotativas ou mistas (Foto 3).

- **Ensaio de perda d'água sob pressão:** Consiste na injeção de água, sob pressão, em trechos perfurados pela sondagem, que são realizados convencionalmente em três ou cinco estágios de pressão. Este procedimento é aplicado a fim de caracterizar o comportamento do maciço diante das diferenças de pressão e da diminuição de possíveis erros na obtenção dos valores de condutividade hidráulica, apresentando fatores de segurança mais elevados ao ensaio (Foto 4).

Foto 3 – Ensaio de infiltração (coluna de revestimento a 1 m do terreno) – Realizada no trecho em solo.

Foto 4 – Ensaio perda d'água (manômetro à esquerda e hidrômetro à direita) – Realizada no trecho em rocha.

Os resultados podem identificar a existência de possíveis fugas d'água, níveis sujeitos a percolação e a subpressão elevada. A permeabilidade das rochas, em comparação com a dos solos, é geralmente muito baixa, sendo que o seu valor normalmente está associado ao fissuramento e o grau de alteração, com nível de anisotropia da permeabilidade condicionado a orientação preferencial das descontinuidades em relação à investigação.

O estado de tensão aplicado ao maciço, influência consideravelmente permeabilidade, onde o aumento das tensões de compressão pode provocar o fechamento das fissuras e a diminuição da permeabilidade. No entanto a partir de um limite, o aumento das tensões, associadas com a resistência mecânica do maciço, pode iniciar o aparecimento de novas fraturas, devido ao alívio das tensões, o que provoca o aumento da permeabilidade do maciço.

A permeabilidade identificada pelo ensaio no maciço rochoso varia muito com a pressão, onde o seu aumento tende a promover a abertura das fissuras o que condiciona o aumentando da permeabilidade.

A presença de água durante as escavações dos maciços rochosos tem diversos efeitos:

- ✓ Pressão exercida pela água que reduz a estabilidade, e o atrito entre as paredes;
- ✓ Aceleração da alteração das paredes;
- ✓ Erosão dos solos da superfície e do preenchimento das descontinuidades que ocorrem como resultado da circulação da água o que pode levar ao aumento da abertura e diminuição das condições de estabilidade.

Sendo assim os dados referentes à condutividade do maciço, associadas a outras informações relevantes, permitem ao projeto determinar as condições do maciço nas cotas de escavação, possibilitando com este conjunto de informações a definição dos prováveis tratamentos de fundação, ou mesmo o deslocamento do eixo de alguma estrutura (Oliveira, 2000).

• ***Levantamento das Tensões do Maciço:*** Realizado através da análise de estruturas produzidas pelas liberações anteriores de tensão ou na realização de ensaios.

Os métodos mais usuais baseiam-se no mapeamento superficial e na análise de testemunhos de sondagem, objetivando o levantamento de dados estruturais que apresentem feições características, analisando-se fundamentalmente os aspectos cinemáticos e dinâmicos. Este método é utilizado como alternativa, uma que o campo de tensões do maciço rochoso não pode ser medido diretamente.

Outra alternativa para a obtenção destes dados é através de ensaios “*In Situ*” que se fundamentam na determinação das deformações através da superfície das paredes dos furos de sondagens e das galerias de inspeção.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos métodos de medição das tensões virgens, mais utilizados. São expostas características comuns a todos os métodos, como a forma com

que eles são interpretados, baseando-se na teoria da elasticidade, supondo-se que a rocha é um elemento contínuo, isotrópico, de comportamento linear e elástico.

Tabela 1 – Métodos de medição das tensões virgens do maciço (modificado de Mafra, 2001).

<i>Método</i>	<i>Origem</i>	<i>Técnica</i>	<i>Local de medição</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Grandeza medida</i>
Defómetro Tridimensional	LNEC PORTUGAL (1966)	Sobre furação	Furo executado na rocha, em galerias ou a partir da superfície	50 a 70	Deformação
Célula Tiaxial	USBM (1961) EUA				
Doorstopper	CSIR (1971) ÁFRICA DO SUL				
Almofadas Planas	FRANÇA (1952)	Cancelamento de deformação	Galeria	Qualquer	Pressão de cancelamento das deformações
Almofadas Planas de Pequena Área	LNEC PORTUGAL (1966)				
Fraturamento Hidráulico Clássico	EUA (1957)	Determinação da pressão de água necessária para induzir uma fratura em furos de sondagem	Furo executado na rocha, em galerias ou a partir da superfície	Até 5000	Determinação direta das deformações principais σ_1 e σ_2
Hidrofraturamento de Massa	BRASIL (1993)	Determinação da pressão de água necessária á abertura de fraturas naturais do maciço		Até 700	

Sendo assim esses métodos apresentam imprecisões intrínsecas, uma vez que, para algumas rochas, estas hipóteses são validas, mas para outras não. Isso explica parte das discrepâncias freqüentemente encontradas nos ensaios de determinação de tensões.

O método historicamente mais utilizado no Brasil é o Fraturamento Hidráulico, onde se determina as tensões através das medidas da pressão que são necessárias para fraturar e manter aberta uma fatura na rocha sã e impermeável.

Com este objetivo aplica-se uma elevada pressão de até ~35 MPa, em um trecho limitado do furo de sondagem de diâmetro Nx, utilizando-se do equipamento apresentado na Figura 3.

A obtenção da direção destas fraturas provocada pelo ensaio é realizada com a utilização de um obturador de impressão ou de imagens por televisamento.

Figura 3 – Equipamento para o ensaio de fraturamento hidráulico (Hainson, 1989).

- **Índice de Resistência à Penetração (Esclerômetro):** Estabelece referências sobre a alteração e resistência das paredes das discontinuidades.

O estado de alteração da rocha junto às paredes das discontinuidades tem não só forte influência na resistência ao corte dos maciços rochosos, mas principalmente na estabilidade de todo o maciço.

Este ensaio se faz necessário para que se tenha um valor aproximado da resistência na face da discontinuidade. Pois enquanto a resistência da rocha pode ser avaliada em laboratório com a execução da compressão uniaxial ou triaxial, a camada relativamente fina da rocha mais alterada junto as parede, que mais afetam a resistência ao corte e a deformação, só podem ser estimadas por via indiretas.

Recorrendo-se assim a testes ou ensaios simples cujos resultados possam ser correlacionados com a resistência à compressão simples.

A resistência à compressão simples das rochas pode ser correlacionada com a sua dureza, sendo que a dureza nas rochas é um conceito diferente daquele que é considerada nos minerais, nas rochas esta grandeza é associada com a chamada dureza de Schmidt (R) que pode ser determinada através do ensaio com o martelo de Schmidt (Foto 5).

Foto 5 – Ensaio de resistência a penetração (martelo de Schmidt).

Os valores obtidos, com este ensaio, devem ser correlacionados com os de resistência a compressão uniaxial das rochas, traçando-se um paralelo entre os resultados.

3.2.1.5. Ensaaios Laboratoriais em Rocha

Serão descritas a seguir de forma breve os principais tipos de ensaios laboratoriais agrupados entre os petrográficos, geomecânicos e a determinação dos índices de forma.

- **Petrográficos:** Exames onde se objetivam caracterizar de forma precisa os tipos litológicos de ocorrência no sítio, estas podem ser realizadas através de análises:
 - Macroscópicas com a utilização de amostras de mão e lupas;
 - Microscópicas através do estudo de seções delgadas e polidas (para estudo de minerais opacos);
 - Químicas quando necessária.

Estas investigações proporcionam além da identificação litológica, as informações sobre a composição mineral, granulométrica, textural e de estrutural das rochas.

- **Índices físicos:** Compostos pela absorção de água, porosidade aparente e a massa específica aparente seca e saturada.

Para a obtenção destes índices os corpos de prova são colocados em estufa ventilada a aproximadamente 100°C por 24 hs. Em seguida, aguarda-se o resfriamento e obtêm-se os seus pesos. Estes se referem aos constituintes sólidos das rochas ensaiadas. Posteriormente deve-se emergir o corpo de prova em água destilada por 48 horas, sob pressão e temperatura ambiente e posteriormente secar a superfície da amostra e em seguida obter o peso.

Os pesos obtidos nesta fase referem-se, as condições da rocha quando saturada, ou seja, a parte sólida mais todos os vazios da rocha preenchidos por água. É necessário ainda obter os pesos dos corpos de prova submersos (Foto 6).

Foto 6 – Pesagem das amostras saturadas submersas.

Esta pesagem determina o volume das formas irregulares, que através do valor da diferença entre o peso saturado e o submerso, se obtém o volume total da amostras em cm^3 , (quando adotado a massa específica da água igual a 1 g/cm^3).

Com os dados obtidos se podem definir alguns índices físicos:

- *Massa específica aparente seca (pas)*: relação entre a massa dos sólidos e o volume total da amostra de rocha (g/cm^3);
- *Massa específica aparente saturada (pasat)*: relação entre a massa dos sólidos mais a massa de água ocupando os vazios e o volume total da amostra de rocha (g/cm^3);
- *Absorção de água (S)*: percentagem de massa de água absorvida no volume de vazios da rocha em relação à sua massa de sólidos;
- *Porosidade aparente (P)*: volume de vazios (ou massa de água absorvida) em relação ao volume total da amostra de rocha.

- **Geomecânico:** Ensaios que determinam a resistência do maciço sobre condições adversas, como Cisalhamento Simples e Compressão Uniaxial, Diametral e Triaxial. Destaca-se que após estes ensaios as características originais das amostras não poderão ser recuperadas após a aplicação dos esforços.

- *Resistência à Compressão Uniaxial.* Neste ensaio é estudado o comportamento das rochas quando submetidas à compressão simples que permite delimitar a resistência

mecânica do maciço rochoso, quando submetidos a esforços diferenciais, utilizando-se de equipamento como o apresentado na Foto 7.

Foto 7 – Laboratório – Sistema para ensaio uniaxial (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).

Ao valor máximo atingido pela tensão, é designado de resistência à compressão, determinada em amostras submetidas a uma tensão normal, entre pratos de tensão hidráulica, dado pela relação:

$$\sigma_c = F/A$$

Onde “ σ_c ” é a resistência à compressão uniaxial da amostra, “F” a força de ruptura aplicada e “A” área inicial da seção normal na direção de aplicação da força (Foto 8).

Foto 8 – Laboratório – Sistema para Ensaio Uniaxial - Instrumentação utilizada para medida da deformação axial nos ensaios de compressão uniaxial (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).

A geometria dos corpos de prova não é algo fixo, estes permitem ter diversas formas além das cilíndricas (testemunhos de sondagem) podem ser cúbicas ou prismáticas, desde que a preparação da amostra tenha um cuidado especial quanto aos contornos da superfície das

bases que irão sofrer compressão, para garantir a aplicação das correlações entre os resultados obtidos

O ensaio se conclui quando se atinge o valor máximo da tensão (S1), que se dá quando ocorrerem fraturas com dimensões da ordem de grandeza das amostras ensaiadas.

O último trecho no qual a tensão (S1) decresce, apesar da máquina de ensaio continuar impondo o encurtamento da peça, é onde se obtém o *módulo de elasticidade*, valor importante em obras subterrâneas onde há trechos que ultrapassem a tensão máxima estabelecida pelos ensaios, sendo um dado fundamental na determinação em maciços fraturados.

A ISRM (“*International Society for Rock Mechanics*”) apresenta uma classificação da rocha intacta em função da resistência à compressão uniaxial (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação de rochas em função da resistência uniaxial (modificado de ISRM, 1981).

<i>Descrição</i>	<i>Resistência à Compressão uniaxial (Mpa)</i>
Rocha extremamente fraca	0,25 – 1,0
Rocha fraca	1 – 25
Rocha medianamente resistente	25 - 50
Rocha resistente	50 – 100
Rocha muito resistente	100-250
Rocha extremamente resistente	>250

– *Ensaio de Carga Pontual: (“Point Load Test”)* também conhecido por ensaio Franklin ou Brasileiro, usado na determinação do Índice de Resistência, correlacionáveis com a resistência à compressão simples.

Utilizado em casos, onde o maciço apresenta um alto grau de fraturamento e/ou um “RQD” (“*Rock Quality Designation*”) muito baixo, o que impossibilita a coleta de amostras de dimensões adequadas para o número de ensaios uniaxiais requeridos para determinação das propriedades do maciço rochoso referentes ao projeto. Outro fator importante, a se destacar, é que a simplicidade do método, que faz com que sejam mais rápidos e economicamente mais atrativos.

Também é possível a aplicação quando a resistência à compressão simples e o comportamento tensão-deformação não necessitam ser estudado em detalhe, bastando o conhecimento aproximado de um valor da resistência de pico.

O procedimento sugerido pela ISRM para a realização deste ensaio, consiste em provocar a ruptura de amostras de rochas, obtidas a partir de testemunhos de sondagens com diâmetros variando entre 25 e 100 mm, aplicando uma força pontual crescente.

A amostra de rocha é comprimida entre duas ponteiros cônicas (Foto 9), que provocam a ruptura por desenvolvimento de fissuras paralelas ao eixo da carga, sendo registrado o valor da carga que provoca a ruptura.

Foto 9 – Equipamento para ensaios de tração indireta – Carga Pontual (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).

Para o cálculo da resistência à tração indireta utiliza-se a seguinte equação:

$$\sigma_t = 2P / \pi t D$$

Onde, P é a carga na ruptura, D é o diâmetro do corpo de prova ensaiado e t é a espessura do corpo de prova.

Broch & Franklin (1972) apud Brandy & Brow (1994), obtiveram uma relação linear entre o índice de carga puntiforme e a resistência à compressão uniaxial, representada pela seguinte expressão, validada para valores com D = 50 mm.

$$\sigma_c = 23,7 * \sigma_t$$

Bieniawski (1975) sugere, para outros valores de D uma relação aproximada entre compressão uniaxial (σ_c), a compressão pontual (σ_t) e o valor de D apresentada abaixo:

$$\sigma_c = (14 + 0,175 * D) \sigma_t$$

– *Resistência à compressão Triaxial:* A determinação da resistência à compressão triaxial da rocha é uma tarefa que requer cuidados especiais na preparação das amostras e condução dos ensaios, devido a sua complexidade e dependência das variações de carga.

Para a execução do ensaio, os corpos de prova devem ser protegidos por uma membrana de látex para impedir que o óleo entre em contato com a amostra durante a execução dos ensaios (Foto 10).

A montagem de uma câmara triaxial na prensa, para serem aplicadas a carga axial e a pressão confinante, através de uma bomba hidráulica, ao longo de todo o ensaio, com auxílio de manômetros com sensibilidade de 0,5% (Foto 11).

Foto 10 – Proteção dos testemunhos para execução do ensaio (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).

Foto 11 – Câmara triaxial (Laboratório de Mecânica de Rochas – Escola de Engenharia – USP São Carlos – 2007).

Para a medida do deslocamento axial do corpo de prova, devem ser instalados sensores, fixados na parte superior da câmara triaxial. As ponteiras medidoras são apoiadas em uma haste metálica posicionada no êmbolo aplicador da carga axial.

Os instrumentos medem, além do deslocamento do corpo de prova, os deslocamentos relativos à deformação do êmbolo e os deslocamentos das interfaces entre corpo de prova e os espaçadores. É recomendado que na realização dos ensaios triaxiais, sejam utilizados múltiplos estágios a diferentes tensões confinantes determinadas pelo projeto.

Cada corpo de prova deve ser ensaiado com um ciclo de carregamento até um valor de carga que não ocasione a ruptura do corpo de prova, em seguida descarregado. A tensão confinante é elevada até o valor especificado pelo projeto e um novo ciclo de carregamento é feito, até um valor de carga maior do que o estágio anterior, sem atingir a ruptura. No último estágio de tensão de confinamento, o corpo de prova é carregado até a ruptura.

Em todos os estágios durante o carregamento e o descarregamento, são medidas as cargas axiais aplicadas em cada instante e o correspondente deslocamento axial.

Os módulos de elasticidade são valores determinados, no ciclo de carregamento, pela diferença das tensões principais da deformação axial a partir da reta coincidente ao trecho linear da curva. Estes ensaios fornecem como resultados principais a resistência e a

deformabilidade do maciço sob determinada pressão de confinamento, bem como a resistência ao cisalhamento.

Para se obter os estados de ruptura das rochas, convencionou-se a realização de círculos de Mohr representativos dos estados de tensões de ruptura para os ensaios.

Esse critério é escrito em termos das tensões de cisalhamento (τ) e (σ) atuantes no plano de ruptura, que é representado pelo ponto de tangência de um círculo de Mohr crítico com a envoltória de Coulomb seguindo a equação:

$$\tau_p = S_i + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

τ_p – Resistência ao cisalhamento (tensão cisalhante de pico);

S_i – Intercepto coesivo (no caso de ensaios triaxiais esta grandeza pode ser interpretada como uma resistência ao cisalhamento inerente ao material, independente do nível de tensões atuantes);

σ – Tensão normal ao plano de ruptura;

$\operatorname{tg} \varphi$ – Ângulo de atrito interno do material.

3.2.2. Descrição Geológico-Geotécnica

Para a realização de uma descrição geológica-geotécnica adequada, autores como Monticelli (1983) e Camargo (1978), consideram fundamental a realização das descrições dos testemunhos com a utilização de padrões classificatórios para a formulação dos perfis de sondagem, onde são apresentadas as descrições geológica e os parâmetros geotécnicos e geomecânicos.

3.2.2.1. Caracterização Petrográfica / Litológica

Levantamento das características quanto a composição mineral, aspectos estruturais, texturais, evolutivas e coloração, com o objetivo de qualificar, classificar e agrupar os tipos litológicos.

As rochas são constituídas por uma assembléia mais ou menos compacta de grãos cristalinos em alguns casos de matéria amorfa, onde o termo matriz rochosa poderá ser mais correto uma vez que as rochas são sólidos policristalinos, descontínuos e que podem exibir anisotropia derivada de uma orientação preferencial em sua estrutura.

A influência das características petrográficas nos parâmetros físicos e mecânicos das rochas é o alvo de estudos devido à importante contribuição que essas informações podem fornecer para caracterização das fundações das obras, assim como o aproveitamento destas, como material de construção (Mello, 1968).

Tanto do ponto de vista técnico como no econômico essa prática é bastante adequada, pois é um ensaio tecnológico de baixo custo e de rápida obtenção de dados com parâmetros iniciais confiáveis.

O estudo da interação entre a composição, texturas e estruturas das rochas, é o fator que define a resistência aos agentes químicos, físicos e mecânicos de toda rocha, ou seja é o resultado da combinação das características petrofísicas do material.

A adequada caracterização de todas as variáveis petrográficas determinantes do comportamento tecnológico das rochas, está ligada a dificuldade da quantificação de alguns parâmetros, tais como o grau de microfissuramento e o grau de alteração (Rzhevsky & Novik, 1971).

Conforme comentado por Navarro (2002), as variáveis petrográficas podem ser agrupadas genericamente em três categorias (composição mineral, texturas e estruturas), definindo um trinômio de inter-relação, que responde pelo comportamento físico e mecânico da rocha (Figura 4).

Figura 4 – Esquema ilustrando o comportamento físico e mecânico das rochas, como resultado da interação entre os aspectos petrográficos definidos pela mineralogia, textura e estrutura (modificado de Navarro, 2002).

No entanto, as diferentes litologias compõem um universo multidimensional bastante complexo, uma vez que muitas rochas com feições composicionais, texturais e estruturais diferentes podem apresentar propriedades físicas e mecânicas semelhantes, ou outras com

composição, texturas e estruturas próximas podem apresentar comportamentos tecnológicos muito distintos.

Dessa maneira é correto admitir que cada variável petrográfica seja responsável por parte da variabilidade presente em um dado tecnológico, e a somatória dessas variáveis podem definir o comportamento físico e mecânico da rocha (Navarro, 2002).

3.2.2.2. Caracterização das Descontinuidades

A caracterização das descontinuidades é de fundamental relevância, pois estas condicionam o comportamento dos maciços rochosos. Principalmente quando associado modelos estruturais que definem sistemas de famílias com atitudes desfavoráveis.

- **Orientação:** O primeiro passo na descrição das descontinuidades consiste na análise da orientação e identificação das famílias preferenciais singulares, que podem determinar blocos de rocha potencialmente instáveis, durante as escavações. A atitude é um dado geométrico espacial, obtido através da direção do traço da descontinuidade e do mergulho, que é o ângulo entre o plano e a horizontal (Figura 5).

Figura 5 – Obtenção de dados geométricos/geográficos das descontinuidades

A obtenção destas informações, nas investigações de subsuperfície usualmente, é realizada de duas formas:

- **Orientação dos testemunho de sondagem:** para este procedimento é inserido no furo de sondagem, a partir do momento em que o maciço se apresente são e pouco fraturado, uma lâmina metálica em cinzel (Foto 12), acoplado a uma série de hastes até alcançar o topo de rocha.

Estas hastes são acopladas a um direcionador, onde a lâmina metálica em cinzel deve manter-se centralizado e com a ponteira voltada para o topo do furo, quando as sondagens são inclinadas, ou para o Norte quando verticais. No topo das hastes é colocada uma ponteira (Foto 13), onde é dado um golpe de marreta para marcar o topo da rocha que será amostrada (Foto 14).

Foto 12 – Lâmina metálica em cinzel acoplado com as hastes sendo inserido no furo de sondagem.

Foto 13 – Haste centralizada, direcionada com a ponteira para receber o golpe de marreta.

Foto 14 – Testemunho marcado pela lâmina metálica em cinzel.

A marcação obtida com a ação da lâmina metálica em cinzel é prolongada no testemunho, com o auxílio uma calha, para a acomodação das peças de forma adequada (Foto 15). Caso seja impossível o prolongamento deste direcionamento, devido a trechos muito fraturados ou alterados, deve-se realizar o mesmo procedimento para o avanço seguinte.

Foto 15 – Prolongamento no testemunho da “marca” deixada pela Lâmina metálica em cinzel.

– *Televisamento de 360° das paredes dos furos de sondagem:* com este método não é necessária a retirada de testemunho, sendo assim possível a aplicação em sondagens rotativas e rotopercussivas.

A técnica é baseada na obtenção de imagens em cores das paredes de perfurações,

tanto acima como abaixo do nível d'água, devidamente processadas para permitir a visualização, edição e análise das imagens de maneira prática.

Estas podem ser aplicadas independentemente da qualidade do maciço perfurada, que compõe uma imagem contínua do trecho perfurado sendo assim, com esta técnica sempre iremos obter uma recuperação “virtual total”. Tanto nos trechos constituídos por rocha friável, como eventuais vazios existentes no maciço, que habitualmente são segmentos com recuperação muito baixa ou nula nos testemunhos da sondagem rotativa.

O equipamento é construído na parte inferior por um tubo, transparente dotada de espelho cônico e um conjunto de lâmpadas, permitindo que as imagens das paredes do furo, iluminadas, sejam refletidas e direcionadas para a parte superior do tubo (cego), onde se encontra a câmera (Foto 16).

Foto 16 – Câmera de imageamento digital - Componente de leituras das paredes do furo de sondagem (www.alfageos.com.br).

Conectado à extremidade inferior do módulo formado por um dispositivo cônico, plástico de alta resistência, com a função de proteger o aparelho contra choques diretos em caso de obstrução do furo de sondagem.

A câmera comporta o ajuste da distância focal, permitindo ao televisamento de furos em vários diâmetros com intervalo de 75 mm a 250 mm.

Este sistema é conectado em superfície ao computador, para os quais os módulos transmitem os dados obtidos através do sistema de orientação das imagens referenciadas aos pontos cardeais o que permitem direcionar os elementos estruturais detectados, inclusive as discontinuidades do maciço. Este recurso operacional pode ser utilizado também como uma eficiente solução para a determinação de possíveis desvios nos furos de sondagem.

Para estas leituras sejam mais exatas, é necessário que o equipamento esteja bem calibrado e aferido as inclinação do furo e as condições geográficas locais, e que todos os levantamentos sejam acompanhados por um técnico experiente.

- **Espaçamento:** Distância entre duas discontinuidades adjacentes de uma mesma família, medido ao longo de uma linha de observação na face de um talude, na escavação de um túnel ou em testemunhos de sondagem. Podem-se considerar três diferentes tipos de espaçamentos (Figura 6):

Figura 6 – Tipos de espaçamentos: (a) espaçamento total; (b) espaçamento de uma família de fraturas; (c) espaçamento ao longo da normal da família de fraturas.

- *Espaçamento total:* corresponde a distância entre duas fraturas imediatamente adjacentes, medida ao longo de uma linha com orientação e localização específicas;
- *Espaçamento de uma família de fraturas:* corresponde ao espaçamento entre duas fraturas adjacentes de uma família de fraturas, medida ao longo de uma linha com orientação e localização específicas;
- *Espaçamento ao longo da normal da família de fraturas:* corresponde ao espaçamento entre duas fraturas adjacentes de uma mesma família de fraturas, medida ao longo de uma linha paralela à média da normal.

Através da adoção de intervalos destes espaçamentos é possível a adoção de padrões de intervalos (Tabela 3).

Tabela 3 – Espaçamento de discontinuidades (ABGE, 1983).

Siglas	Espaçamento (mm)	Espaçamentos
1	>200	Muito Afastados
2	60 a 200	Afastados
3	20 a 60	Medianamente Afastados
4	6 a 20	Próximos
5	<6	Muito Próximos

É comum a diminuição do espaçamento das discontinuidades, à medida que o topo de rocha se aproxima da superfície do terreno.

- **Persistência:** extensão em área de uma determinada discontinuidade, sendo um dos parâmetros mais difíceis de serem determinados, em testemunhos de sondagem.

A quantificação da persistência se faz através da medida do comprimento do traço da superfície das descontinuidades em uma face exposta e a partir destas informações, estimasse a área média de ocorrência das diversas famílias. Estas associações são apresentadas na Tabela 4 e na Figura 7, onde se representa as possibilidades das persistências.

Tabela 4 – Persistência das descontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).

Siglas (Figura 9)	Persistência (mm)	Persistência
(e)	<1	Muito Pequena
(d)	1 - 3	Pequena
(c)	3 - 10	Media
(b)	10 - 20	Elevada
(a) e (f)	>20	Muito Elevada

Figura 7 – Representações simples e blocos diagramas para exemplificar a continuidade relativa das famílias das descontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).

- **Abertura:** Distância medida na perpendicular entre as paredes adjacentes de uma descontinuidade onde o respectivo espaço entre elas está ocupado por ar, água ou outro material (Figura 8).

O estudo destas estruturas está associado ao fluxo dos fluídos, pois o volume deslocado está intrinsecamente correlacionado, com a abertura, sendo este o espaço por onde ele pode se deslocar.

Figura 8 – Abertura de uma fratura (Telles et al., 2005).

A abertura real de uma fratura, todavia, não coincide necessariamente com a original, que pode ter sido modificada em estágios posteriores à sua formação. Essas modificações

podem ocasionar a diminuição ou o aumento da espessura entre as paredes das descontinuidades.

A diminuição da abertura pode ocorrer, por processos de deposição física ou química de materiais em suspensão ou diluída no fluido percolante. O aumento das aberturas pode ocorrer por processos de erosão, alívio de tensão e movimentação tectônica (Figura 9).

Figura 9 – Representação esquemática dos tipos de abertura das descontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).

- **Preenchimento / Veios:** Preenchimento é o termo usado para descrever o material que enche o espaço entre as paredes da descontinuidade tem notável influência na estabilidade dos maciços e pode ser ocupado por materiais muito diversificados, como por exemplo: calcita, quartzo, argila, silte, milonito de falha, brecha, etc..

O exemplo, que pode ser dado, são as diferenças de cisalhamento e de deformação, quando uma descontinuidade que é preenchida por materiais distintos, como argilas moles (diminuem a resistência), mineralizações hidrotermais (pouco resistentes) e por material pétreo (muitas vezes mais resistente e menos deformável que o próprio material rochoso). Na Tabela 5 são exemplificadas descrições dos principais tipos de contato (relação entre a abertura e o preenchimento) na descontinuidade.

Tabela 5 – Tipos de contato das descontinuidades (modificado de Oliveira, 1986).

Superfície das Descontinuidades
Contato rocha-rocha, paredes sãs.
Contato rocha-rocha, presença de material pétreo rijo.
Paredes com alteração incipiente, sinais de percolação d'água, sem preenchimento.
Paredes alteradas, preenchimento ausente.
Paredes alteradas, com preenchimento.

- **Resistência das Paredes:** Medida através da análise do estado de alteração da rocha junto às paredes das descontinuidades. Esta característica tem forte influência na resistência ao corte do maciço rochoso, principalmente quando as descontinuidades estiverem fechadas.

Como já foi dito, a resistência da rocha pode ser avaliada em ensaios de compressão uniaxial ou triaxial, a camada relativamente fina da rocha mais alterada junto à parede, que mais afeta a resistência ao corte e a deformação e de difícil determinação. Sendo estimadas por vias indiretas, por meio de testes ou a ensaios simples cujos resultados possam ser correlacionados com a resistência à compressão simples, através de ensaios visuais com martelo e canivete (onde se mede a coerência do material) ou através da utilização do martelo de Schmidt (aplicados principalmente durante as escavações).

- **Rugosidade:** Corresponde a morfologia das superfícies das discontinuidades, esta característica é um fator que tem uma especial importância na resistência ao deslizamento da descontinuidade, principalmente se esta se apresentam fechadas e sem prévia movimentação. Na Figura 10 são apresentados os perfis de rugosidade utilizada como padrão por Barton em sua Classificação.

Figura 10 – Representação dos perfis de rugosidade (modificado de Barton et al., 1978).

As paredes das discontinuidades podem ser irregulares, lisas ou polidas, que são elementos ligados à gênese das discontinuidades dentro do maciço rochoso e influenciam no mecanismo de cisalhamento e a percolação de água através das discontinuidades (Oliveira & Brito, 2000).

Os tipos de rugosidades também estão associados à escala, quando apresentam alguns metros estas são classificadas de primeira ordem e denominadas de ondulação e quando possuem dimensões milimétricas a centimétricas são classificadas de segunda ordem e identificadas como rugosidades ou asperezas. Estes parâmetros afetam de sobre maneira, o ângulo de atrito da discontinuidade, observando que a importância da rugosidade na resistência do maciço diminui de acordo com o espaçamento, o preenchimento e os deslocamentos recentes.

3.2.2.3. Caracterização do Maciço

Aspectos qualitativos do maciço rochoso condicionadas pelo estado de alteração e de fraturamento, que influência na estabilidade do maciço.

- ***Grau de Alteração:*** É a maior ou menor facilidade com que se parte o material, baseada em métodos expeditos de observação, utilizando um martelo de mão, ou analisando a sua coloração e brilho que se alteram como consequência intemperismo químico sofrido por certos minerais como os feldspatos e os minerais ferromagnesianos. Alguns aspectos macroscópicos devem ser observados para esta caracterização:

- a) Alteração da cor original dos minerais e da rocha (descoloração ou oxidação);
- b) Presença de minerais secundários (argila, óxidos, carbonatos, sílica amorfa);
- c) Perda de coesão ou do imbricamento dos grãos;
- d) Lixiviação do cimento original;
- e) Aumento da porosidade e microfissuramento;
- f) Diminuição do brilho e dureza dos minerais.

O número de graus a considerar em relação ao estado de alteração de uma dada formação varia necessariamente com o tipo de rocha e conseqüentemente, com a necessidade de especificar a informação dos casos, neste trabalho adotou-se a classificação de Camargo et al. (1976), onde se consideraram cinco graus de alteração para o maciço rochoso que variam

de sã à decomposta, e são aplicados a basaltos, granitos, gnaisses e metassedimentos (Tabela6).

Tabela 6 – Grau de alteração para basaltos, metassedimentos, granitos e gnaisses (Camargo et al., 1976).

Siglas	Denominação	Característica
A1	Sã	Alteração ausente – não a vestígio de ter sofrido alterações físicas e químicas dos minerais principais.
A2	Pouco alterada	Apreciável oxidação das fraturas – apresenta sinais de alteração incipiente dos minerais primários; em geral é ligeiramente descolorida. Apresenta praticamente as mesmas propriedades físicas e mecânicas da rocha sã.
A3	Medianamente alterada	Apresenta-se com os minerais medianamente alterados; é bastante descolorida e suas propriedades físicas e mecânicas são inferiores as da rocha bastante resistente, quebrando-se com relativa dificuldade sob a ação do martelo.
A4	Muito Alterados	Matriz profundamente alterada – Apresenta-se com minerais muito alterados, às vezes pulverulentos e friáveis. Suas propriedades físicas e mecânicas são acentuadamente inferiores às da rocha medianamente alterada. Quebra-se facilmente com as mãos.
A5	Extremamente Alterados	Solos saprofíticos com vestígios da estrutura original.

- **Grau de Coerência:** definido como base em propriedades de tenacidade, dureza e friabilidade das rochas (Guidicini et al., 1972). É caracterizada de forma tátil-visual, através da apreciação da resistência que rocha oferece a pressão dos dedos (friabilidade), impacto do martelo (tenacidade) e o risco com lâmina de aço (dureza). Esta análise permite comparar, as variedades de um mesmo litotipo, bem como avaliar de modo qualitativo a ação do intemperismo sobre as rochas e as conseqüentes modificações em suas propriedades mecânicas. As denominações e siglas apresentadas na Tabela 7 foi proposta com base na resistência à escavação e à perfuração, sendo possível a realização desta análise em rochas que apresentem resistência abaixo de 20 Mpa.

Tabela 7 – Graus de coerência (Guidicini, & Nieble, 1984).

Siglas	Denominação	Característica
C1	Muito Coerente	<ul style="list-style-type: none"> - Quebra com dificuldade com o martelo e produz um som metálico; - Os fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por lamina de aço; - Superfície dificilmente riscada por lamina de aço.
C2	Coerente	<ul style="list-style-type: none"> - Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo - Fragmentos possuem bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lamina de aço; - Superfície riscável por lâmina de aço
C3	Pouco Coerente	<ul style="list-style-type: none"> - Quebra com facilidade com o martelo; - Bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos; - Laminas de aço provocam um sulco acentuado na superfície do fragmento
C4	Friável	<ul style="list-style-type: none"> - Esfarela ao golpe do Martelo; - Desagrega sob pressão dos dedos

- **Grau de Fraturamento:** parâmetro é dado pela quantidade de descontinuidades que intercepta um metro linear, do corte, afloramento ou testemunho de sondagem, os intervalos de associação das fraturas de acordo com o número de ocorrências na Tabela 8.

Tabela 8 – Graus de fraturamento (modificado de Oliveira, 1986).

Siglas	Espaçamento (mm)	Denominações
F1	<1	Ocasionalmente Fraturado
F2	1 a 5	Pouco Fraturado
F3	6 a 10	Medianamente Fraturado
F4	11 a 20	Muito Fraturado
F5	>20	Extremamente Fraturado

Como parâmetro fundamental, para a interpretação do grau de fraturamento, deve-se tomar como parâmetro a gênese da rocha, o método de determinação das fraturas – onde se estabelece se devemos considerar ou não as rupturas causadas pela ação mecânica – e as associar ao rumo das escavações ou da sondagem.

- **Condutividade Hidráulica:** Facilidade do escoamento da água através de um meio, avaliada através do coeficiente de permeabilidade (k). Em comparação com a dos solos, as rochas apresentam (em geral) uma permeabilidade muito baixa, com o seu valor elevando-se sensivelmente com o aumento da fissuração e do grau de alteração. Sendo que o nível de anisotropia da permeabilidade se torna muito dependente da orientação preferencial das descontinuidades.

Outro índice que influencia é o estado de tensão na rocha, onde associado ao aumento das tensões de compressão ocasiona o fecho das fissuras e consecutivamente a diminuição dos espaços para o fluxo da água, mas, a partir de um limite, o aumento das tensões pode iniciar o aparecimento de novas fraturas provocando um sucessivo aumento da permeabilidade.

A variação desta característica também pode variar com a pressão da água que circula nos seus vazios e/ou descontinuidades: o aumento da pressão da água tende a abrir as fissuras aumentando a permeabilidade.

A classificação da perda d'água específica (l/min.m/kg/cm²), calculada com o ensaio (Capítulo 3.2.1.4), devem ser agrupadas nos intervalos apresentados na Tabela 9.

A presença de água nas escavações pode ter diversos efeitos, devendo-se salientar:

- Pressão exercida pela água que reduz a estabilidade e o atrito entre as paredes;
- Aceleração da alteração das paredes;

Erosão dos solos da superfície e do preenchimento das discontinuidades que ocorrem como resultado da circulação da água o que pode levar ao aumento da abertura e diminuição das condições de estabilidade.

Tabela 9 – Perda d'água específica (ABGE, 1999)

Siglas	Perda d'água específica	Intervalos (l/min.m/kg/cm ²)
H1	Muito Baixa	0 – 0,1
H2	Baixa	0,1 – 1,0
H3	Moderada	1,0 – 3,0
H4	Alta	3,0 – 10,0
H5	Muito Alta	>10

- **Recuperação:** Método realizado em sondagens com recuperação contínua de amostra, sendo um indicador muito utilizado para informar a perda de material mais alterado do trecho amostrado, assim como a perda de material de preenchimento das fraturas e a identificação de vazios.

Este índice é calculado como a porcentagem correspondente, a metragem da somatória dos comprimentos dos testemunhos amostrados e da manobra (trecho perfurado em um avanço de sondagem), seguindo a seguinte relação:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} i}{L} \cdot 100\%$$

Onde R corresponde a recuperação, i ao comprimento de cada peça, e L o comprimento da manobra.

Embora não seja habitual a utilização deste parâmetro para as classificações do maciço, este dado pode ser um forte indicio das particularidades geomecânicas dos maciços, apesar de ser um valor que pode ser altamente, influenciado pela qualidade do equipamento de perfuração e pela experiência do operador da sonda.

- **Índice de qualidade da Rocha (“IQR”) ou “Rock Quality Designation” (“RQD”):** Método desenvolvido em 1967 por Deere, com o intuito de fornecer uma avaliação quantitativa do maciço rochoso, a partir de testemunhos obtidos por sondagens rotativas.

Este foi elaborado primariamente para utilização em escavações subterrâneas, entretanto, ao longo dos anos, alguns sofreram atualizações e adaptações, podendo então ser aplicados a taludes de escavações a céu aberto, sendo um índice de qualidade não subjetivo e quantitativo, que teve grande aceitação no meio técnico desde a sua origem.

Na década de 70 o sistema “RQD” se tornou um dos componentes dos sistemas de classificação de Bieniawski e Barton, sendo um parâmetro muito importante na obtenção do módulo de deformabilidade (Coon & Merritt, 1970).

Este método foi utilizado por muito tempo como critério básico para realização dos tratamentos em obras de engenharia, no entanto apresenta como falha, a realização de uma análise apenas quantitativa, sem considerar parâmetros qualitativos das discontinuidades como alteração, preenchimento, rugosidade e orientação das estruturas.

O “RQD” é o índice definido como sendo o percentual de segmentos intactos de rocha com comprimento superior a 10 cm, em relação ao comprimento total da manobra (trecho amostrado), como consta na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de obtenção do “RQD” (modificado de Deere & Deere, 1988).

Na Tabela 10, são apresentados os agrupamentos possíveis destas porcentagens associadas a uma qualificação do maciço. Como esta classificação representa a qualidade da rocha, a partir do exame dos testemunhos de sondagem, deve-se realizar o processo de amostragem da forma mais criteriosa possível.

Tabela 10 – Designação da qualidade (“RQD”) de acordo com o Sistema “Q” (Barton, 1974).

Descrição do Parâmetro		Valor(%)
Rock Quality Designation - “RQD”		
R5	Muito Mau	0-25
R4	Mau	25-50
R3	Médio	50-75
R2	Bom	75-90
R1	Muito Bom	90-100
Observação: 1. Quando o “RQD” for < 10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q		

Na Figura 12, é apresentado o quanto este critério pode ser falho (Assis, 2001), onde são apresentados valores de “RQD” idênticos para casos diferentes, onde se torna de

fundamental importância a utilização deste critério associado a valores do Grau de Fraturamento do trecho descrito.

Figura 12 – Valores de “RQD” idêntico para casos diferentes (Deere, 1989).

3.3. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A Classificação é o ato de eleger valores para as características representativas, do maciço, utilizados como parâmetros, para o avanço das escavações, definidas geralmente em função do tipo da obra, finalidade dos dados, natureza do meio rochoso e da etapa de projeto.

Pode-se considerar que o maciço é constituído essencialmente por rochas, descontinuidades e água, onde, as propriedades desse conjunto dependem, dentre outros fatores, da relação entre a escala da obra e o padrão das descontinuidades, onde expressar, quantitativamente, o comportamento de um maciço rochoso submetido a escavações, é uma tarefa muito difícil e nem sempre bem sucedida (Herget, 1988).

De forma geral, a aplicação de sistemas de classificação é um procedimento relativamente simples, mas é necessário da parte do usuário um entendimento claro dos parâmetros envolvidos e talvez algumas informações mais detalhadas do maciço (resistência das rochas, condições do fluxo d’água subterrâneo), que inicialmente podem não estar disponíveis. Assim, os estudos devem basear-se, sobretudo na utilização de classificações geomecânicas para avaliar a qualidade do maciço rochoso, o enquadrando em classes que dependem apenas de características geomecânicas (Ojima, 1982; Brady & Brown, 1985).

Os sistemas de classificação têm sido desenvolvidos desde 1879, com o objetivo principal de serem utilizados como auxílio na definição do sistema de suporte para obras subterrâneas e taludes, as principais metodologias existentes são listadas a seguir: Terzaghi (1946), Lauffer (1958), Deere et al. (1967), Wickham et al. (1972), Barton et al. (1974), Klengel (1978), Sancio & Brown (1980), Kirkaldie et al. (1988), Robertson (1988),

Bieniawski (1989), Laubscher (1977, 1990), Romana (1991), Scarpelli (1994) e outros, sendo que os sistemas de Laubscher (“MRMR”), Romana (“SMR”) e Robertson são considerados extensões do sistema “RMR” de Bieniawski (Hoek, 2007).

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

No caso de climas tropicais, a maior intensidade da alteração mineralógica introduz um efeito adicional na variabilidade dos maciços.

Ojima (1982), afirma que nunca existirá uma classificação universal e sim uma classificação adequada de um conjunto de condições, sendo assim esta universalidade deve estar na metodologia de elaboração das classificações adotadas.

Com estes parâmetros podem ser estabelecidas as unidades, zonas ou compartimentos que correspondam a classes de maciço (graduando da mais favorável a menos favorável), estas são estabelecidas de acordo com a variação e integração dos parâmetros eleitos escolhidos de maneira a permitir dar ou inferir o maior número de características possíveis.

Monticeli (1983) considera que a atribuição de uma única classificação para um maciço, é um tanto quanto subjetiva, refletindo normalmente em soluções mais conservadoras. Onde as metodologias para classificação dos maciços rochosos têm se revelado muito eficientes para o caso de obras subterrâneas (Bieniawski, 1973, 1976; Ojima, 1982).

Gama et al. em 1976, estabelecem que em fundações de barragens, devido a falta de uma classificação funcional específica para estas estruturas, têm se apresentado, com o passar dos anos, uma série de problemas, pois as classificações que predominantemente tem origem em obras subterrâneas, nem sempre retratam convenientemente as necessidades do projeto. Sendo observado este fator ainda relevante em nosso século, mesmo com o surgimento de novas classificações e suas atualizações durante os anos.

De um modo geral uma classificação, segundo Serra & Ojima (1998), deve contemplar os seguintes fatores:

- Objetividade, onde o critério adotado deve ter apenas um significado;
- Confiabilidade, fornecer dados verificáveis e reproduzíveis dentro de uma margem de erro aceitável;

- Validade, os dados devem ser compatíveis com aqueles obtidos por algum outro método independente;
- Sensitividade, o método deve reproduzir diferenciações mensuráveis em unidade compatível com a natureza do fenômeno;
- Utilidade e simplicidade operacional.

Francis & Rocha (1998) sugerem que as classificações devam ser diferenciadas nos trechos em que as escavações são realizadas sendo estas em rochas muito coerentes ou friáveis. No primeiro caso, o comportamento geomecânico é mais influenciado pelas discontinuidades do que pelas características da rocha. Para as rochas friáveis, a situação é oposta, sendo o comportamento geomecânico condicionado, principalmente, pela resistência do maciço.

Pode-se afirmar que a maioria das classificações tem a pretensão de atingir um caráter definitivo e global dos aspectos geotécnicos e geomecânicos para serem usados como suporte para as definições de tratamento e da estabilidade dos maciços rochosos.

Bieniawski (1989) cita os três principais benefícios da classificação do maciço:

- Assegurar a qualidade das investigações ao exigir o mínimo de dados de entrada para estabelecermos os parâmetros de classificação;
- Prover informações quantitativas para o projeto;

Permitir o melhor julgamento do ponto de vista da engenharia e uma comunicação no projeto mais efetivo.

Sendo assim, para uma classificação se tornar funcional, é necessário que determinadas características devam ficar claras e devidamente ordenadas onde as unidades que apresentem um comportamento distinto sejam diferenciadas. Onde uma adequada classificação geológico-geotécnica, pode habilitar a uma definição de processos de construção mais econômicas e seguras. Podendo ser definidos em fases de projeto os tipos de suporte provisório e definitivo, evitando-se assim, gastos desnecessários, atrasos na obra e eventuais acidentes.

Na opinião de Ojima (1982), a análise detalhada das classificações existentes sempre permite apontar alguma deficiência. Alguns autores recomendam, devido às possíveis falhas nestas classificações, a utilização de mais de um método, para possibilitar a identificação destas possíveis lacunas.

As classificações apresentam alguns problemas e limitações:

- Os parâmetros de classificação e pesos são aplicados universalmente sem considerar as características específicas do maciço e do projeto;
- As propriedades mais complexas dos maciços, em particular a sua anisotropia e o seu comportamento ao longo do tempo, não podem ser descritos por um só valor;
- Existem inúmeras combinações possíveis para cada sistema para a obtenção de um índice geomecânico, podendo atingir o mesmo valor final da classificação;
- Não consideram, em alguns casos, o mecanismo de ruptura, deformação e interação entre a rocha e o suporte;
- Os parâmetros utilizados para avaliação não são suficientes para escolher parâmetros de projeto e de suporte;
- Não existe inter-relação entre os parâmetros, que traduzam a influência da variação de um parâmetro nos demais;
- Não promovem a análise e a correta apreciação das condições do maciço rochoso, em particular a aplicação em meios heterogêneos, o que pode resultar num dimensionamento inadequado (com exceção do sistema “GSI”).

Os sistemas de classificação de maciços rochosos mais utilizados como parâmetros de escavação na engenharia geológica brasileiras são:

- “*Rock Mass Quality*”- “Q”: elaborado por Barton, Lien & Lunde em 1974 e atualizada por Barton & Grimstad (1994);
- “*Rock Mass Rating*”- “RMR”: elaborado por Bieniawski em 1973 atualizado pelo mesmo autor em 1989 e reeditado por Romana em 1991;
- “*Geological Strength Index*”- “GSI”: idealizado por Hoek & Brown (1980) e com atualizações e desenvolvimento de novos critérios e equações em 1997, estendendo-se para rochas heterogêneas em 2002 por Marinos & Hoek.

Tanto o “Q” como o “RMR” se utiliza de parâmetros geológicos, geométricos e de solicitações do projeto de engenharia, com o objetivo de obter um valor quantitativo, que descreva a qualidade geomecânica do maciço estudado. O “GSI” trata-se, de um índice facilmente obtido através de análises visuais do maciço estudado e a aplicação dos gráficos propostos pelos autores.

Sendo assim alguns autores recomendam adaptações nas classificações existentes para a adaptação ao maciço de forma a reduzir o nível de incerteza na sua aplicação.

No entanto deve ser ressaltado que os sistemas de classificação geomecânicas não devem ser vistos como substitutos para as solicitações do projeto de engenharia, devendo este fazer parte, da concepção original. Sendo assim, as classificações agrupadas com a análise observacional e a analítica, se tornam os principais recursos disponíveis para a aplicação das características geomecânicas aos projetos de escavação (Bieniawski, 1988).

3.3.1. Barton – “Quality” - “Q”

Em 1974, Barton et al. propuseram um índice denominado “Quality”, para a determinação das características do maciço rochoso e o suporte requerido. Os parâmetros considerados em sua classificação são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros adotados para a obtenção do índice de qualidade do sistema “Q” (Barton, 1974).

<i>Índices</i>	<i>Associações</i>
“RQD”-Índice de Qualidade de Rocha	“RQD”/Jn – dimensões dos blocos;
Jn – Índice de influência do número de famílias de fraturas	
Jr – Índice de rugosidade das fraturas	Jr/Ja – resistência ao cisalhamento entre blocos
Ja – Índice de alteração das paredes de fraturas	
Jw – Índice de influência da ação da água subterrânea	Jw/SRF – tensão existente nos maciços rochosos
SRF – Índice de influência do estado de tensões do maciço	

Em 1994, Barton & Grimstad, atualizaram a classificação, a tornando-as mais práticas e modernas. O método “Q” como é conhecido, é calculado por meio de seis parâmetros determinados a partir da análise dos testemunhos de sondagem ou pelo mapeamento geológico-geotécnico das escavações.

Segundo Hoek & Brown (1980), a aplicação do sistema “Q” tem como grande impedimento os maciços constituídos por rochas brandas, resultando em resultados insatisfatórios quando aplicados diretamente. Sendo que esta classificação promove a obtenção de melhores resultados quando aplicados a maciços fraturados constituídos por rochas duras.

É importante que neste método sejam desconsideradas a orientação das descontinuidades, onde a classificação, para os trechos dominados por aspectos estruturais mais marcados, deve ser necessário considerá-las de forma isolada posteriormente ao valor final da classificação, assim como a geometria e a posição escavações (Hoek & Brown, 1980).

Para a obtenção destes valores, são realizados os procedimentos de análise do maciço, aplicando-se uma sistemática descritiva utilizando como base os parâmetros de designação da qualidade.

O “RQD” apresentado no capítulo 3.2.2.3 (p.39), índice das famílias de juntas “Jn” (Tabela12), índice de rugosidade das juntas “Jr” (Tabela 13), grau de alteração das discontinuidades “Ja” (Tabela 14), índice de percolação das juntas “Jw” (Tabela 15) e fator de redução de tensões “SRF” (Tabela 16).

Tabela 12 – Índice das famílias de juntas “Jn” - sistema “Q” (Barton, 1974).

<i>Descrição do Parâmetro</i>		<i>Valor</i>
<i>Número de grupos de discontinuidades</i>		<i>Jn</i>
<i>“Join set number”</i>		
A.	Nenhuma ou poucas discontinuidades presentes	0,5-1,0
B.	Uma família de discontinuidades	2
C.	Uma família mais discontinuidades esparsas	3
D.	Duas famílias de discontinuidades	4
E.	Duas famílias, mas discontinuidades esparsas.	6
F.	Três famílias de discontinuidades	9
G.	Três famílias mais discontinuidades esparsas	12
H.	Quatro ou mais famílias, discontinuidades esparsas, maciços muito fraturados.	15
I.	Rocha fragmentada, tipo terroso.	20
Observação: 1. Nas intersecções utilizar $3 \times Jn$ / 2. Nas embocaduras utilizar $2 \times Jn$.		

Tabela 13 – Índice de rugosidade das juntas “Jr” - sistema “Q” (Barton, 1974).

<i>Descrição do Parâmetro</i>		<i>Valor</i>
<i>Tipo de Rugosidade das discontinuidades</i>		<i>Jr</i>
<i>“Join roughness number”</i>		
a) Contato entre as paredes de rocha das discontinuidades		
b) Contato entre as paredes de rocha com espaçamentos menores que 10 cm		
A.	Juntas descontinuas	4
B.	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas.	3
C.	Descontinuidades suaves e onduladas	2
D.	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5
E.	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas.	1,5
F.	Descontinuidades lisas, planas.	1,0
G.	Descontinuidades polidas, planas.	0,5
c) Não há contato entre as parede de rocha		
H.	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessas de modo a impedir o contato entre as paredes	1,0
I.	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contato entre as paredes	1,0
Observação: 1. As descrições dos itens a) e b) referem-se a escalas de amostragens de pequena e média dimensão, respectivamente. / 2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio das famílias de discontinuidades mais relevantes for maior que 3,0 m. / 3. Jr igual a 0,5 pode ser usado para discontinuidades polidas e planas contendo lineações, se estas estiverem orientadas na direção da menor resistência.		

Tabela 14 – Grau de alteração das descontinuidades “Ja” - sistema “Q” (Barton, 1974)

Descrição do Parâmetro		Valor	
Alteração das descontinuidades “Join alteration/reduction”		Ja	Φ , (°) aprox.
a) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A.	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo)	0,75	-
B.	Paredes não alteradas, somente com leve descolamento	1,0	25-35
C.	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas alteradas não brandas	2,0	25-30
D.	Paredes com partículas siltsas ou areno-argilosas	3,0	20-25
E.	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo, tais como caulim, mica, gesso, talco, clorita, grafite, etc., e pequenas quantidades de argilas expansivas	4,0	8-16
b) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F.	Paredes com partículas de areia e rochas decompostas, etc	4,0	25-30
G.	Descontinuidades com preenchimento argiloso bem consolidado (contínuo, mas com espessura <5mm)	6,0	16-24
H.	Descontinuidade com preenchimento argiloso pouco consolidado (contínuo, mas com espessura < 5mm)	8,0	12-16
I.	Descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo, como por exemplo, montmorilonita (contínuo, mas com espessura < 5 mm); o valor de Ja depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc.	8,0-12,0	6-12
c) Não há contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J.	Zonas ou camadas com rochas desintegradas ou fragmentadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8,0-12,0	6-24
K.	Zonas ou camadas siltsas ou areno-argilosas, com pequenas frações de argila	5,0	-
L.	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10,0 ou 13,0 -20,0	6-24
Observação: Os valores do ângulo de atrito residual (Φ) devem considerar-se como um guia aproximado das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração.			

Tabela 15 – Índice de percolação das juntas “Jw” - sistema “Q” (Barton, 1974).

Descrição do Parâmetro			Valor		
Percolação de água nas juntas “Join water reduction”			Ensaio de Perda d’água	Jw	Pressão da água aprox. (MPa)
A.	Escavações secas ou fluxo menor que 5 l/min localmente		H1	1,0	<0,1
B.	Fluxo médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades		H2	0,66	0,1-0,25
C.	Fluxo ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento		H3	0,5	0,25-1,0
D.	Fluxo ou pressão elevada, com considerável retirada do preenchimento das descontinuidades		H4	0,3	
E.	Fluxo excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo		H5	0,2-0,1	>1
F.	Fluxo excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento		Artesianismo	0,1-0,05	
Observação: Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais; o parâmetro Jw deverá ser aumentado caso sejam efetuados drenagens. Os resultados apresentados no Item Ensaio de Perda d’água são expostos para aplicação do método em dados provenientes de sondagens rotativas.					

Tabela 16 – Fator de redução de tensões “SRF” - sistema “Q” (Barton, 1974).

Descrição do Parâmetro		Valor		
Fator de redução de tensões “Stress Reduction Factor”		SRF		
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas				
A.	Zonas de fraqueza freqüente, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente, maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas as profundidades)	10,0		
B.	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação ≤ 50 m)	5,0		
C.	Zonas de fraqueza individuais contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação > 50 m)	2,5		
D.	Númerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E.	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades de escavação > 50 m)	5,0		
F.	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	2,5		
G.	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida	5,0		
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha			σ_c / σ_1	σ_t / σ_1
H.	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	>200	>13
I.	Tensões médias	1,0	200-10	13-0,66
J.	Tensões altas, estruturas rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5-2,0	10-5	0,66-0,33
K.	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5-10	5-2,5	0,33-0,16
L.	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10,20	<2,5	<0,16
c) Rocha fragmentada, plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M.	Pressão moderada da rocha fragmentada	5-10		
N.	Pressão elevada da rocha fragmentada	10-20		
d) Rochas expansivas: atividade química expansiva devido à presença de água				
O.	Pressão de expansão moderada	5-10		
P.	Pressão de expansão elevada	10-15		
Observações: 1- Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciam a escavação sem a atravessarem / 2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência de matriz rochosa é então pouco significativa. Em maciços muito pouco fraturados e sem argila.				

Com a obtenção destes dados obtemos a qualidade – “Q” do maciço rochoso nos utilizando da seguinte expressão:

$$Q = (RQD/J_n) * (J_r/J_a) * (J_w/SRF)$$

É possível a obtenção dos valores designados como “Excavation Support Ratio” conhecido pelas siglas “ESR”, que é um índice de segurança aplicado principalmente em obras subterrâneas onde se estabelece para uma avaliação do maciço associado, um determinado fator de segurança (Tabela 17).

Este dado é cruzado com os valores obtidos de “Q”, para a determinação do suportes (tratamentos) necessários para a contenção de uma potencial instabilidade das escavações.

Tabela 17 – Índice de segurança “ESR” - Sistema “Q” (Barton, 1974).

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

O valor de “Q” pode variar entre 0,001 e 1.000, sendo o maciço classificado em nove classes. Segundo Bieniawski (1976), este sistema elaborado por Barton, Lien e Lunde, representa uma grande contribuição para as classificações do maciço por ter um grande embasamento histórico (qualitativo e quantitativo), ser um sistema que se utiliza de dados de partida qualitativos e de fácil aplicação. Na Tabela 18 são mostradas as categorias de maciço em função do valor do índice “Q” obtido.

Tabela 18 – Categoria do maciço rochoso- Sistema “Q” (modificado de Barton, 1974).

Categoria do Maciço	“Q”
Excepcionalmente ruim	0,001 – 0,01
Extremamente ruim	0,01 – 0,1
Muito ruim	0,1 – 1
Ruim	1 – 4
Regular	4 – 10
Bom	10 – 40
Muito bom	10 – 100
Extremamente bom	100 – 400
Excepcionalmente bom	400 – 1.000

3.3.2. Bieniawski – “Rock Mass Classification” - “RMR”

Em 1973, Bieniawski, publica “*Engineering Classification Rock Masses*”, se baseando na elaboração em de uma vasta experiência colhida em diversas escavações, é apresentada a classificação denominada de “*Rock Mass Rating*”, ou apenas “RMR”.

Durante o passar dos anos este método foi aperfeiçoado por diversos autores, em 1989 o próprio Bieniawski apresentou uma atualização para classificação, apresentada anteriormente, onde foram assimiladas as diversas contribuições propostas e as novas experiências do próprio autor durante este intervalo. Onde foi definido, que sua classificação, deveria ter como objetivo central:

- Caracterizar os parâmetros condicionantes do comportamento do maciço;
- Compartimentar em classes o maciço separando as qualidades distintas;
- Estabelecer parâmetros para compreensão das características do maciço;
- Prover dados quantitativos para o projeto geomecânico;
- Servir de banco de dados para procedimentos a serem realizados na obra e como referência para futuras escavações.

No entanto, Hoek & Brown (1980) afirmam que por ter sido desenvolvido para a aplicação em túneis rasos em rocha dura e fraturada, o sistema “RMR” não fornece resultados satisfatórios quando aplicado a rochas que apresentam condições de ruptura lateral devido a altas tensões, expansão ou fluência.

Mas apesar destas limitações, o sistema é de considerável utilidade na tomada de decisões práticas difíceis e sua utilização no campo é simples.

A classificação é baseada no princípio da atribuição de pesos aos parâmetros que Bieniawski considerou mais significativas para o comportamento dos maciços rochosos. Baseado na soma dos pesos, cujo valor máximo é 100, o que constitui um índice, que corresponde a uma das cinco classes de qualidade de maciço estabelecido pelo autor (Oliveira & Brito, 2000).

A somatória dos pesos atribuídos a cada um dos parâmetros constitui um índice, usualmente designado por “RMR”, ao qual corresponde a uma das cinco classes de qualidades de maciços. Os parâmetros utilizados para esta definição estão listados a seguir:

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

A Tabela 19 permite atribuir pesos relativos aos parâmetros de avaliação (com exceção da orientação relativa das descontinuidades / escavação), através da soma dos valores característicos atribuídos.

O peso relativo às condições das descontinuidades no item 4 da Tabela 19, caso se possa realizar uma melhor caracterização destas estruturas, devem ser determinado, através da soma dos cinco parâmetros característicos apontadas na Tabela 20.

Tabela 19 – Classificação geomecânica de Bieniawski - “RMR” (Bieniawski, 1989)

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO COM PESOS RELATIVOS									
Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da Rocha Intacta (MPa)	Índice de compressão puntiforme	> 10	4 – 10	2 – 4	1 - 2	Compressão uniaxial preferido		
		Resistência à compressão simples	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5- 25	1- 5	<1
	PESOS		15	12	7	4	2	1	0
2	“RQD” (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
	PESOS		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das juntas		> 2 m	0,6 a 2 m	20-60cm	6 - 20 cm	< 6 cm		
	PESOS		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfície muito rugosa, não contínua, fechadas, paredes duras.	Superfície pouco rugosa separação < 1 mm. Paredes duras	Superfície pouco rugosa, separação <1 mm. Parede. moles	Superf. estriada ou preenchim. < 5 mm ou abertura de juntas 1 - 5 mm. Juntas contínuas.	Preenchimento mole 5 mm ou abertura de juntas > 5 mm Juntas contínuas		
	PESOS		30	25	20	10	0		
5	Nível de Água	Infiltração em 10 m de comp. de túnel (l/min)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		pressão d'água na junta tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condição Geral	Completamente seco	Umidade (água intersticial)	Úmido	Gotejando	Fluxo contínuo (Probl. grave de água)		
	PESOS		15	10	7	4	0		

Tabela 20 – Classificação das condições das descontinuidades - “RMR” (Bieniawski, 1989).

CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES – “RMR” - COM PESOS RELATIVOS					
Comprimento da descontinuidade (persistência)	<1m	1-3 m	3-10 m	10 – 20m	>20 m
PESOS	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	<0,1	0,1 – 1,0 m	1 – 5 m	> 5 m
PESOS	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito Rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
PESOS	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Mole < 5 mm	Mole >5 mm
PESOS	6	4	2	2	0
Alteração	Não-alterada	Pouco alt.	Moderada	Alta	Decompоста
PESOS	6	5	3	1	0

A orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação traduz-se em um peso que constitui um fator corretor da somatória e é determinado através da Tabela 21.

Tabela 21 – Classificação geométrica das descontinuidades - “RMR” (Bieniawski, 1989).

EFEITOS DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES – “RMR” - COM PESOS RELATIVOS						
Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0-20°
Abertura da estrutura no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45°-90°	Inclinação 20°-45°	
Inclinação 45°-90°	Inclinação 20°-45°	Inclinação 45°-90°	Inclinação 20°-45°	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Indiferente	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

A classificação explícita das atitudes das descontinuidades estruturais como favorável ou desfavorável basta para a maioria dos propósitos práticos, porém tal sistema não é adequado caso o comportamento do maciço rochoso seja dominado por aspectos estruturais, sendo então necessário considerar a geometria do maciço rochoso e da escavação.

A Tabela 22 classifica o maciço rochoso em cinco classes de acordo com o valor do intervalo em que se encontra índice “RMR”, dando a indicação da qualidade do maciço.

Tabela 22 – Classe do Maciço - “RMR” (Bieniawski, 1989)

CLASSE DO MACIÇO À PARTIR DA SOMA TOTAL DOS PESOS					
Somatória dos Pesos Relativos	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classes	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Muito ruim

São fornecidas na Tabela 23, estimativas relativas às características de resistência do maciço rochoso, nomeadamente, a coesão e o ângulo de atrito.

Tabela 23 – Parâmetros geomecânicos do maciço “RMR” (Bieniawski, 1989)

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO MACIÇO					
CLASSE	I	II	III	IV	V
Coesão do maciço (kPa)	> 400	300-400	200 – 300	100 - 200	< 100
Ângulo de atrito do maciço (°)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	> 15

Este sistema fornece informações suficientes para acessar realisticamente os fatores relevantes a estabilidade da escavação. Enfatiza a orientação e a inclinação das estruturas sem, considerar a tensão natural do maciço (Hoek & Brown, 1980).

3.3.3. Hoek & Brown - “Geological Strength Index” - “GSI”

Em 1994 Hoek & Brown apresentam os parâmetros para a determinação das constantes de sua equação, através de um sistema de classificação denominado de “*Geological Strength Index*” - “GSI”, que fornece um parâmetro geomecânico que varia de 0 a 100. Este sistema foi desenvolvido durante muitos anos, depois de diversas discussões ao redor do mundo nas obras em que Hoek trabalhou.

Foi levado cuidadosamente em consideração em cada quadro desenvolvido, o teor preciso e os pesos relativos para cada combinação estrutural associados às condições de superfície, respeitando as condições geológicas que existam na natureza (Hoek & Brown, 2007).

Nesta classificação o autor considera, além da resistência dos blocos que constituem o maciço, o comportamento geomecânico que é controlado pelas condições de superfície (rugosidade, alteração, etc.) das fraturas.

Definido pelos autores em 1995, como sendo o sistema que tem o objetivo de obter parâmetros geomecânicos como as estimativas de redução da resistência sob as mais diversas condições geológicas.

Onde a resistência do maciço rochoso depende das propriedades da rocha intacta e da liberdade para os blocos deslizarem ou rolem sobre diferentes condições de tensão, governadas pela forma geométrica dos blocos e pelas condições das superfícies que definem suas faces.

De uma maneira geral, pode-se dizer que a resistência e a deformabilidade do maciço pode ser obtido por uma redução das propriedades referentes da rocha intacta, levando-se em conta as características geológicas e geomecânicas.

A resistência de uma massa de rocha fraturada depende das propriedades dos fragmentos intactos e também da liberdade destes para deslizar e girar debaixo de condições de tensões diferentes. Esta liberdade é controlada pela forma geométrica dos pedaços de rocha intacta assim como as condições das superfícies que separam os fragmentos.

Fragmentos de rochas angulares com superfícies das discontinuidades limpas, ásperas resultarão em um maciço muito mais resistente que um que contém partículas arredondadas de material mais resistente e alterou o material, ou cimentação de blocos por óxidos que podem ficar mais resistentes do que a matriz.

Enquanto a reação ambiente do maciço é controlado por movimento de rotação dos elementos de rocha separadamente sem o cruzando das características estruturais como acamamentos e juntas, não haverá nenhuma direção de fraqueza preferencial.

Este índice de baseia-se em uma avaliação litológica, estrutura e as condições de superfícies das discontinuidades, na massa da rocha, é calculada através de exames visuais da massa de rocha exposta em escavações de superfície como rodovias, em emboques de túneis e em furos de sondagem.

Este “Índice de Resistência Geológico” é definido pela combinação de dois parâmetros geológicos fundamentais processados pela formação de blocos e pelas condições das discontinuidades, que complementam os aspectos geológicos principais que governam uma característica e sendo ambos índices geologicamente simples de serem obtidos e avaliados.

O sistema “GSI” é o único sistema de classificação de maciço que visa fornecer diretamente os parâmetros de resistência, de *Mohr-Colomb*, de Hoek-Brown, ou os dos módulos do maciço rochoso. Hoek et al. 2002 recomenda que o valor de “GSI” deva ser estimado através da Tabela 24 para maciços homogêneos.

Na determinação do “GSI” para maciços heterogêneos, frequentemente tectônicos que promovem alterações diferenciais entre rochas mais resistentes e suscetíveis a este fenômeno, sendo este um grande desafio para os profissionais desta área. Devido ao grande número de projetos em construção nestas massas, foram realizadas ao longo dos anos algumas tentativas, que têm sido aplicadas, para prover melhores ferramentas para a geologia de engenharia do que as disponíveis (Hoek, 2007). Uma destas é apresentada por Hoek et al. 2002 na Tabela 25.

Trata-se de um sistema simples e rápido, baseado em uma simples inspeção visual das condições geológicas onde orientações possivelmente desfavoráveis e a resistência da massa rochosa condicionam o fluxo de água, não devem ser desprezadas para a interpretação dos dados. Sendo que nestes casos os valores obtidos devem ser punidos e direcionados mais para a direita, onde apresentam condições de rochas menos resistentes.

Tabela 24 – Classificação “GSI” – “Geological Strength Index” (modificado de Hoek et al., 2002).

<p>Índice de resistência Geológica (GSI): De acordo com os condicionantes geológicos, marque o espaço apropriado no gráfico. E estime o valor do índice de resistência geológica (GSI) pelo contorno. condicionantes geológicos, marque o espaço apropriado no gráfico. E estime o valor do índice de resistência geológica (GSI) pelo contorno.</p>		Muito Bom: Muito áspero, sem umidade.	Bom: Áspero, úmido, com paredes oxidadas.	Intermediário: Lisa, moderadamente úmidas ou paredes alteradas.	Pobre: Superfície polida, molhada com cobertura por solos compactos ou fragmentos angulares de rocha	Muito Pobre: Superfície polida, molhada, coberta ou preenchida com argila.	
ESTRUTURAS		Condições da superfície das descontinuidades →
MACIÇO OU INTACTO: espécies de rochas intactas ou maciças in-situ, com descontinuidades esparsas.	Condições do Maciço Rochoso ↓	90			N/A	N/A
BLOCOS: partes associados em um maciço, constituído por blocos cúbicos formados por interseções de três descontinuidades diferentes		80
MUITOS BLOCOS: porções parcialmente associados, distribuídos em blocos de muitas faces angulares que forma quatro ou mais formas de juntas.		70
BLOCOS IRREGULARES: dobra com blocos angulares formados por algum tipo de intersecção a descontinuidades. Persistentes sobre planos ou xistosidade		60
FRAGMENTADO: pouca conexão, duramente destruído, misturado em sua massa por fragmentos angulares ou arredondados		50
LAMINADO/ TOSQUIADO: ausência de blocos devido ao fechamento dos espaços pequenos das descontinuidades ou xistosidades		40				
			30				
			20				
			10				
			N/A	N/A			

Tabela 25 – Classificação “GSI” – “Geological Strength Index” – (modificado de Hoek et al., 2002).

<p>Índice de resistência Geológica (GSI) para Massa de Rochas Heterogêneas e Sedimentares:</p> <p>De acordo com os condicionantes geológicos, marque o espaço apropriado no gráfico. E estime o valor do índice de resistência geológica (GSI) pelo contorno condicionantes geológicos, marque o espaço apropriado no gráfico. E estime o valor do índice de resistência geológica (GSI) pelo contorno.</p> <p>Classificação baseada nas estruturas, litologias e condições de superfícies das descontinuidades. Estas podem ser definidas através do cruzamento das descrições colocalizadas nas linhas e colunas do gráfico. Para realizar esta classificação localize no gráfico a posição que apresenta a condição do maciço e da descontinuidade correspondente ao identificado, e estime-se a média do GSI aproximado, onde se deve ressaltar que não é possível obter um dado preciso. Por exemplo se o resultado alcançado ficar entre 33 e 37 se torna mais realístico adotar um valor de GSI = 35. Nota-se que os critérios de Hoek e Brown, não são aplicados a estruturas de controle das descontinuidades. As orientações possivelmente desfavoráveis e a resistência da massa rochosa condicionada ao fluxo de água não devem ser desprezados pela interpretação dos dados. Sendo que nestes casos os valores devem ser punidos e direcionados mais para a direita onde apresentam condições com materiais menos resistentes.</p>	<p>Muito Bom: Muito áspero, sem umidade.</p>	<p>Bom: Áspero, úmido, com paredes oxidadas.</p>	<p>Intermediário: Lisa, moderadamente úmida ou paredes alteradas.</p>	<p>Pobre: Superfície polida, molhada com cobertura por solos compactos ou fragmentos angulares de rocha</p>	<p>Muito Pobre: Superfície polida, molhada, coberta ou preenchida com argila.</p>
<p>A - Camadas espessas e blocos de arenitos</p> <p>O efeito das camadas pelíticas contidas nas camadas planas é minimizado pelo confinamento da massa de rocha. Em túneis rasos ocorrem escorregamentos destas camadas planas que são controladas por estruturas locais desfavoráveis.</p>	70	60			
<p>B. Arenitos intercalados com siltitos</p>	50	40			
<p>C. Arenitos e siltitos em proporções iguais</p>					
<p>D. Siltitos com intercalações de Arenito</p>					
<p>E. Siltitos sem resistência ou argilito com lentes de Arenito</p>					
<p>C, D, E e G. A estrutura pode ser mais ou menos dobrado do que é apresentado na ilustração mas as deformações tectônicas mais aciniosas como falhas e perda de continuidade deve ser destacado para as categorias F e H</p>					
<p>G. Xistos pouco deformado siltosos ou argilosos com ou sem arenito intercalado</p>					
<p>H. Xistos argilosos ou siltosos com deformações tectônicas que formam estruturas caóticas com lentes de argila, onde as camadas areníticas são transformadas em pequenos blocos de arenito.</p>					
<p>→ Deformações decorrentes de esforços Tectônicos</p>					

3.3.4. Correlações entre os Sistemas “RMR”, “Q” e “GSI”

Correlacionar grandezas de natureza distinta é uma grande objetivo em vários campos do saber, mas que, no entanto deve ser aplicado com reservas. Usar correlações associadas a classificação geomecânica desvenda pelo menos duas possibilidades, a saber, permitir o cruzamento e a checagem de resultados oriundos de diferentes sistemas de classificação, e estimar a qualidade geomecânica e geotécnica de maciços rochosos.

Através do cruzamento de resultados oriundo da aplicação de diferentes sistemas de classificação em uma determinada obra é possível determinar qual sistema é mais adequado às condições locais, além de estabelecer correlações que podem facilitar a checagem de resultados em projetos futuros.

Convém observar que a utilização de correlações entre os sistemas de classificação geomecânicos devem ser feitas com precaução, pois os parâmetros adotados e a maneira como os mesmos são combinados para chegar ao resultado diferem-se caso a caso (Assis, 2001).

Goodman (1989), afirma que há controversias quanto a correlação entre estes sistemas de classificação geomecânica, pois os parâmetros adotados e a maneira como são combinados para chegar ao resultado diferem caso a caso. Sendo necessário ser vista com algumas ressalvas esta correlação, pois o único parâmetro em comum entre os sistema “Q” e “RMR” e a utilização do “RQD”.

No sistema “RMR”, além do “RQD”, também estão incluídos o espaçamento das descontinuidades e sua orientação, ao passo que o sistema “Q” considera apenas o número de famílias de descontinuidades. A orientação das descontinuidades é incluída implicitamente no sistema “Q”, uma vez que nele somente são consideradas a rugosidade e a alteração das famílias de descontinuidades mais desfavoravelmente orientadas.

A rugosidade e a alteração das descontinuidades são enfatizadas no sistema “Q”, mas não no sistema “RMR”, englobadas que são no parâmetro condições das descontinuidades (Barton, 1988). Por incluir o parâmetro resistência da rocha intacta à compressão simples, o sistema “RMR” geralmente produz resultados melhores que os sistema “Q”.

Em 1976 Bieniawski, propôs uma correlação, entre os sistemas de classificação “RMR” e o “Q”, após analisar 111 casos históricos em obras de diferentes partes do mundo,

onde depois de diversas tentativas de correlação entre os dois métodos estabeleceu-se a seguinte equação:

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

ou

$$\boxed{Q = \exp ((RMR-44)/9)}$$

Outros autores chegaram a outras equações, como Abad et al. (1983), que analisaram 187 casos principalmente na Espanha, originando a correlação:

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

Sofianos & Marinos (1991) sugere uma correlação entre os sistemas baseados em maciços compostos por calcários finamente laminados e xistos pelíticos fraturados:

$$\boxed{RMR = 20,2 \ln Q + 44,4}$$

Em terrenos de qualidade extremamente baixa e nos maciços rochosos muito fraturados, o sistema “Q” deve ser preferido, em detrimento do “RMR” (Hoek & Brown, 1980). Para o cálculo do “GSI” aproximou-se do uso do “RMR” na versão 1989 deduzindo-se 5 pontos do seu valor, segundo a seguinte equação:

$$\boxed{GSI = RMR_{89} - 5}$$

Onde o índice “GSI” considera o maciço seco e não faz correção devido a orientação das descontinuidades, visto que a pressão de água e a orientação das descontinuidades seriam consideradas nos cálculos de projeto.

Caso os valores de “RMR” fossem inferiores a 23, deve-se utilizar o sistema “Q”, que é da mesma forma que o “Q”, no entanto, desconsiderando os efeitos das tensões - “SRF” e o efeito da água subterrânea - “Jw”, na determinação do índice, por serem fatores já considerados em projeto, devendo ser calculado com a equação:

$$\boxed{Q' = (RQD/J_n)(J_r/J_a)}$$

O Valor do Índice Q pode ser usado para a obtenção do valor “GSI” da seguinte forma:

$$\boxed{GSI = 9 \ln Q + 44}$$

Por outro lado as classificações podem ser usadas para elaborar uma visão da composição e características do maciço, além de prover estimativas de:

- Propriedades de resistência – Critério de Hoek & Brown (1998);

O critério de Hoek & Brown é aplicável de forma confiável para maciços intactos ou muito fraturados que preferencialmente possam ser considerados homogêneos e isotrópicos. Sendo os resultados obtidos nestas condições o sistema que obtém valores com boa aproximação da realidade, pois é um sistema baseado mais fortemente em observações geológicas do que em números, mas não deixa de ser ainda empírico.

O componente mais importante deste sistema de Hoek & Brown para massas de rocha é o processo ao qual se obtém valores de resistência compressão uniaxial e as constantes do material, de forma rápida no próprio sítio podendo-se tomar decisões rápidas “sem ter que recorrer a laboratórios” (Hoek et al., 2002). Estimar a qualidade geomecânica de um maciço rochoso é estimar sua resistência e sua deformidade. Este critério é aplicável tanto para rochas intactas quanto a maciços rochoso, fraturados.

Para tanto é realizada uma análise das propriedades de resistência da rocha intacta e introduzindo fatores para reduzi-lás, baseando-se nas características das descontinuidades dos maciços. Para facilitar uma correlação com os dados Hoek e Brown (1980) procurou-se estabelecer uma relação entre o critério empírico e as observações geológicas, através de classificações geomecânicas.

Como não se estabelece uma linearidade clara entre os dados Hoek & Brown em 1980, sugeriram uma curva para a envoltória de ruptura de maciços rochosos definida pela seguinte equação:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\sqrt{m\sigma_c\sigma_3} + s\sigma_c)^2$$

e

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{cd}}{\left(\frac{50}{d}\right)^{0,18}}$$

Onde:

- σ_1 = tensão efetiva principal maior na ruptura;
- σ_3 = tensão efetiva principal menor na ruptura;
- m = constante que depende exclusivamente do tipo litológico; e para o maciço rochoso é função tanto do fraturamento quanto do tipo litológico;
- s = Constante empírica, que para a rocha intacta assume um valor fixo igual a 1 e para maciço é função do grau de fraturamento;
- σ_c = Valor do ensaio de compressão uniaxial;

- σ_{cd} = tensão de dano por micro-fissuras (crescimento rápido de deformações radiais, próximo ao ponto máximo da deformação);
- d = diâmetro em milímetros.

Para rocha intacta se utiliza os resultados obtidos pelos ensaios triaxiais efetuados em laboratório, considerando-se $s=1$, já para maciços fraturados os parâmetros de m e s podem ser estimados através do valor “RMR” e “Q” (Hoek & Brown, 1988).

Hoek & Brown (1988), propõem constantes típicas (Tabela 26) para maciços perturbados (m' e s) e não perturbados constituídos (m e s) por vários tipos de rocha em função dos correspondentes valores “RMR” e “Q”.

O sistema “GSI” pode ser aplicado na determinação dos parâmetros do critério para maciços rochosos.

Tabela 26 – Valores típicos de das constantes do material (Hoek et al., 2002).

Classificação		Calcário Dolomito Mármore	Argilito Folhelho Ardóia	Quartzito Arenito	Basalto Diabásio Riodacito Andesito	Anfibólio Gabro Gnaiss Granito Diorito
AMOSTRA ROCHA INTACTA (tamanho de laboratório, s descontinuidade) “RMR” > 85 , Q>100	m	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0
	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	m'	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0
	s'	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
MACIÇO DE MUITO BOA QUALIDADE (rocha não perturbada, altamente compacta, com descontinuidades inalteradas de 1 a 3 m) $65 < \text{“RMR”} \leq 85$, $10 < Q \leq 100$	m	2,4	3,43	5,14	5,82	8,56
	s	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082
	m'	4,10	5,85	8,78	9,95	14,63
	s'	0,189	0,189	0,189	0,189	0,189
MACIÇO DE BOA QUALIDADE (rocha sã a levemente alterada, pouco perturbada com desc. espaçadas 1 a 3 m) $44 < \text{“RMR”} \leq 65$, $1 < Q \leq 10$	m	0,575	0,821	1,231	1,395	2,052
	s	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293
	m'	2,006	2,865	4,298	4,871	4,163
	s'	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205	0,0205
MACIÇO QUALIDADE RAZOÁVEL (varias famílias de descontinuidades algumas alteradas, espaçadas 0,3 a 1 m) $23 < \text{“RMR”} \leq 44$, $0,1 < Q \leq 1$	m	0,128	0,183	0,275	0,311	0,458
	s	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
	m'	0,947	1,353	2,030	2,301	2,383
	s'	0,00198	0,00198	0,00198	0,00198	0,00198
MACIÇOS BAIXA QUALIDADE (muitas descontinuidades 5 a 30cm, alteradas, preenchimento, saprolito compacto, limpo) $3 < \text{“RMR”} \leq 23$, $0,01 < Q \leq 0,1$	m	0,029	0,041	0,061	0,89	0,102
	s	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003
	m'	0,447	0,639	0,959	1,087	1,598
	s'	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019
MACIÇO MUITO BAIXA QUALIDADE (muitas descontinuidades < 5 cm, muito alteradas, preenchidas por saprolito com finos “RMR” ≤ 3 , $Q \leq 0,01$)	m	0,07	0,010	0,015	0,017	0,025
	s	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001
	m'	0,219	0,313	0,469	0,532	0,782
	s'	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002

Obs.: Os valores m' e s' para maciços perturbados e valores m e s para maciços não perturbados

- Módulo de deformabilidade do maciço.

Os ensaios de campo para determinação do módulo de deformabilidade “*In Situ*” diretamente consomem tempo, são bastante custosos e a confiabilidade e grau de exatidão dos resultados ainda assim são muito questionáveis.

O desenvolvimento de modelos empíricos para determinar o módulo de deformação do maciço rochoso (E_M) tem evoluído e surgido ao longo dos anos diversas propostas, por autores como Bieniawski (1978) o pioneiro nestes estudos, Barton et al. (1994), Hoek & Brown (1997) entre outros autores.

A deformabilidade de um maciço pode ser estimada através da correlação entre os resultados de ensaios de campo e de classificações através do sistema “RMR” para vários casos de estudo, o que permitam obter o módulo de deformação estática em Gpa de um maciço rochoso com a precisão superior a 80%, o que é suficiente para a sua aplicação (Bieniawski, 1978). No entanto há a necessidade de realizar ajustes para valores de “RMR” > 60, que correspondem a maciços rochosos de qualidade melhor:

$$E_M = 1,76 \text{ RMR} - 84,3 \pm 17,8 \quad \text{ou} \quad E_M = 2 \text{ RMR} - 84,3100 \pm 18,2$$

Bieniawski em 1988, propõe uma equação para maciços piores com maciços que apresentem “RMR” < 50:

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

Barton et al., em 1982 obteve aproximações se utilizando do seu método de classificação (“Q”) do maciço, onde pode ser obtido três intervalos distintos do módulo de deformação (E_M) que pode ser utilizado de acordo com as solicitações do maciço (Bieniawski, 1989):

$$E_{M\text{mínimo}} = 10 \times \log Q \quad \text{ou} \quad E_{M\text{médio}} = 25 \times \log Q \quad \text{ou} \quad E_{M\text{máximo}} = 40 \log Q$$

Hoek & Brown em 1997, propõe uma equação onde os parâmetros requeridos são a classificação do maciço e os dados de compressão simples do maciço (σ_c) maior que 100 MPa:

$$E_M = \sqrt{(\sigma_c/100)} 10^{(GSI-10)/40}$$

3.4. COMPARTIMENTAÇÃO E MODELAMENTO GEOLÓGICO - GEOMECÂNICO

A compartimentação e a criação de um modelo geológico são aspectos importantes para a otimização e a exposição da interpretação de todos os dados levantados e adotados durante a etapa de caracterização e classificação do sítio.

O Compartimentação do maciço rochoso deve ser entendido como o ato de estabelecer de forma descritiva ou através de gráficos bi ou tridimensionais, unidades que sintetizem de maneira clara e relevante os condicionantes geológicos, geotécnicos e geomecânicos importantes para a finalidade proposta em etapa de projeto em estudo, podendo apresentar como variáveis o perfil de intemperismo; geológica/litológica, geológico estrutural, geomecânica, geotécnica e demais aplicações.

Desta maneira, quando as unidades corresponderem a determinadas classes de maciço, trata-se da própria classificação do maciço rochoso. Por outro lado, a compartimentação e o estabelecimento de unidades geológico-geotécnicas que poderão ser feitas independentemente de critérios de classificação, através da triagem e síntese das informações levantadas na caracterização do maciço rochoso.

A execução das investigações conduz à elaboração de uma compartimentação do maciço rochoso a partir dos resultados obtidos, onde em uma caracterização bem fundamentada permite a realização de uma compartimentação do maciço rochoso se utilizando das classes ou unidades geológico-geotécnicas estabelecidas (Monticeli, 1983).

Segundo Camargo (1978) a definição dos parâmetros de classificação possibilitam fixar a variação e integrá-los as necessidades do maciço. Para o estabelecimento de uma compartimentação do maciço, são utilizados apenas os resultados da caracterização denominada como o "zoneamento interpretativo" (Monticeli, 1983).

Um dos aspectos importantes a se considerar na compartimentação de maciço rochoso é a litologia, pois a separação de unidades geológico-geotécnicas em locais onde ocorrem diversos tipos de rocha é relativamente mais simples, do que o estabelecimento de classes de maciço a partir de problemas inerentes a diferenças das resistências geomecânicas.

O estabelecimento de unidades geológico-geotécnicas, em vez de classes de maciços, vem em parte contribuir para facilitar os trabalhos, pois permite a análise do maciço rochoso, levando-se em conta todas as particularidades genéticas e estruturais presentes no maciço que venham a interferir na obra. A escala de apresentação de detalhes deverá ser função da

complexidade geológica local, do próprio conhecimento do meio físico, dos métodos de investigação utilizados e das solicitações da obra.

No estabelecimento dos parâmetros para obtenção de uma compartimentação, podem ser utilizados como referência a resistência do maciço, obtidos por meio de ensaios físicos e mecânicos em amostras de solo e rocha, assim como a disponibilidade de dados históricos e ensaios ou apenas de observações do sítio.

A modelagem é um sistema artificial, desenvolvido para representar as características principais de um sistema real, utilizado para fins de classificação, comparação e interpretação de dados. Este é responsável por otimizar grandes quantidades de informações em poucos termos ou em uma reprodução física ou gráfica, sendo está representativa do real, estimado a partir dos dados levantados, onde modelos são criados para a representação de uma determinada realidade, auxiliando na precisão do provável comportamento do maciço rochoso (Leite, 2004).

Os modelos podem ser classificados em conceituais, físicos e matemáticos (numéricos). Em geologia tradicionalmente se trabalha com modelos conceituais e atualmente os numéricos (3Ds) e em menor frequência os físicos vem sendo utilizados.

A utilização de modelos como ferramentas vem sendo utilizadas, desde as origens dos primeiros estudos geológicos (Leite, 2004). Estas podem ser realizados através de métodos convencionais, com representações espaciais em duas dimensões, obtendo-se os resultados esperados através de uma média ponderada das informações disponíveis, e estendidas a volumes de cubagem, como o método dos perfis padrão associando-se duas seções adjacentes (Houding, 1994).

A partir da década de 60, auxiliados pelo avanço computacional, se difundiram os métodos numéricos, que envolvem condições e parâmetros mais complexos e próximos da realidade, como: a consideração da forma tridimensional das escavações e os diversos aspectos geológicos relativos aos maciços rochosos, apresentando por isso maior aplicabilidade e atratividade (Leite, 2004).

Nas últimas décadas, os modelos matemáticos (numéricos / computacionais), têm se desenvolvido, sendo amplamente utilizados, na geologia aplicada a mineração, hidrogeologia e petróleo, e esta se intensificando de forma gradual na geologia geotécnica (Hoek, 2007).

Segundo Hack et al., 2006, a implementação prática destas ferramentas na área de geotecnia se dá de forma lenta, devido aos seguintes fatores:

- Em estudos de problemas geotécnicos nem sempre existem dados de entrada

em quantidade suficiente para que sejam utilizados softwares. Neste caso, deve-se ter cautela, pois a utilização de programas 3D complexos fazendo-se uso de uma quantidade limitada de dados pode transformar a tarefa em subjetiva, caindo-se novamente nas questões anteriores;

- Os programas em geral não executam todas as atividades necessárias em um projeto geotécnico, sendo necessário o uso de um ou mais programas, e ainda compatibilizar as saídas;
- A maioria dos programas de modelagem ainda não consegue representar de forma eficiente a geologia estrutural da região estudada, limitando-se somente à modelagem de falhas, que em geral são estruturas de grande escala, ficando as de menor escala (ex. foliações) excluídas do modelo, porém estas são de suma importância em análises de estabilidade das estruturas superficiais e subterrâneas.

Atualmente, o modelo geomecânico tornou-se elemento fundamental para análises de estabilidade de obras geotécnicas, porém sua elaboração ainda depende da experiência do geólogo ou engenheiro geotécnico, tornando a tarefa altamente subjetiva, na medida em que esta envolve interpretação de mapas e seções geológicas e geotécnicas, mapeamentos de descontinuidades, estudos hidrogeológicos, e visualização deste conjunto de informações.

Juntamente com as ferramentas computacionais, nos últimos anos tem se desenvolvido de forma considerável a geoestatística, que pode ser muito útil nos estudos que envolvem a modelagem geológica e geomecânica dos maciços rochosos, com a aplicação de técnicas de interpolação para estimativa de propriedades.

São requeridas estimativas precisas dos limites estudados e de suas condições, para o desenvolvimento de modelos próximos ou representativos da realidade sendo imprescindível uma grande exatidão na geração dos dados, para que representem adequadamente a área estudada (Leite, 2004).

Por este motivo, ao utilizar-se destes estudos, deve-se ter em paralelo, a realização de levantamento das informações superficiais (geológicas e topográficas), subsuperficiais (direta e indireta) e ensaios laboratoriais.

O Modelamento geológico-geotécnico corresponde ao ato de estabelecer parâmetros ou índices mecânicos quantitativos às unidades ou classes de maciço, para utilização direta no projeto.

Estes Modelos têm sido feitos principalmente para estudos de estabilidade do conjunto estrutura-fundação, quando deve retratar convenientemente as feições geológicas e as características físicas e mecânicas do maciço rochoso que interferem, direta ou indiretamente, no comportamento da obra. Em barragens, uma denominação mais geral, para incluir outras finalidades como materiais de construção, tratamento de fundação e estabilidade de ombreiras, seria algo como “classificação ou modelo de projeto”.

Os modelos podem ter como resultados característicos, com a representação de diferentes materiais, aplicação de tensões/deformações não lineares, comportamentos plástico/elástico, caracterização de juntas, entre diversas outras características de interesse que podem ser aplicadas ao maciço.

Uma prática muito importante na evolução dos modelos durante os estudos e principalmente durante as escavações é a atualização a partir da aquisição de novos dados, que provém de novas investigações, e do mapeamento das escavações (Turner, 2006).

4. ÁREA DE ESTUDO

Os estudos foram realizados em um trecho do rio Pelotas, entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, que corre no geral da direção SE para NW, com inúmeros meandros estruturais, denunciados pelo forte controle estrutural da drenagem. Pode ser observada na imagem de satélite local onde os lineamentos são bem marcados, associados às drenagens, não sendo frequentes os altos topográficos na região (Figura 13).

Figura 13 – Imagem de Satélite da área afetada pelo empreendimento (Embrapa)

O maciço é formado por rochas extrusivas dos grandes derrames basálticos da Bacia do Paraná de idade cretácea pertencentes à Formação Serra Geral, constituídos predominantemente por basaltos, no entanto nas porções topograficamente mais elevadas estes derrames apresentam uma variação para rochas extrusivas ácidas (riodacitos).

4.1. ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. Geomorfológicos

A região está inserida no domínio morfoestrutural da unidade do Planalto das Araucárias, que é caracterizado por vasto planalto monoclinal, com leve inclinação para oeste e elevações que podem atingir cotas superiores a 1.500 m. Nesta região os rios formadores das bacias do Iguaçu e do Uruguai, são em sua grande maioria estruturas que correm segundo a

direção do mergulho das camadas, de acordo com declive do relevo condicionado pelos derrames (Guerra, 1975).

O relevo é formado predominantemente por regiões planas cortadas por lineamentos com desníveis superiores a 250 m, que formam vales profundos, predominantemente em formas de “V” associada a drenagens com um leito estreito e com patamares de vertentes planos ou levemente convexizados (Foto 17 e Foto 18).

Foto 17 – Imagem típica do relevo próximo as grandes drenagens (vista da porção inferior).

Foto 18 – Imagem típica do relevo próximo as grandes drenagens (vista da porção superior)

As drenagens têm os seus cursos em áreas condicionadas por lineamentos muito marcados formados principalmente por intenso fraturamento e pela disjunção das seqüências dos derrames que desenvolvem pelas inflexões bruscas e freqüentes segmentos retilíneos formando lajedos, corredeiras, saltos e quedas que podem ser observadas na imagem de satélite apresentadas na Figura 13.

Na Foto 19, é apresentado do local dos estudos onde se pode notar que o vale do rio se encontra bem encaixado, com ombreira bem inclinada o topo plano, seguindo o padrão morfológico local.

Foto 19 – Vista do vale do rio Pelotas - Local do estudo (montante para jusante na esquerda e topo da ombreira esquerda na direita).

A área em estudo caracteriza-se, como sendo uma região plana, com grandes entalhes erosivos associados às drenagens, marcada na área de estudo pelo rio Pelotas e seus afluentes, que apresentam elevações variando de 800 m a mais de 1.200 m.

Nesta região a geomorfologia tem um papel fundamental para a compreensão das condições de fundação, o rio ao escavar o seu leito (erosão hidráulica) aliviou as tensões na direção da tensão principal menor (perpendicular à encosta), mas não na direção da crista.

O processo de erosão dos vales dos rios é relativamente rápido e as altas tensões existentes não são totalmente aliviadas, permanecendo no maciço, onde os processos de desconfinamento vertical ou lateral passam a apresentar fraturas de alívio de considerável continuidade (comum em rochas basálticas).

Figura 14 – Imagem de Satélite do local de implantação do eixo (Google 2009).

O desconfinamento das massas rochosas é um processo ativo e ininterrupto e que evolui rapidamente a partir de entalhes fluviais, formando em um curto espaço de tempo, profundos vales alongados. Nessas condições, a liberação das tensões se dá através de juntas de alívio praticamente verticais, paralelas às paredes dos vales (Guidicini, G. & Nieble 1984).

4.1.2. Geológicos

O sítio está situado geologicamente na Bacia Sedimentar do Paraná, que tem uma área de aproximadamente $1,6 \times 10^6$ km², englobando porções territoriais do Brasil, Paraguai,

68

A Bacia é de origem intracratônica, de geometria ovalada, com estruturas tectônicas e sedimentares típicas preservadas, característica singular relacionada ao seu posicionamento geotectônico atual, associada a uma região de um embasamento consolidado, de domínio crustal com elevada resistência a esforços laterais originados das margens das placas (Milani, 2001).

Parte, das seqüências sedimentares, pertencentes à Bacia, foi seguida por grandes eventos extrusivos, pertencentes a “*Reativação Wealdeniana*” no final do Jurássico, que foi um complexo fenômeno tectônico e magmático que afetou todo o território brasileiro. Com este evento ocorreu à reativação de antigas estruturas e a geração de outras, associadas a processos magmáticos, que originam os derrames basálticos (Ferreira, 1982).

Esta região sofreu profundas rachaduras (fendas de tração), por onde a atividade vulcânica fissural intensa com a emissão de lavas da Formação Serra Geral que transpôs toda a seqüência, dos sedimentos, mais antigos formando “*Sills*” e “*Enxames de diques*” de diabásio formados por eventos que apresentam espessuras variando de algumas centenas a poucas dezenas de metros (Ferreira, 1982). Quando extrude o magma, estas formam derrames basálticos que apresentam espessuras médias que variam de 15 m a 35 m, podendo atingir até centenas de metros.

A persistente subsidência na área de formação da bacia possibilitou a acumulação de grande espessura de sedimentos, lavas de diferentes composições e *sills* de diabásio, ultrapassando 5.000 m na sua porção mais profunda (Fig. 16).

Figura 16 – Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná destacando a acumulação de sedimentos ao longo de sua evolução (Extraído de Milani, 1997).

Sabe-se que estas espessuras aumentam na região central da bacia e mais delgadas na região limítrofe entre Rio Grande do Sul e Uruguai-Argentina. Em investigações realizadas na década de 80 na cidade de Cuiabá Paulista, foi identificada em um furo de sondagem uma seqüência com aproximadamente 1.700 m, sendo estimadas que possam ocorrer ao longo da Bacia espessuras ainda maiores, mas que não ultrapassem os 2.000 m (Almeida, 1986).

Cobrem grande parte do território do Brasileiro e de países vizinhos, gerando assim a maior província basáltica continental do planeta, que cobrem atualmente cerca de 75% da bacia. Estima-se que o volume total extravasado durante as atividades magmáticas tenha sido muito maior do que o preservado hoje isso se deve aos intensos processos de erosão subsequentes ocorridos (Gallagher. & Hawkesworth, 1994).

O arcabouço estrutural da bacia apresenta duas famílias predominantes que ocorrem se formaram em períodos distintos, os lineamentos de direção NW-SE, caracterizados por zonas retilíneas que formam extensas zonas de falhas associadas a diques de diabásio, interceptadas por lineamentos mais recentes de direção NE-SW de idade Brasiliana (Zalán, 1990).

Associados a estas estruturas ocorrem componentes de movimentação verticais e horizontais, delineando um padrão de *Horsts* e *Grábens*, através da reativação de diversas falhas de grande ângulo com rejeitos verticais superiores a 200 m (Arco Ponta Grossa).

Podem ocorrer retalhando as camadas em mosaicos de falhas, responsáveis pelos grandes arqueamentos da bacia, que controlaram as principais feições estruturais e paisagísticas de toda a Bacia (Almeida, 1983).

Dados geocronológicos obtidos por Mantovani *et al.* (2000) identificam que os derrames desta unidade tiveram uma duração total de aproximadamente 10 Ma, sendo o ápice ocorrido por volta de 132 Ma.

As rochas predominantes são constituídas dominantemente por basaltos associados à riolitos, dacitos, riodacitos e outras extrusivas de composição mais ácida, que devido a sua viscosidade, ocorreram apenas nos derrames mais recentes que se encontram nas cotas superiores, caracterizando uma associação litológica bimodal.

Estes sistemas de derrames ocorrem na bacia alimentada por uma intensa atividade intrusiva, através de *diques* e *sills* que acompanham, preferencialmente, as descontinuidades estruturais da bacia (Milani, 2001).

O magmatismo pode ser dividido em fácies distintas, através da variação composicional, dos dados geocronológicos, das características texturais, do arranjo dos

derrames, entre outras características de interesse, litologicamente estas intrusões podem ser separadas entre os derrames máficos e os intermediários a félsicos.

O magmatismo máfico, compõe as primeiras manifestações vulcânicas sobre os sedimentos arenosos do então deserto Botucatu (Almeida, 1953).

Esta se caracteriza por apresentar texturas de fluxo preservado, zonas vesiculares bem desenvolvidas no topo e incipientes na base, e uma porção central formada por rocha granular homogênea, com disjunção colunar bem desenvolvida, textura microfanerítica, compacta e de coloração cinza-escuro a cinza-esverdeado (Marques et al., 2001).

A fácies de magmatismo intermediário a félsico é constituída pelos derrames mais espessos de toda a Formação Serra Geral, podendo alcançar espessuras acima de 80 m, com um contato basal com disjunção tabular incipiente e irregular, uma porção central com disjunção colunar difusa, e uma porção de topo com disjunção tabular bem desenvolvida.

Caracteriza-se também por derrames finos, de pequena extensão, compostas essencialmente por lavas vítreas, de cor preta, brilho graxo e aspecto resinoso em suas extremidades (Marques et al., 2001).

Neste conjunto podem ocorrer rochas de características químicas diferentes podendo ser básicas (félsicas) e ácidas, distribuídas geograficamente como apresentadas no mapa da Figura 17.

Figura 17 – Mapa geológico da ocorrência do Serra Geral nos estados do sul do Brasil (CPRM, 2003).

As rochas félsicas de natureza básica (basaltos) representam cerca de 90% do volume total extrudido, predominantemente formada por rochas microcristalinas com arranjo intergranular.

As rochas de filiação ácida (dacitos, riolitos e riodacitos) ocorrem em uma extensa área, cobrindo uma superfície da ordem de 100.000 km², são predominantemente mesocráticos de coloração cinza claro a esbranquiçada, textura microfanerítica com dominância de uma matriz vítrea com um aspecto mosqueado e fraturamento conchoidal (Marques et al., 2001).

A sismicidade natural da região é muito baixa, podendo ser considerada nula nos cálculos de estabilidade (Assunção, 1992).

4.2. ASPECTOS LOCAIS

4.2.1. Investigações de Subsuperfície Realizados

No sítio, para estudo da fundação, foram realizadas três campanhas de sondagem totalizando 62 sondagens rotativas / mistas com 3.370 m perfurados (Figura 18):

- Primeira etapa foi realizada para os estudos de viabilidade onde foram executadas 10 sondagens rotativas com um total de 505 m;
- Segunda campanha que integrava os estudos de projeto básico houve a execução de 22 sondagens com 1.440 m de perfuração;
- Terceira campanha complementar dos estudos anteriores com 30 sondagens rotativas com um total aproximado de 1.425 m perfurados.

As ultimas duas campanhas de investigação tiveram abordagens diferentes, a primeira utilizar como base de investigação o “*Layout*”, dos estudos de viabilidade e a complementar uma alteração de projeto que demandaria uma solicitação maior do maciço.

Nestas sondagens foram realizadas a caracterização geológica e geomecânica assim como a realização de ensaios de condutividade hidráulica do maciço rochoso de fundação/escavação, através dos ensaios de perda d’água sob pressão em cinco estágios.

Os métodos geofísicos (sísmicos e elétricos), não tiveram bons resultados, identificando apenas pequenas coberturas de solo, nas ombreiras (não sendo necessária a delimitação de um topo rochoso preciso), e não se obteve bons resultados no trecho em rocha, não sendo possível a diferenciação das litologias e dos derrames.

4.2.2. Aspectos Geológicos Locais

Com os dados levantados, durante a campanha de sondagem, foi possível identificar uma sucessão de 15 derrames, denominados sequencialmente de “A” a “O”, entre as elevações 877 m até a 570 m, dispostos no geral com mergulhos suaves da ordem de 0,5° SW e contatos irregulares apresentadas na Figura 19. Na Tabela 27 são separados para cada ombreira, com as cotas aproximadas de ocorrência em cada um deles.

Tabela 27 – Cotas médias de ocorrência dos derrames no sítio

Derrame	Intervalo das cotas de ocorrência (m)	
	Margem direita	Margem esquerda
A	Acima da 805	Acima da 800
B	790 - 805	790 - 800
C	772 - 790	775 - 790
D	764 - 772	762 - 775
F	740 - 764	735 - 762
G	728 - 740	728 - 735
H	710 - 728	710 - 728
J	689 - 710	685 - 710
K	672 - 689	670 - 685
L	639 - 672	639 - 670
M	628 - 639	628 - 639
N	602 - 628	602 - 628
O	592 - 602	592 - 602
P	577 - 592	577 - 592
Q	Abaixo da 577	

Litologicamente o sítio é constituído por rochas extrusivas relacionadas ao vulcanismo da Formação Serra Geral, representadas principalmente por basaltos (Foto 20), que na região, apresentam-se diferenciados em sua composição mineralógica, variando para rochas de natureza intermediária a ácida, como riodacitos e riolitos, dacitos na porção topograficamente mais elevada do conjunto de derrames (Foto 21).

Foto 20 – Amostra de basalto em testemunhos de sondagem.

Foto 21 – Amostra de riodacido em testemunhos de sondagem.

No geral, essas rochas extrusivas são formadas por sucessão de derrames, cuja individualização ou separação é feita através de níveis de brecha (Foto 22 e Foto 23) e/ou níveis vesículo-amigdaloidal, (Foto 24 e Foto 25).

Nos contatos entre derrames ocasionam feições de descontinuidade subhorizontais, irregulares, e como os pulsos dos derrames não são contínuos ocorrendo com uma periodicidade possibilitando a deposição se seus derrames sobre materiais anteriormente depositados, como sedimentos, blocos e solos.

Foto 22 – Amostra de brecha com pouca porção terrosa em testemunhos de sondagem

Foto 23 – Amostra de brecha com aspecto terroso argila em testemunhos de sondagem

Foto 24 – Amostra de vesículo-amigdaloidal em testemunhos de sondagem

Foto 25 – Amostra de basalto com vesículas e amígdalas maiores que 5 cm em testemunhos de sondagem

De modo geral a presença das camadas de brecha, constitui independente de sua espessura, uma referência do topo do derrame. A grande maioria dos derrames basálticos se caracteriza por apresentar uma camada de brecha seguida por um nível vesículo-amigdaloidal em parte superior, seguida por camada de basalto denso e outro trecho com vesículas na base.

Figura 18 – Planta com a distribuição das investigações realizadas (separadas por cor de acordo com a campanha).

Figura 19 – Figura do modelo geológico da região da barragem com as investigações realizadas (separado os derames).

Em alguns derrames os basaltos vesiculares da base e/ou brecha do topo podem estar ausentes, não sendo este critério uma regra para toda a seqüência.

Diques de diabásio, em geral de pequenas dimensões, foram observados no sítio de modo esparsos nos derrames situados abaixo do leito do rio (Foto 26).

Foto 26 – Amostra de rocha basáltica interceptada por pequena apófise de diabásio com 4,0 cm no derrame M, abaixo do leito do rio - em testemunhos de sondagem

4.2.3. Aspectos Estruturais

Nesta seção serão apresentados os levantamentos estruturais realizados no sítio, em que as principais estruturas encontradas no sítio são as subhorizontais, associadas ao acomodamento dos derrames e as secundárias constituídas por juntas e alguns sistemas de falhas.

Juntas ocorrem com grande persistência, originando-se predominantemente pelo alívio de paleotensões, que podem estar abertas ou seladas por minerais hidrotermais.

As falhas são diferenciadas das juntas devido à identificação de zonas de cisalhamento rúptil (zonas de brechão) ou como planos estriados simples, promovidos pelo atrito da movimentação entre as paredes.

O deslocamento e resfriamento da lava geram nos derrames basálticos descontinuidades tendo-se especificamente:

- Sistemas de fraturas cisalhantes curtas (centimétricas), paralelas e subhorizontais nos basalto vesicular;
- Sistemas de fraturas de contração subverticais retas ou encurvadas, isolando blocos de conformação aproximadamente prismática, ocorrem principalmente no trecho quando o basalto não apresenta estruturas amigdalares e vesiculares.

Outra estrutura muito importante são as juntas-falha que são estruturas detectadas principalmente em basaltos (Guidicini & Campos, 1968) caracterizadas por extensas descontinuidades cisalhantes subhorizontais, cujo desenvolvimento normalmente se dá sob os

vales dos rios, podendo se estender lateralmente sob ambas as margens por centenas de metros e atingir centenas de metros.

No estudo do comportamento do maciço, é função principalmente o levantamento da distribuição e da quantidade de famílias de descontinuidades existentes no maciço rochoso em relação ao tamanho da obra. A fim de se identificar o maciço rochoso afetado pela obra apresentam-se poucas fraturas comportando-se como uma rocha intacta ou se o comportamento do mesmo for determinado por até duas famílias de descontinuidades, é possível e provável a aplicação de metodologias de resistência do próprio maciço (laboratoriais). No entanto se o maciço apresentar mais que três famílias, o comportamento do mesmo dependerá do fator escala Figura 20.

Figura 20 – Influência do efeito escala na adoção do critério de ruptura e da metodologia de estudo de um maciço rochoso (modificado de Hoek & Brown, 1998).

4.2.3.1. Levantamento Estrutural dos Testemunhos de Sondagem

Estes dados foram obtidos através do estudo dos testemunhos de sondagem orientados, tomando-se as medidas das atitudes dos planos de fraturamento, onde se objetivou obter planos preferenciais de fraturamento, associado com a caracterização das descontinuidades apresentadas no Item 3.2.2.2.

Para esta atividade foram utilizadas uma bússola tipo Brunton e duas calhas com a inclinação de 30° e 45°, orientadas segundo a direção de cada sondagem em campo (Foto 26).

Nos histogramas são apresentadas as medidas 559 medidas obtidas nos testemunhos estudados. Nestes se indicam as profundidades e a cota do derrame (Tabela 27 – Cotas médias de ocorrência dos derrames no sítio p.73), as caracterizando, quanto a Margem em que foi identificado (Gráfico 1), o tipo de Litologia (Gráficos 2), a Rugosidade das Descontinuidades (Gráficos 3) e Alteração das Paredes das Descontinuidades (Gráfico4).

Foto 27 – Equipamentos utilizados para medição das fraturas nos testemunhos de sondagem.

Gráfico 1 – Histograma das localizações das atitudes distribuídas por margem.

Gráfico 2 – Histograma das quantidades de medidas por litologia

Gráfico 3 – Histograma das texturas das descontinuidades

Gráfico 4 – Histograma do tipo de alteração nas juntas

Com estes dados se observou que a maior parte das descontinuidades medidas encontra-se na margem direita (local com o maior número de investigações), que as descontinuidades encontradas, estão quase em sua totalidade, nos trechos onde foram observados o basalto denso, que apresentam textura das paredes predominantemente lisas, e alteradas (o que indica a presença de água).

Estes derrames de modo geral, apresentam nos seus 10 m iniciais uma rocha que contem um padrão de fraturamento variando entre medianamente fraturada (F3) a extremamente fraturada (F5), sendo pouco fraturado (F2) a ocasionalmente fraturado (F1) em profundidades maiores. Este fraturamento superficial é entendido como a zona que apresenta maior relaxamento do maciço, sendo assim, o trecho que dissipou efetivamente as tensões residuais. No Gráfico 5 é apresentada a distribuição das medidas de acordo com as profundidades que foram coletadas.

Gráfico 5 – Histograma da ocorrência das descontinuidades de acordo com a profundidade.

Quanto à geometria das medidas coletadas no sítio, verificou-se que de modo geral, os mergulhos das descontinuidades, apresentam valores, predominante entre 30° e 60° (Gráfico 6), e direções dos planos sem um padrão específico (Gráfico 7).

Gráfico 6 – Histograma com a distribuição dos mergulhos

Gráfico 7 – Histograma das direções predominantes no levantamento

Com estudo do estereograma apresentado no Gráfico 8, pretendeu-se verificar a atitude preferencial das discontinuidades do maciço como um todo se chegando a três famílias predominantes N285°/30°NE, N116°/15°SW e N333°/10°NE, no entanto estas famílias apresentam concentração de pólos menor que 4%, que os tornam pouco representativo no maciço como um todo.

Gráfico 8 – Estereograma das direções predominantes no levantamento

Observa-se que de modo geral as famílias das atitudes para o maciço são predominantemente esparsas, como foi verificado no histograma do Gráfico 7 está falta de padrão é ainda mais evidenciada nas discontinuidades de mergulho subvertical onde não há nenhuma grande concentração de medidas que possam se caracterizar como uma família efetivamente.

Foram realizadas associações entre as atitudes e as caracterizações que se realizaram para as discontinuidades. Como exemplos dessas associações de dados, são apresentados a seguir alguns estudos realizados que deram resultados positivos.

Esta associação se baseia no isolamento das discontinuidades rugosas as individualizando entre as que apresentam paredes alteradas ou com traços de alteração, com ocorrência a profundidades maiores que 10 m, esta conjunção de características promoveu a definição de duas famílias a N108°/17°SW e a N299°/09°NE, com concentração de pólos superiores a 9% (Gráfico 9).

Outra correlação utilizada foi tentar estabelecer uma associação entre as juntas que não apresentem sinais de alteração, com paredes lisas que ocorrem a profundidades maiores que 10 m (Gráfico 10) em comparação com discontinuidades de mesma característica, mas que apresentassem as paredes das discontinuidades rugosas (Gráfico 11).

Gráfico 9 – Stereograma das discontinuidades rugosas alteradas ou com traços de alteração

Gráfico 10 – Stereograma de juntas lisas, com paredes sãs.

Gráfico 11 – Estereograma de juntas rugosas, com paredes sãs.

As comparações entre os resultados obtidos apresentam certa similaridade quanto ao quadrante da direção do mergulho das camadas, no entanto, verifica-se que os mergulhos das juntas lisas são mais pronunciados, com atitudes preferenciais para $N305^{\circ}/36^{\circ}NE$ e $N340^{\circ}/75^{\circ}NE$ do que as juntas de textura rugosa que tem rumo $N318^{\circ}/12NE$.

No entanto nota-se que com os estudos estereográficos apresentados anteriormente, assim como outras diversas tentativas de correlação dos dados, que não foi possível se estabelecer associações efetivas entre as descontinuidades, a não ser quando estudado de forma isolada cada um dos seus derrames.

Com o objetivo de demonstrar as associações ocorridas entre as descontinuidades e as suas características geomecânicas, foram realizados estudos estatísticos para cada um dos derrames.

Com estes estudos estabeleceu-se uma série de dados mais concretos e realmente representativos, com o intuito de exemplificar será apresentada como exemplo a aplicação deste estudo de forma isolada, no derrames C.

O derrame C ocorre na margem direita entre as cotas 772 m e 792 m (20 m de espessura) e na margem esquerda entre as cotas 775 m e 790 m (15 m de espessura), com um caimento em torno de 1° para SE, as medidas foram obtidas a profundidades que variam entre 5 m e 25 m, nos estereograma apresentados na Tabela 28.

De forma geral o derrame apresenta uma família principal com direções $N47^{\circ}/46^{\circ}SE$ e duas secundárias $N278^{\circ}/30^{\circ}NE$ e $N119^{\circ}/56^{\circ}SW$.

Tabela 28 – Estereogramas das descontinuidades do derrame C

Os resultados dos resultados são apresentados na Tabela 29 e no Gráfico 12, nestes são observa-se uma associação simples entre as atitudes preferenciais das descontinuidades de acordo com a caracterização.

Tabela 29 – Algumas correlações entre as atitudes e as características das juntas neste derrame.

Características das Juntas		Atitudes preferenciais
Litologia	Basalto	N94°/39°SW e N104°/59°NE
	Brecha	N105°/60°NE
	BVA	N150°/35°SW
Margem	Direita	N46°/46°SE
	Esquerda	N96°/30°NE
Rugosidade	Rugoso	N115°/60°SW
	Liso	N105°/60°NE
Alteração	Sem oxidação	N120°/35NE
	Oxidado	N94°/39°SW e N104°/59°NE

Gráfico 12 – Algumas correlações entre as atitudes e as características das juntas neste derrame.

Na Tabela 30 e no Gráfico 13, é apresentado o plano da descontinuidade preferencial para cada derrame, mostrando a relação dele com a direção preferencial das futuras escavações que serão paralelas ao fluxo do rio.

Tabela 30 – Planos preferenciais das descontinuidades levantadas para cada derrame.

Derrame	Rumo preferencial
B	N145°/25°SW
C	N45°/45°SE - N120°/55°SW – N280°/35°NE
D	N45°/40°SE
F	N118°/65°SW – N341°/71°NE
G	N112°/42°SW
H	N110°/15°SW
J	N145°/73°SW – N280°/30°NE – N113°/32°SW
K	N150°/49°SW – N239°/34°NW
L	N321°/8°NE – N198°/41°NW
M	N348°/40°NE – N315°/60°NE

Com este levantamento pode se verificar que grande parte dos derrames apresenta a formação de grandes blocos principalmente quando associadas a descontinuidades aleatórias, que não apresentam uma padronização no manto superior devido ao fraturamento estar

condicionado a estruturas de alívio promovidas pela erosão durante a formação do relevo local.

Gráfico 13 – Planos preferenciais das discontinuidades levantadas para cada derrame e o fluxo do rio.

4.2.3.2. Estudo das Tensões Naturais no Maciço

Uma característica muito importante levantada durante os estudos são as evidências de tensões naturais do maciço. No início dos estudos, encontrou-se diversos relatos de manifestações do alívio destas tensões.

As percepções da liberação das tensões ocorrem através de estalos e explosões de rocha (“*rockburst*”), provocando desprendimento de estilhaçamentos (“*rock noise*”) e deslocamentos (“*slabbing*”) do teto e das paredes dos túneis em duas obras realizadas próximos a área de estudo, a implantação da antiga Rede Ferroviária Federal – Tronco Sul, realizada na década de 1960 e nas escavações das Usinas Hidroelétricas do complexo do rio das Antas no início dos anos 2000.

Estas manifestações foram observadas na região estudada durante as investigações, através da partição de testemunhos de sondagem em discos ou lâminas de 1 a 2 cm, com forma de sela, de espessuras milimétricas denominadas de “Core Discing” (Foto 28), em sondagens na margem direita, e no leito do rio. Este fenômeno corresponde ao fraturamento na direção perpendicular ao eixo do testemunho de sondagem.

Foto 28 – Amostra de testemunhos de sondagem com disqueamento (“Core discing”).

Diversos autores atribuem este fenômeno da formação de discos a tensões horizontais assimétricas em relação ao eixo vertical do testemunho de sondagem, em maciços onde a relação k (tensão horizontal versus vertical) é elevada, os discos se formam durante a perfuração, quando ocorre o alívio de tensões no testemunho. No local do eixo, as três ocorrências observadas ocorreram nas porções abaixo do leito do rio, onde não há alívio topográfico do maciço.

As fraturas apresentam-se ortogonais ao eixo do testemunho, bastante onduladas, características da ruptura por tração. Como este fenômeno ocorre com certa frequência em maciços com altas tensões, Cornet, 1993, propôs um método de determinação da direção das tensões principais a partir da análise da formação destas estruturas, embora não tenha feito nenhuma aplicação prática.

Para determinar as direções das tensões principais que poderiam estar atuantes no maciço rochoso basáltico foram realizados levantamentos geológico-estruturais na região do sítio, no início de 2007, pelo departamento de geologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), estudo de superfície baseado na caracterização das famílias de juntas e falhas.

O levantamento geológico-estrutural realizado deteve-se na observação de afloramentos ao longo de rodovias, de estradas vicinais, em túneis e taludes da estrada do ferro Federal – Tronco Sul e no leito do rio Pelotas. Neste levantamento se buscou caracterizar as famílias de juntas e de falhas que condicionam as características estruturais do sítio. As principais estruturas identificadas foram às famílias de juntas e falhas, que foram

levantadas focalizando-se em seus aspectos geométricos e geotécnicos, associados aspectos cinemáticos e dinâmicos.

Para as falhas, os dados coletados compreenderam nos levantamentos das atitudes dos planos de falha e das estrias de atrito, além da identificação dos tipos de movimento relativo entre blocos rochosos (Foto 29). Com o intuito de se estimar as direções principais do tensor de tensão (σ_1 , σ_2 e σ_3), que possam estar atuando no maciço.

Com os dados obtidos em campo, foram empregados dois métodos de análise de tensões o Método de Arthaud (Arthaud, 1969 Apud Magalhães, 1999) e o Método dos Diedros Retos (Angelier & Mechler, 1977 Apud Magalhães, 1999), que se propõem definir as direções dos eixos dos esforços e os quadrantes descompressão / distensão, para que se estimem os eixos de tensão.

Foto 29 – Falha (plano estriado) apresentando estria de atrito e ressaltos que indicam o movimento relativo transcorrentes sinistral (movimento lateral para esquerda).

No levantamento de campo foram reconhecidas na área do eixo, duas famílias de juntas, onde a principal apresenta atitudes N230°/82°NW e a secundária de atitude média N140°/subvertical (Gráfico 14) sendo estas estruturas de caráter regional, que podem ser reconhecidas em imagens aéreas.

Próximo às cristas das ombreiras, o maciço rochoso apresenta-se pouco fraturado, com juntas preenchidas (calcita) e pouco persistentes. Nas margens do rio, há famílias de juntas, em geral, abertas, com persistências métricas a decamétricas, espaçamentos submétricos a métricos, definindo blocos de dimensões variadas. Reconhece-se regionalmente, e com certa frequência, zonas de falha paralelas à família principal, com espessuras de até várias dezenas de metros.

Gráfico 14 – Estereograma com as medidas obtidas na região do eixo

Regionalmente o maciço apresenta-se predominantemente pouco fraturado com planos de juntas selados e pouco persistentes, onde o espaçamento é centimétricas e persistências subdecamétricas, apesar de apresentarem-se, no geral, seladas (Foto 30 e Foto 31).

Foto 30 – Maciço rochoso apresentando a família de juntas principal (N44°/88°NW) com espaçamento centimétricas entre planos.

Foto 31 – Maciço rochoso apresentando planos da família regional principal com persistências decamétricas. Notar traços de juntas subhorizontais

A direção predominante das discontinuidades do maciço pode ser visualizada no estereograma apresentado no Gráfico 15. O maciço de modo geral se apresenta levemente alterado e muito fraturado, com juntas abertas de espaçamentos centimétricas e persistências métricas.

Gráfico 15 – Estereograma com as medidas obtidas

Associada às famílias de juntas identificadas, há uma zona de falha subvertical que ocorrem à jusante do local do eixo com a presença de duas zonas de falha uma com espessura em torno de 60 m e atitude coincidente à da família principal (Foto 32) e uma segunda com espessura aproximada de 10 m e atitude principal N48°/88°SE (Foto 33).

Foto 32 – Zona de falha subvertical N50°/82°NW

Foto 33 – Zona de falha subvertical N48°/88°SE.

Estas direções preferenciais das falhas verificadas nestes trechos podem são apresentados no estereograma do Gráfico 16.

Deve-se ressaltar também a presença de juntas subhorizontais nos diversos afloramentos visitados, abertas segundo a “estratificação” observada invariavelmente nos maciços basálticos da região

Gráfico 16 – Estereograma com as medidas obtidas nos planos de cisalhamento.

A análise cinemática e dinâmica, aplicando-se o método de Arthaud, elaborou-se o estereograma de pólos de planos de movimento, que indica uma concentração principal próxima ao centro do diagrama e uma distribuição definindo uma guirlanda com orientação ENE-WSW/subvertical.

Por meio destas (concentração e guirlanda), define-se as outras duas guirlandas, ortogonais à primeira. As intersecções desses planos definem os eixos da deformação sofrida pelo maciço, cujas direções são: $N70^{\circ}/09^{\circ}\text{NW}$, $N170^{\circ}/90^{\circ}$ e $N75^{\circ}/81^{\circ}\text{SE}$ (Gráfico 17). A qualificação destes eixos em σ_1 , σ_2 e σ_3 , dá-se pela análise da geometria e tipos de falhas.

Gráfico 17 – Estereograma de pólos de plano de movimento (método de Arthaud), definindo uma concentração e uma guirlanda de distribuição de pólos.

Pela análise da frequência dos tipos das falhas levantadas (sendo os dados referentes a falhas transcorrentes), pode-se afirmar que o regime de esforços principais são transcorrentes, o que significa que os tensores principais máximos e mínimos (σ_1 e σ_3) são horizontais e o eixo principal intermediário (σ_2) é vertical.

Analisando-se a geometria e o movimento relativo das falhas transcorrentes apresentados no Gráfico 18 com direções para N60 e N350 subverticais. Com estas evidências constata-se que os eixos que explicam as movimentações para 95% destas falhas, referem-se a $\sigma_1=350^\circ/05^\circ\text{NW}$, $\sigma_3 = \text{N}60^\circ/05^\circ\text{NE}$ e $\sigma_2= \text{N}117^\circ/83^\circ\text{NE}$ apontados no Gráfico 19.

Gráfico 18 – Projeção ciclográfica das falhas transcorrentes levantadas

Gráfico 19 – Método de Arthaud com as indicações dos eixos de tensão/deformação.

A desconformidade para os 5% das falhas restantes em relação a essa geometria do tensor de esforços pode ser explicada por um de dois fatores: relacionam-se a evento anterior ao vigente ou, o mais provável refere-se a redistribuições locais das tensões.

A desconformidade para os 5% das falhas restantes em relação a essa geometria do tensor de esforços pode ser explicada por um de dois fatores:

- Eventos anteriores ao atual;
- Redistribuições locais das tensões (o mais provável).

Para o método dos Diedros Retos, empregam-se os dados de falhas que possuem indicação do movimento relativo, chegando-se diretamente aos eixos σ_1 e σ_3 . Aplicando-o, obteve-se o estereograma do Gráfico 20, que indica a posição de $\sigma_1=\text{NNWSSE}/\text{subhorizontal}$ e $\sigma_3 = \text{ENE-WSW}/\text{subhorizontal}$.

Gráfico 20 – Estereograma do método dos “Diedros Retos”, com a indicação de σ_1 e σ_3 .

Constata-se que os resultados dos métodos de Arthaud e Diedros Retos são semelhantes. Desse modo, os tensores médios determinados, são:

- σ_1 - N10°W/suborizantal
- σ_2 - subvertical
- σ_3 - N80E/suborizantal

Cabe ressaltar que os tensores determinados nos diversos estudos apresentados referem-se a uma tectônica de transcorrência crustal, ou seja, com σ_1 e σ_3 horizontais e σ_2 vertical. O tensor de esforços hoje atuante, certamente apresentará, até profundidade média de 500 m, uma inversão do eixo mínimo (σ_3) da posição horizontal para a vertical, devido ao alívio provocado pela proximidade da superfície terrestre (Magalhães, 1999).

4.2.4. Aspectos Geomecânicos

Através dos procedimentos apresentados no item 3.2.2.3., foram realizados para o maciço uma análise a fim de estabelecer um padrão para os parâmetros geomecânicos mais representativos do local estudado.

Isso se fez com a realização do levantamento das características geomecânicas de cada tipo litológico e de forma individualizada para os derrames que compõe o maciço, com o levantamento das características do Grau de Alteração, Grau de Fraturamento e “RQD”. Estes levantamentos foram obtidos através da avaliação dos testemunhos de sondagens realizados ao longo do eixo da barragem, como apontado na Figura 21.

Figura 21 – Distribuição das sondagens ao longo do perfil da barragem

- Grau de Alteração

O maciço apresenta espessura do capeamento de solo em ambas às ombreiras, inferior a 5 m, onde as maiores espessuras ocorrem próximas ao contato entre os derrames e no derrame A situados acima da elevação 800m com coberturas de solo maiores que 10 m.

A passagem solo/rocha no sítio é brusca, praticamente inexistindo uma transição entre elas, com variação vertical que exibem predominantemente um modelo clássico de meteorização das rochas em função do alívio das discontinuidades (juntas/fraturas) ocorrido durante o processo erosivo. A ausência de horizontes aquíferos notáveis gera um padrão de alteração que diminui com o incremento da profundidade.

De modo geral o maciço é formado por rochas pouco alteradas a sã com exceção dos trechos mais próximos a superfície, que apresentam uma maior alteração devido ao intemperismo químico superficial, sendo que do total investigado cerca de 70% do maciço é compreendido por rocha sã (A1) e 20% por rochas pouco alteradas (A2), o que estabelece ótimas características quanto à alteração.

Com estes dados obtidos realizou-se a formulação de um modelo 2D para o estudo de uma possível distribuição das maiores alterações no maciço apresentados na Figura 22.

Para a formulação deste modelo foi utilizado métodos geoestatísticos de Krigagem com a interpolação dos dados obtidos, onde as regiões que apresentam colorações mais amareladas representam as áreas com rochas sãs e as áreas mais alteradas apresentam cores mais azuladas. No entanto deve-se ressaltar que não foi desconsiderada nesta interpolação de dados a cobertura superficial de solo que recobrem as ombreiras.

Com a formulação deste modelo pode estabelecer um padrão da distribuição desta característica ao longo do maciço, onde este apresenta poucas zonas alteradas no meio do maciço, se concentrando esta característica nas regiões mais próximas a superfície.

Deve-se destacar a grande influencia para o modelo da presença de passagens centimétricas (inferiores a 20 cm de espessura) de material decomposto (solo) no topo do derrame “J” a profundidades de 63,1m e no topo do derrame “L” na profundidade de 99,0m identificados pela mesma sondagem. Sendo esta uma característica isolada muito provavelmente associada a elementos de discontinuidades locais.

Para estabelecer uma relação entre esta característica e o tipo de rocha foi elaborado o Gráfico 21, a partir dos dados apresentados no Quadro 1 e 18 em anexo. Neste levantamento se faz o cruzamento da porcentagem de ocorrência de cada grau de alteração, para cada um dos tipos litológicos encontrados no eixo.

Figura 22 — Modelo de distribuição do grau de alteração ao longo da seção da barragem

Gráfico 21 – Grau de alteração separada pela porcentagem de ocorrência nas litologia.

Com os dados apresentados verifica-se que o basalto denso (81%) e os basaltos, vesículo-amigdaloidal (68%) compõe predominantemente um maciço são (A1) com poucos níveis de alteração, já as brechas (71%) são formadas por rochas pouco alteradas (A2).

Os riolitos/riodacitos que ocorrem no topo das obreiras e que detém as maiores espessura de solo de alteração em todo o sítio são configurados por uma intensa variação dos graus de alteração onde 63% das amostras obtidas nesse derrame durante as investigações, são de rochas sãs (A1) a pouco alteradas (A2).

Sendo que em 36% dos casos o maciço foi classificado como sendo alterados (A4) a muito alterados (A5), sendo esta meteorização uma característica geoquímica intrínseca deste tipo de rocha, que do conjunto estudado é mais suscetível ao intemperismo químico..

Para estabelecer uma relação desta característica com os derrames investigados foi elaborado o Gráfico 22, onde se faz um cruzamento do total de metros perfurados, correlacionando aos derrames e separando segundo seu Grau de Alteração nos cinco intervalos já padronizados, se utilizando para isso dos dados apresentados no Quadro 5 e 18.

Com estes dados verifica-se que os derrames - como esperado- são compostos predominantemente por rocha sã (A1) a pouco alterados (A2).

No entanto os trechos de rochas alteradas (A4) a muito alteradas (A5), foram identificadas predominantemente no derrame A (36%) – como já sabido já que este é composto por riolitos que como descrito anteriormente é mais suscetível a alteração –

ocorrendo também no derrame B (12 %) no contato com o derrame A, no topo do derrame J (6%) e no contato entre os derrames L (1%) e M(2%).

Gráfico 22 – Grau de alteração separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.

- Grau de Fraturamento

O grau de fraturamento tende a ser maior quanto mais próximo da superfície, em decorrência dos efeitos da descompressão litostática, diminuindo em profundidade devido ao menor relaxamento do maciço em seu interior, no entanto em alguns contatos entre derrame foram identificados maciços com maior grau de fraturamento.

De modo geral o sítio é formado por rochas medianamente fraturadas (F2) com 57% do total investigado do maciço, 10% por rochas ocasionalmente fraturadas (F1) e 11,5% formada por rochas extremamente fraturadas (F5), o que estabelece uma característica intermediária de fraturamento.

Com estes dados obtidos realizou-se a formulação de um modelo 2 D para o estudo da possível distribuição dos maiores índices de fraturamento no sítio que será apresentado na Figura 23.

Neste modelo utilizou-se como base métodos geoestatísticos através das ferramentas de Krigagem com a utilização da interpolação de dados, onde as regiões que apresentam colorações mais amareladas representam as áreas com rochas eventualmente fraturadas e as áreas mais fraturadas apresentam cores mais azuladas.

Figura 23 – Modelo de distribuição do grau de fraturamento ao longo da seção da barragem

Com o modelo pode-se notar pequenas concentrações com alto grau de fraturamento ao longo da seção, merecendo-se destacar o leito do rio próximo a cota 600 e entre as cotas 650 m e 700 m na ombreira direita, onde as duas sondagens realizadas neste trecho em porções mais distantes da superfície apresentaram um fraturamento mais intenso do que no restante do maciço. E como já se esperava pelo conteúdo litológico, ocorre um maior índice de fraturamento junto as rochas do topo das ombreiras.

Para estabelecer uma relação entre esta característica e o tipo de rocha, principalmente onde ocorre o fraturamento mais intenso, foi elaborado o Gráfico 23, onde se faz um cruzamento do total de metros perfurados, associados à litologia e separados entre os cinco graus de fraturamento, á partir dos dados apresentados no Quadro 2 e 18 em anexo.

Gráfico 23 – Grau de Fraturamento separados pela porcentagem de ocorrência nas litologias.

Observa-se que o basalto denso (58%), os basaltos vesículo-amigdaloidal (65%) e as brechas (72%) são constituídos predominantemente por um maciço pouco fraturado (F2), os riolitos são constituídos por um maciço extremamente fraturado (F5), já as demais rochas apresentam concentrações dentro de intervalos menores que 10%.

Os basaltos vesículo amigdaloidal são as rochas que apresentam o menor grau de fraturamento onde em 85% das amostras foi observado como sendo ocasionalmente fraturado a pouco fraturado seguidos da Brecha (75%) e do Basalto denso (69%).

Observa-se que nas brechas o grau de fraturamento se intensifica nas regiões próximas aos contatos. Para estabelecer uma relação do fraturamento com os derrames investigados foi elaborado o Gráfico 24, onde se fez um cruzamento do total de metros perfurados, os

associando os derrames de ocorrência e os dividido entre os cinco graus de fraturamento estabelecidos, para tanto foi utilizado o conjunto de dados apresentados no Quadro 6 e 18.

Observa-se com os resultados obtidos que a maior parte dos derrames são caracterizados por maciços pouco fraturados (F2), onde o Derrame D (52%) e o Derrame O (55%) são maciços predominantemente com um fraturamento ocasional (F1).

Os derrames em que maciço é extremamente fraturados (F5), são mais significativo nos derrames A (76%), B (9%), F (10%), K (22%) e N (32%) e nos derrames H, J, L e M associados aos contatos entre os derrames estudados.

Gráfico 24 – Grau de fraturamento separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.

- “RQD” –Rock Quality Designation

De modo geral o maciço é formado por um maciço muito bom (R1) a bom (R2) onde cerca de 78% de todas as investigações realizadas no eixo da barragem apresentam um valor de “RQD” entre 75% – 100%, este dado aplica ao maciço características muito boas, o conjunto de dados é apresentado no Quadro 18.

Com estes dados obtidos realizou-se a formulação de um modelo 2D para o estudo da possível distribuição destes índices no maciço que são apresentados na Figura 24.

Neste modelo foram utilizados métodos geoestatísticos através das ferramentas de Krigagem com a utilização da interpolação de dados, onde as regiões que apresentam colorações mais amareladas representam as áreas com rochas de valor de “RQD” elevadas e as áreas mais de menor valor de “RQD” apresentam cores mais azuladas.

Figura 24 – Modelo de distribuição do índice “RQD” ao longo da seção da barragem

Com os resultados do modelo, observa-se que a distribuição dos valores de “RQD”, é coerente aos dois índices anteriores, com valores pontuais de menor qualidade, abaixo do leito do rio e em alguns pontos específicos correlacionado aos contatos entre derrames, nos trechos próximos a superfície e nos extremos das ombreiras.

Para estabelecer uma relação entre esta característica e o tipo de rocha, foi elaborado o Gráfico 25, onde se faz um cruzamento do total de metros perfurados, associados à litologia e separados pelo valor de “RQD” a partir dos dados apresentados no Quadro 3 e 18 em anexo.

Gráfico 25 – “RQD” separados por percentagem de ocorrência nas litologias.

Observa-se que o basalto denso (57%), os basaltos vesículo-amigdaloidal (67%) e as brechas basálticas (64%) são constituídos predominantemente com índice “muito bom” entre 90% e 100% (R1), já os riolitos são constituídos por um maciço R5 – “muito mau” (73%).

Para estabelecer uma relação desta característica com os derrames investigados foi elaborado o Gráfico 26, onde se fez um cruzamento do total de metros perfurados, em cada derrame em percentagem e os separados entre os cinco grupos de classificação definidos na Tabela 10 p. 38 a partir dos dados apresentados no Quadro 7 e 18.

Observa-se com os resultados obtidos que a maior parte dos derrames são caracterizados por maciços “muito bons” (R1) a “bons” (R2). Os trechos do maciço em que os maciços são muito maus (R5), são mais significativo nos derrames A (73%)- como já era esperado pelo grande grau de fraturamento que ocorrem neste derrame devido aos riolitos /riolitos que ocorrem nela- no derrame B (8%)- próximo ao contato com o derrame A- , D (14%), L (8%) e abaixo do leito do rio no derrame N (15%).

Gráfico 26 – “RQD” separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.

4.3. ENSAIOS “*IN SITU*”

- Trecho em solo - “SPT” - “*Standard Penetration Test*” e Ensaio de Infiltração.

Devido a pouca cobertura de solo os resultados referentes à resistência do solo obtida com o ensaio de “SPT” são poucos e de pouca representatividade nas margens do eixo da barragem, sendo realizado predominantemente no topo das ombreiras.

Estas coberturas são compostas por solo de alteração e saprólitos das rochas basálticas recobertas por coluviões e no leito do rio por uma pequena cobertura aluvionar (<1 m) no leito.

O solo de alteração é composto predominantemente por argilas e siltes argilosos, provenientes da alteração dos basaltos e principalmente dos riódacitos. Em meio a esta matriz argilosa é comum encontrar grande quantidade de blocos preservados e níveis saprolíticos, que dificultam a realização do ensaio na maior parte dos trechos investigados.

Ensaio penetrométrico tipo “SPT”, indicou geralmente valores superiores a 10 golpes para penetrar os últimos 30 cm. Com os ensaios de infiltração resultaram em valores menores do que 5×10^{-5} cm/s.

Os solos coluvionares que ocorrem predominantemente nas coberturas das ombreiras, e apresentam espessuras menores que 2,0 m, são constituídos por argilas siltosa a arenosa marrom escura, com fragmentos angulosos e milimétricos de quartzo, principalmente na base

destes pacotes, associados a fragmentos de rocha ou saprólitos. Os ensaios de “SPT” indicam valores predominantemente menores que 10 golpes para penetrar os últimos 30 cm, Com os ensaios de infiltração resultaram em valores maiores que 5×10^{-4} cm/s.

- Maciço Rochoso - Ensaio de Perda d’água.

Os maciços basálticos do Serra Geral formam os estratos rochosos, mais estudados quanto à permeabilidade em toda a Bacia do Paraná, devido ao grande número de empreendimentos hidroelétricos implantados durante o último século.

Desde a década de 50 é prática normal a execução de ensaios de perda d’água sob pressão em sondagens rotativas, em trechos concomitantes a execução da perfuração, onde a partir da análise destes ensaios são obtidos os dados de permeabilidade e condutividade hidráulica para o projeto.

De modo geral, o seu comportamento quanto à permeabilidade e percolação é bastante conhecido, prevalecendo ao longo de horizontes determinados e o fluxo concentrado primordialmente em caminhos preferenciais, os quais, desde que não obstruídos distribuem o fluxo por outras passagens ao longo do mesmo horizonte.

Estes caminhos preferenciais são de maneira geral, confinados e não mantêm relação com outros níveis, com raras exceções devido a particularidades estruturais.

Neste sítio, foram realizados em uma série de ensaios de perda d’água, adotando-se como padrão cinco estágios de pressão. Um dos grandes problemas deste ensaio está justamente associado ao fato de que o diagrama obtido, é muito simplificado, dificultando a definição do valor a ser utilizado para o cálculo do coeficiente de permeabilidade.

Observa-se que no meio técnico, alguns utilizam uma média entre os valores de pressões baixas correspondentes ao primeiro e quinto estágios, outros a média aritmética simples dos cinco estágios.

Neste estudo se utilizará da seleção do dado de maior condutividade hidráulica obtido, obtido entre os cinco estágios. Como a adoção deste valor é arbitrária, sempre será obtido apenas um valor indicativo da permeabilidade do maciço onde dificilmente qualquer outro arranjo irá refletir a uma permeabilidade totalmente condizente com o meio real.

O maciço estudado tem em 52 % dos trechos ensaiados uma condutividade hidráulica muito baixa (H1) em outros 25% dos casos baixos (H2), o que estabelece um padrão de modo geral pouco condutivo, sendo necessário estabelecer os pontos onde ocorrem as maiores condutividades, para uma melhor investigação, e implantação de medidas construtivas.

Com os dados obtidos através dos ensaios formulou-se um modelo 2D para o estudo da possível distribuição das maiores permeabilidades no maciço apresentados na Figura 25.

Neste modelo foram utilizados métodos geoestatísticos através das ferramentas de Krigagem com a utilização da interpolação dos dados, onde as regiões que apresentam colorações mais esverdeadas são as áreas de menor percolação e as áreas de maior permeabilidade estão tons de azul.

Na ombreira direita, as sondagens acusaram presença de passagens com condutividade muito alta (H5) na porção final de suas perfurações, a primeira no topo do derrame “J”, a segunda no contato entre os derrames “J” e “K” e a terceira, mais profunda, no contato entre os derrames “L” e “M”. Nas duas primeiras sondagens, os trechos em destaque distam cerca de 30 m (medidos na horizontal) da superfície e devem ser reflexos de sua porção superficial mais aliviada ou ainda efeito do degrau topográfico, condicionado por descontinuidades locais.

Para estabelecer uma relação entre esta característica e o tipo de rocha, foi elaborado o Gráfico 27, onde se faz um cruzamento do total de metros perfurados, associados à litologia e separados pelos intervalos estabelecidos de Condutividade Hidráulica, a partir dos dados apresentados no Quadro 4 e 18.

Observa-se que o basalto denso (55%), os basaltos vesículo-amigdaloidal (57%) e as brechas (45%) são constituídos predominantemente por maciços de percolação muito baixa (H1), já os Riodacitos são constituídos predominantemente (89% dos casos) por um maciço de percolação muito alta (H5).

Gráfico 27 – Condutividade hidráulica separados pela porcentagem de ocorrência nas litologias.

Figura 25 - Modelo de distribuição da permeabilidade ao longo da seção da barragem

O cruzamento dos resultados dos ensaios de perda d'água em relação aos derrames em que elas ocorreram, foi elaborado o Gráfico 28, onde se fez um cruzamento do total de metros perfurados, associados aos derrames separados entre os cinco intervalos estabelecidos pelo ensaio perda d'água, com dados apresentados no Quadro 8 e 18 em anexo.

Gráfico 28 – Condutividade hidráulica separados pela porcentagem de ocorrência nos derrames.

Observa-se com os resultados obtidos que a maior parte dos derrames são caracterizados, por ter condutividade “muito baixa” (H1) a “baixa” (H2). Os trechos do maciço em que a percolação é “muito alta” (H5), é mais significativo nos derrames A (89%), nos demais derrames a percolação muito alta ocorre em taxas que variam de 17% a 5%, de modo geral a condutividade hidráulica deste maciço rochoso é condicionada pelas características das discontinuidades, (como já era esperado) numa relação direta com o processo de alívio do maciço.

Sendo assim o maciço pode-ser dividido em dois níveis distintos: um onde foi observado valores elevados de condutividade hidráulica, com perda d'água específica superior a 10 l/min.m.kg/cm² (H5) em poucos trechos de contato e no topo das ombreiras e predominantemente onde os valores de condutividade hidráulica obtidos foram “muito baixos” a “baixos” (H1 a H2), com perda d'água específica inferior a 1 l/min.m.kg/cm². Valores “moderados” (H3) a “altos” (H4), com perda d'água específica inferior a 5 l/min.m.kg/cm², predominantemente nos contatos entre os basaltos (densos ou vesículo amigdaloidais) com as brechas.

4.4. ESTUDOS LABORATORIAIS

4.4.1. Estudos Petrográficos

Para caracterização petrográfica do maciço, foram selecionadas a partir dos testemunhos de sondagens realizadas no sítio, amostras representativas de todo o maciço para a realização das caracterizações petrográfica micro e macroscópicas.

- **Riodacitos:** Amostra de rocha do derrame A.

A *análise macroscópica* realizada na rocha é caracterizada como sendo uma rocha de coloração cinza, com pontuações esbranquiçadas, tratando-se de uma rocha com estrutura maciça, isotrópica hipocristalina, subfanerítica de granulação fina.

A *análise microscópica* indica uma rocha de granulação fina, isotrópica, hipocristalina, com estrutura maciça, com grande quantidade de vidro vulcânico desvitrificado, o que dá à mesma um aspecto pulverulento, onde este material formam manchas ou nuvens constituída por agregado policristalinos onde os contatos entre os cristais não é nítido apresentando baixa cristalinidade (Foto 34).

Foto 34 – À esquerda observa-se, no centro da lâmina, feldspato alcalino, associado plagioclásio em contato irregular. À direita matriz com “vidro amorfo” – Manchas escuras.

- **Diabásio:** Amostra coletada próximos a cota 795 m.

A *análise macroscópica* realizada caracteriza a amostra como sendo uma rocha que possui estrutura maciça, com porções amidalóides, de coloração vermelha, holocristalina, subfanerítica, de granulação fina a muito fina.

A *análise microscópica* indica uma rocha de isotrópica, holocristalina, fanerítica, de granulação fina a média e textura intergranular a intersertal, composta basicamente por

piroxênio e plagioclásio com porções de argilominerais de coloração castanho escuros bem distribuídos pela lâmina que dão um aspecto de terem sido formados pela alteração intempérica de material vítreo (Foto 35).

Foto 35 – À esquerda matriz com argila disseminada. À direita amídala preenchida por argila castanha.

- **Basalto com vesículas e amídalas:** Amostras do derrame M.

A *análise macroscópica* realizada na rocha é caracteriza como sendo uma rocha de cor marrom e granulação fina, onde se identifica pequenas pintas de cor preta. A estrutura é maciça e textura hipocristalina, subfanerítica, isotrópica, com pequenas amídalas de cor verde e também um material de cor preta nas bordas das amídalas verde (Foto 36).

Foto 36 – Foto em lupa onde se observa à esquerda a presença de amídalas preenchidas por zeólitas na borda com sílica no centro e pouca argila. À direita observam-se amídalas preenchidas argilas do grupo das esmectitas, com zeólitas de cor branca no centro na matriz observa-se a presença de argila escura.

A *análise microscópica* indica uma rocha de granulação fina a muito fina, estrutura maciça, vesicular, hipocristalina, equigranular com cristais de tamanho médio em torno de 0,3 mm, sendo os cristais de plagioclásio os maiores observados.

Considerando o grau de alteração da rocha e a presença de grande quantidade de argila de cor marrom, pode-se dizer que essa argila amarronzada é decorrente principalmente da alteração do vidro vulcânico (Foto 37).

Foto 37 – No lado esquerdo trata-se de um argilomineral, esse material ocorre em amídalas e entre os interstícios de plagioclásio. À direita preenchendo as amídalas observa-se um filossilicatos de cor verde (clorita), associado a um argilo mineral de coloração esverdeada (esmectitas).

- **Basalto denso:** Foram utilizadas amostras coletadas nos derrames N e O.

A *análise macroscópica* configura como uma rocha de granulação fina a muito fina, estrutura maciça, cor preta a cinza escuro, afanítica, isotrópica.

Observa-se em planos de fratura que o tipo de fraturamento é conchoidal, o que indica uma granulação muito fina. Essas fraturas muitas vezes apresentam-se preenchidas por minerais de cor branca a acinzentado (zeólita) e minerais de cor verde (argilominerais do grupo das esmectitas ou cloritas).

A *análise microscópica* : indica uma rocha de granulação muito fina, estrutura maciça, equigranular, isotrópica. Rocha hipocristalina, preenchida por material vítreo parcialmente recristalizado em cristais de augita.

Observa-se na lâmina a presença de fraturas de espessura variada, sendo que as mais espessas estão em torno de 0,5 mm, alguns dessas fraturas estão preenchidos por cristais bem formados de quartzo, calcedônia e clorita (Foto 38 e 39).

Foto 38 – À esquerda observa-se o aspecto geral da lâmina onde os minerais ripiformes são formados por plagioclásios. À direita observa-se a presença de um veio preenchida por quartzo.

Foto 39 – À esquerda dois grandes cristais um de piroxênio e um de plagioclásio, em meio à matriz mais fina. À direita uma maior concentração de material vítreo desvitrificado

A porção mais escura da rocha exibe granulação fina grande quantidade de vidro recristalizado, com estrutura de fluxo magmático, aparentando tratar-se de material de borda do corpo, resfriado mais rapidamente pelo material do interior. Esse material contém grande quantidade de material vítreo desvitrificado (amorfo), com piroxênio e filossilicatos de cor verde, quando comparado com a porção mais clara, evidenciando maior susceptibilidade ao intemperismo.

4.4.2. Ensaios Geomecânicos

Os ensaios em laboratório envolvem um volume muito reduzido, considerando-se a variedade litológica, sendo necessário efetuar um número muito elevada de forma a contemplar está variabilidade de parâmetros geomecânicos possíveis.

Estes ensaios são extremamente importantes na aplicação dos sistemas empíricos de classificação, como por exemplo, os ensaios de resistência à compressão uniaxial, que é uma referenciam fundamental para a definição do “RMR”.

No caso dos maciços exibirem acentuada anisotropia, os ensaios devem ser realizados com a finalidade de se definirem os parâmetros que traduzem essa anisotropia. Acresce ainda que nos maciços com comportamentos de fluência devam ser realizados ensaios específicos.

Para a caracterização geomecânica das rochas do maciço, e fossem as mais representativas do maciço foram selecionadas nos derrames basálticos amostras de suas diferentes litologias: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica, em testemunhos de sondagens rotativas na área prevista para a fundação da barragem, a citar:

- Ensaios de índices físicos - porosidade aparente, absorção de água, massa específica seca, massa específica saturada;

- Ensaios de resistência - uniaxial com medida de módulo de elasticidade; ensaio de compressão diametral ou brasileiro;
- Ensaios de compressão triaxial em multi-estágios, com medidas de módulo de elasticidade.

As amostras coletadas de testemunhos de sondagens rotativas foram.

Os resultados dos ensaios foram agrupados conforme as litologias identificadas no sítio, sem especificar os derrames, visando assim verificar o comportamento de cada litologia. Sendo colocada a brecha basáltica como o material de menor resistência aparente (colocadas no extremo do gráfico).

Nos Gráficos apresentados a seguir pretendeu-se dar um destaque para a variação das características das rochas vesículo-amigdaloidal de acordo com as concentrações destas estruturas, onde estas variam de 0% (basalto denso) a 70 % onde foram enquadradas as brechas basálticas.

Estimado, através de experiências anteriores, que estas duas litologias apresentem características nos extremos, superiores e inferiores, de resistência de todo o maciço, e as rochas com vesículas e amídalas apresentam valores intermediários.

Os gráficos 29 a 32 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização física das amostras, correlacionadas com o tipo da litologia, e as diferenciando quanto o percentual de vesículas e amídalas presentes no basalto e a brecha como caso extremo.

Gráfico 29 – Associação da porosidade aparente de acordo com a concentração de vesículas e amígdalas.

Gráfico 30 – Associação da absorção de água, de acordo com a concentração de vesículas e amígdalas.

As rochas de estrutura maciça, como no caso do basalto denso e das amostras com amígdalas e pouco vesicular, apresenta um teor de porosidade variando entre 1% e 6%, e absorção de água menor que 2%. Nota-se que com o maior número de vesículas na rocha (aberturas), maior é a porosidade aparente e a absorção do maciço, onde a porosidade nestas amostras variam de 10% à 13% e a absorção de água entre 2% e 5,5%.

Estas diferenciações de materiais ocorrem principalmente com as amostras de brechas basálticas, onde é observado que quanto maior a concentração de vesículas associadas, assim como de sedimentos (principalmente arenitos Botucatu), maior é o valor da porosidade do maciço alcançando variações de até 18%, dentro desta mesma litologia e absorção de água de até 10%.

Pode-se observar um aumento na porosidade aparente e na absorção de água, e, conseqüentemente, diminuição da massa específica, com o aumento da concentração de vesículas e amígdalas, bem como as amostras de brecha basáltica que apresentaram os maiores valores de absorção de água.

Nos gráficos a seguir, são apresentadas as correlações entre as litologias e a massa específica seca (Gráfico 31) e a saturada (Gráfico 32).

Observa-se com o resultado desta análise que a variação da massa específica é pouco significativa para o basalto denso e para as amostras com concentração de amígdalas menor que 10% e variações maiores nos basaltos com maior concentração (Sendo uma relação muito intensa quando ocorrem associados principalmente as vesículas). Já as Brechas apresentam uma variação muito significativa com variações de até 0,25 g/cm³, notando-se uma significativa alternância do material quando submetido a saturação.

Gráfico 31 – Associação da massa específica seca com a concentração de vesículas e amídalas.

Gráfico 32 – Associação da massa específica saturada com a concentração de vesículas e amídalas.

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial e dos módulos de elasticidade para as diferentes litologias são apresentados nos gráficos 33 e 34 a partir dos dados apresentados no Quadro 9 em anexo.

Gráfico 33 - Resistência a compressão uniaxial das amostras de acordo com a porcentagem de vesículas e amídalas (sendo as Brechas colocadas no extremo do gráfico) – dados do gráfico no anexo – quadro 9.

Gráfico 34 – Módulo de elasticidade das amostras de basalto e brecha basáltica.

Com esta associação, pode ser notado, que ao contrário do esperado, a maior concentração de amígdalas e vesículas na rocha, não dão ao basalto vesículo amigdaloidal uma resistência menor proporcional ao aumento da concentração destas estruturas, assim como não interferem quanto ao módulo de elasticidade, onde é observado uma variação (nas rochas com concentração de amígdalas e vesículas de 10%) de 21 Mpa (rocha fraca) a 230 Mpa (rocha resistente) e módulo de elasticidade 31 Gpa a 67 Gpa e as que apresentam maiores concentrações destas estruturas em valores intermediários a estes.

As amostras de basalto denso apresentaram uma variação dentro do esperado (com exceção de um resultado anômalo) oferecem de forma geral como uma rocha resistente a este esforço e grandes resistências aos módulos de elasticidade.

A brecha basáltica apresentou o comportamento usualmente esperado: resistência e módulo de elasticidade inferior aos dos basaltos, porém os resultados mostram que a brecha basáltica apresenta boas características de resistência de deformabilidade, não configurando um contraste acentuado as outras rochas.

No Gráfico 35 observa-se a relação entre o módulo de elasticidade (considerando este como sendo um módulo de deformação quando se trabalha com o material no regime elástico) e a resistência a compressão uniaxial.

Com os dados do gráfico 35, pode ser observado que há uma correlação entre o módulo de elasticidade e o valor de resistência a compressão, estabelecendo-se duas tendências uma em que o valor de elasticidade é igual a 400 vezes o resultado do ensaio de resistência a compressão uniaxial e outra tendência onde o valor do módulo de elasticidade é 200 vezes maior.

Gráfico 35 – Módulo de elasticidade versus resistência a compressão uniaxial das amostras de rocha.

Os resultados de resistência à tração obtidos nos ensaios de compressão diametral são apresentados no Gráfico 36.

Com os resultados apresentados no gráfico verifica-se que os resultados de resistência a tração com valores maiores para os basaltos densos, e para as rochas de basalto vesículo amigdaloidal variando de ≈ 8 Mpa a ≈ 15 Mpa muito similar aos resultados obtidos nos basaltos denso, que variam de ≈ 12 Mpa a ≈ 20 Mpa. As brechas tiveram uma resistência menor variando de ≈ 5 Mpa a ≈ 12 Mpa.

Gráfico 36 – Resistência a tração em amostras de acordo com a porcentagem de vesículas e amígdalas (sendo as brechas colocadas no extremo do gráfico).

No gráfico 37, nota-se que a razão entre a resistência a tração e a compressão é maior para a brecha basáltica ($\approx$ dúctil) do que para os basaltos ($\approx$ rúptil), onde as amostras que

apresentaram maiores resistência nos ensaios uniaxiais (basalto denso) tiveram valores de resistência a tração intermediários, apresentando pouca relação entre os resultados das rochas mais rúpteis.

Gráfico 37 – Resistência a tração versus resistência a compressão simples.

Os resultados dos ensaios de compressão triaxial multi-estágios foram realizados, levando a ruptura amostras em diferentes tensões de confinamento. O círculo de Mohr o valor apresentado, tem valores correspondente a média dos resultados dos ensaios de compressão uniaxial determinadas em todos os ensaios realizados para cada litologia.

Estes resultados são associados aos ensaios de compressão triaxial em tensões distintas de confinamento que foram realizados para verificar a influência do confinamento no comportamento elástico do material, estes dados são apresentados no Quadro 10 e 11.

No Gráfico 38 são apresentados os resultados dos ensaios de compressão triaxial para as amostras de basaltos vesículo amigdaloidal, associados com a média dos resultados de ensaio uniaxial.

Gráfico 38 – Círculos de Mohr representativos dos estados de tensões na ruptura para os ensaios (uniaxiais e triaxiais) nas amostras de basalto vesículo-amigdaloidal (resultados no Quadro 10 - anexo).

No gráfico e nas tabelas acima da amostra nº 2 apresentam à resistência a compressão triaxial muito próximo a resistência média dos ensaios de compressão uniaxial, já as amostras 3 e 4 os valores são duas vezes maior.

Na tabela 31 é apresentado a foto e o gráfico como a deformação axial associado ao esforço com o aumento das tensões da amostra ensaiada (nº3) onde a ruptura neste testemunho ocorreu à tensão quatro vezes maior do que a tensão aplicada no ultimo ciclo pré-ruptura, definidas para as necessidades de esforços solicitadas em projeto.

Tabela 31 - Amostra e gráfico da amostra 3.

No Gráfico 39 são apresentados os resultados dos ensaios de compressão triaxial para as amostras de basalto denso associados a média dos resultados de ensaio uniaxial.

Gráfico 39 – Círculos de Mohr representativos dos estados de tensões na ruptura para os ensaios (uniaxiais e triaxiais) nas amostras de basalto denso (resultados no Quadro 10 - anexo).

No gráfico e nas tabelas acima da amostra nº 2 apresentam uma resistência a compressão triaxial muito próximo a resistência média dos ensaios de compressão uniaxial (assim como já tinha ocorrido com os basaltos vesículo-amigdaloidal), as amostras 3 e 4 os valores superiores havendo uma diferença de ≈ 120 Mpa entre as amostras.

Na tabela 32 é apresentado a foto e o gráfico como a deformação axial associado ao esforço com o aumento das tensões da amostra ensaiada (nº 4), onde a ruptura neste testemunho ocorreu à tensões quatro vezes maiores do que a tensão aplicada no último ciclo pré-ruptura, definidos para as necessidades de esforços solicitadas em projeto.

Tabela 32 – Amostra e gráfico da amostra 4.

Com os dados obtidos observa-se que o possível aumento no módulo de elasticidade do material associado ao aumento da tensão de confinamento foi pequeno, conforme esperado para materiais mais rígidos. Na Tabela 33 é apresentado o resumo dos resultados de laboratório com os valores médios e a variação para as litologias.

Tabela 33 – Resumo dos ensaios

<i>Propriedades</i>	<i>Unidades</i>	<i>Basalto Denso</i>	<i>Basalto<10%v.a.</i>	<i>Basalto20-50%v.a.</i>	<i>Brecha Basáltica</i>
<i>Massa específica seca</i>	<i>kg/cm³</i>	2,8 ± 0,1	2,7 ± 0,1	2,45 ± 0,15	2,4 ± 0,3
<i>Porosidade Aparente</i>	<i>%</i>	2 ± 2	4 ± 2	8 ± 4	10 ± 10
<i>Resistência a compressão</i>	<i>MPa</i>	190 ± 90	120 ± 100	110 ± 50	70 ± 40
<i>Módulo de Elasticidade</i>	<i>GPa</i>	60 ± 20	50 ± 20	40 ± 10	25 ± 10

% v.a. – porcentagem de vesículas e amídalas
(Compete a uma alteração nas características geomecânicas na rocha)

O que se observa com os ensaios realizados, é que há uma grande variação nos valores obtidos para litologias similares, o que remete a evidência de grande variação dos componentes geomecânicos do maciço, trabalhando dentro de um intervalo de resistência muito elevado.

4.5. CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO

Nos maciços marcadamente heterogêneos, a caracterização assim como a classificação geomecânica é um tanto quanto complexa. A definição determinística dos parâmetros e da geometria do zoneamento são tarefas muito difíceis.

Não obstante, têm vindo a serem propostas metodologias de caracterização que combinam de formas diferentes ferramentas probabilísticas, resultados de ensaios, aplicação dos sistemas empíricos e resultados da observação.

Empregar sistemas de classificação Geomecânica torna-se bastante atraente em várias situações que envolvem mecânica das rochas, apesar de que a aplicação dessa abordagem ainda é bastante polêmica e necessita ser mais bem estudada.

Sendo imprescindível, para uma boa aplicação, realizar uma observação focada no maciço rochoso, que pode incluir a execução de ensaios simples.

As generalizações inerentes a essa metodologia por vezes são inadequadas para descrever a ampla gama de especificidades que envolvem as rochas (Herget, 1988), pois extrapolam informações obtidas em alguns pontos do maciço rochoso para todo o resto do mesmo (Ojima, 1982).

A reação do maciço, às solicitações impostas durante a escavação das fundações, dependerá de suas características geomecânicas, tais como litologia, grau de alteração da rocha, resistência, presença e condição das descontinuidades etc., levantadas na etapa de caracterização geomecânica.

A classificação de um maciço organiza estas características em grupos ou classes, de forma que se possa associar a estes grupos um padrão de comportamento (Serra & Ojima, 2004).

Para a realização de uma classificação adequada do maciço que se trabalhou, considerou-se a utilidade e a necessidade da classificação, onde a sensibilidade de seus parâmetros, a precisão de cada medição e da medida final, associados aos custos de usar a classificação e efetiva condição de sua utilização (Pincus, 1988).

Como já foi citado, para que haja uma boa compreensão das características das fundações da área de estudo é muito importante utilizar mais de um sistema de classificação, verificando qual delas se aplica melhor as características do maciço e as necessidades do projeto. Já que as classificações se baseiam em critérios distintos, tornando-se interessante uma análise comparativa de seus resultados.

É interessante o uso de ao menos dois sistemas de classificação, conforme é aconselhado por Hoek (2007).

Porém os sistemas de classificação têm de ser calculado pela avaliação dos itens deste sistema, somando-se assim os pesos, e não pela correlação através de fórmulas, pois não se sabe até que ponto esta correlação é aplicáveis aos tipos rochosos presentes neste eixo, ou em qualquer outro maciço.

Neste estudo será utilizado como métodos de classificação o “RMR” de Bieniawski, o “Q” de Barton e o “GSI” de Hoek & Brown.

O sistema “RMR” e “Q” recomendam soluções para problemas de engenharia, como suporte necessário para escavações em um maciço rochoso de acordo com suas demissões, enquanto que o “GSI” visa apenas à determinação dos parâmetros do maciço rochoso.

A seguir, são apresentadas as classificações geomecânicas realizadas com os testemunhos de sondagens da terceira etapa de campanha de caracterização do maciço, se restringindo as investigações realizadas na região do eixo da barragem e no leito do rio.

4.5.1. Classificação de Barton (Índice “Q”)

Como já apresentado o índice de qualidade do maciço rochoso “Q” é função de seis parâmetros, cada um dos quais pode ser estimado por meio da análise da superfície do maciço rochoso aplicando a equação:

$$Q = \left(\frac{\text{RQD}}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{\text{SRF}} \right)$$

Se utilizando destes dados obtivemos uma série de dados multivariados em todo o maciço variando de acordo com a litologia, profundidade de amostragem e pelo derrame. Estes dados são apresentados de forma resumida no Quadro 12 em anexo e na planilha do Quadro 18.

No Gráfico 40 são apresentados os resultados obtidos pela classificação do maciço pelo sistema “Q”, onde eles se apresentam em 35% da espessura investigada constituída por um maciço Bom e em 30% Extremamente bom, estabelecendo a fundação características geomecânicas positivas para a implantação das escavações.

Gráfico 40 – Distribuição das qualidades do maciço (“Q”) de acordo com a porcentagem investigada.

No Gráfico 41 observa-se que os basaltos tanto os densos quanto as vesículo amigdaloidal, são as rochas que apresentam as melhores características geomecânicas. As brechas basálticas oferecem uma menor qualidade, mas com características predominantemente regulares.

Onde no conjunto dos dados observa-se que se deve ter uma maior atenção para o derrame composto por riolacitos onde 70% das investigações realizadas neste trecho se apresentam como uma rocha excepcionalmente ruim.

Gráfico 41 – Valores de “Q” obtidos no maciço de acordo com a concentração em espessura investigada individualizado pelos tipos de rocha

Para a correlação dos valores obtidos com o sistema “Q”, com os demais princípios, padronizou-se adotar aos resultados os índices do sistema “RMR” dentro dos intervalos oferecidos na tabela 22. Para esta correlação foram utilizadas as duas equações apresentadas anteriormente onde $RMR=9\ln Q+44$ e $RMR=10,5\ln Q+42$, com a aplicação destas equações se verificou que estas apresentaram diferenças insignificantes para os dados obtidos, sendo possível a utilização de qualquer uma das duas para a padronizações dos dados.

Com estes dados foi criado um modelo 2D para o estudo da possível distribuição das classificações pelo sistema “Q” no eixo da barragem apresentados na Figura 26. Neste modelo foram utilizados métodos geoestatísticos através das ferramentas de Krigagem associado a interpolação de dados da Tabela 18 em anexo.

Nota-se que para este modelo só foram utilizados os dados obtidos no maciço rochoso, se descartando a cobertura de solo que existe na superfície das ombreiras.

Verifica-se com o modelo que ao longo da seção da barragem o maciço rochoso apresenta-se predominantemente classificado como sendo uma maciço bom (Classe II) a muito bom (Classe I) com exceção do topo das obreiras onde o maciço é predominantemente Classe V – ruim, esta classificação também ocorre pontualmente em alguns trechos do maciço, que quando cruzadas com o modelo geológico verifica-se que se concentram principalmente junto a pontos de contato entre os derrames.

Para estes dados foi formulado o Gráfico 42. Neste notou-se que as brechas e os basaltos densos e os vesículo amigdaloidal apresentam em mais de 60 % dos casos rochas classificadas como boa qualidade para a execução das escavações. Com a aplicação deste método de correlação, quando se transformada para o padrão “RMR”, não apresentando muita diferença com o estimado pela individualização aplicada por Barton.

Gráfico 42 – Classificação do maciço pelo sistema “Q” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre as litologias que ocorrem no sítio estudado

Figura 26 – Modelo com a distribuição da classificação eomecânica “Q” ao longo da seção da barragem

Com os dados apresentados verifica-se que em mais de 60% das rochas são compostas por um maciço de Classe II – “Bom”, com exceção dos riolitos que estão em 80 % inseridos por rochas de Classe V.

Desconsiderando os riolitos as brechas basálticas são as que apresentam os menores índices de qualidade (25% tidas como Classe III – regular) do maciço e os Basaltos denso são os que apresentam os melhores índices com cerca de 23% classificados como sendo um maciço extremamente Bom.

No entanto verifica-se que todas as rochas, com exceção dos riolitos apresentam uma características geomecânicas positivas

Para verificar o comportamento das classificações apresentadas em cada derrame foi realizado um estudo comparativo entre os valores obtidos em cada um dos derrames, através do Gráfico 43.

Gráfico 43 – Classificação do maciço pelo sistema “Q” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre os derrames ao longo do eixo da barragem.

Com estes dados verifica-se que o derrame A como esperado (composto por riolitos) apresenta cerca de 80% dos casos composto por um maciço de Classe V, sendo verificado nos derrames B e D em 20% e nos derrames L, M e N menores que 10% de ocorrência de maciços desta classe, já nos outros maciços investigados não apresentam rochas classificadas como sendo muito ruim.

No entanto os derrames de modo geral são classificados predominantemente como sendo de Classe II – bom, com características geomecânicas positivas, um destaque positivo são para os derrames L que apresenta quase 50% do derrame classificado como sendo de Classe I e o Derrame C com cerca de 35%.

4.5.2. Classificação de Bieniawski (Índice “RMR”)

A classificação do “RMR”, como apresentada no capítulo 3.3.2, toma em consideração 5 (cinco) diferentes parâmetros: Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; “RQD”; Espaçamento entre as descontinuidades; Condições das descontinuidades e Condições da água nas fraturas.

A cada um destes parâmetros é atribuído um valor numérico (obtido com a utilização da Tabela 19). Para obter o índice da classificação “RMR”, somam-se os valores numéricos obtidos nos 5 parâmetros, obtendo-se as classes correspondentes que são divididas em intervalos padronizados (Tabela 22), para isso utilizou-se o Quadro 14 e o 18 em anexo.

Com o objetivo de verificar a influência no valor do “RMR” dos tipos de escavações aplicadas de acordo com a localização dentro do empreendimento, assim como a influência das descontinuidades que estão a favor ou contra o corte das escavações foi formulado o Gráfico 44, para que haja um confronto dos resultados obtidos.

Gráfico 44 – Comparação entre os dados de “RMR” utilizando a Tabela 21 (efeitos da orientação das descontinuidades e das estruturas) e o “RMR” considerando este com extremamente favorável.

Neste gráfico observa-se que há um grande acréscimo nas características do maciço, onde se verifica que os dados obtidos quando não se considera os efeitos da orientação das escavações e das descontinuidades do maciço, sendo este dado um item de extrema influência para este método.

Com estes dados foi possível criar um modelo 2D para o estudo da possível distribuição das classificações pelo sistema “RMR” no eixo da barragem apresentados na Figura 27.

Neste modelo foram utilizados métodos geoestatísticos através das ferramentas de Krigagem com a utilização da interpolação de dados.

Figura 27 – Modelo com distribuição da classificação geomecânica “RMR” ao longo da seção da barragem

Para correlacionar a classificação atribuída ao maciço com o tipo de litologia correspondente realizou-se o Gráfico 45.

Gráfico 45 – Classes do maciço no sistema “RMR” e separados entre as litologias que ocorrem no eixo estudado

Com os dados apresentados verifica-se que em mais de 60% das rochas são compostas por um maciço de Classe III – “Bom”, com exceção dos riolitos que estão em 80 % inseridos por rochas de Classe V as demais rochas estudadas compõem cerca de 5 % nesta classe.

No maciço como um todo o basalto vesículas amigdaloidais (BVA) são os que apresentam os melhores índices onde em cerca de 40% deles estão classificados como sendo um maciço Bom (Classe II).

Para verificar o comportamento das classificações apresentadas em cada derrame foi realizado um estudo comparativo entre os valores obtidos em cada um dos derrames, através do Gráfico 46.

Gráfico 46 – Classificação pelo sistema “RMR” – Separados entre os derrames ao longo do eixo da barragem.

Com estes dados verifica-se que o derrame A como esperado (composto por riolitos) apresenta cerca de 80% dos casos composto por um maciço de Classe V, sendo verificado nos derrames B, D, F, H, K e L em ocorrências maiores que 10 % do total do derrame se encontram nesta classe.

No entanto os derrames de modo geral são classificados predominantemente como sendo geomecânicas intermediárias de Classe III – Regular, onde apenas os derrames C, D, M, N e O apresentam maciços classificados como sendo da Classe II – Bom, com um especial destaque para o derrame M onde mais de 65% do derrame é composto por rochas nesta classe.

4.5.3. Classificação de Hoek e Brown (Índice “GSI”)

O índice “GSI” foi utilizado para avaliar os parâmetros geomecânicos do maciço rochoso, se utilizando para classificá-los das Tabelas 24 e 25 apresentadas no Capítulo 3.3.3.

Os resultados da aplicação destes dados são apresentados nos quadros 16 e 18 em Anexo.

Para a verificação das diferenças obtidas entre a aplicação direta do método, através da aplicação das tabelas correspondentes e da correlação matemática, entre o método “RMR” e “Q”, foram aplicadas a esta classificação as correlações com a fórmula: $GSI = RMR - 5$.

E como é sugerido pela correlação foi aplicada a equação $GSI = \ln Q' + 44$ para os resultados do maciço que tiveram valores de “GSI” menores que 23 pontos. Onde o Q' é calculado com base nos valores do “Q” (Quality) sem considerar a tensão do maciço “SRF” e o efeito da água subterrânea “Jw”, na determinação do índice, por serem fatores já considerados em projeto se obtendo o gráfico 47.

Gráfico 47 – Comparação entre os dados de “GSI” utilizando as Tabelas e o “GSI” calculado utilizando os valores do “RMR” e do Q' .

Com os dados apresentados no Gráfico verifica-se que os resultados do “GSI”, quando considerado as correlações apresentam uma relativa melhora nos padrões de qualidade do maciço, não ocorrendo em nenhum trecho do maciço inserido na classe V - muito ruim. No entanto em ambos os casos o maciço se encontra classificado como um bom maciço dentro da escala apresentada para o “RMR”.

Par tanto se estabeleceu utilizar os resultados obtidos através das tabelas de classificação do sistema aplicado, com os dados obtidos realizou-se a padronização, o transformando para o sistema “RMR”, e obtendo-se as classes correspondentes divididas segundo os intervalos propostos na Tabela 22.

Com estes dados foi possível criar um modelo 2D para o estudo da possível distribuição das classificações pelo sistema “GSI” no eixo da barragem apresentados na Figura 28.

Neste modelo foram utilizados métodos geoestatísticos através das ferramentas de Krigagem com a utilização da interpolação de dados. Nota-se que para este modelo só foram utilizados os dados obtidos no maciço rochoso, se descartando a cobertura de solo que existe na superfície das ombreiras.

Verifica-se com o modelo que ao longo da seção da barragem o maciço rochoso apresenta-se predominantemente classificado como sendo um maciço bom (Classe II) a muito bom (Classe I) com exceção do topo das obreiras onde o maciço é predominantemente Classe IV – ruim a Classe V- muito ruim.

Esta classificação também ocorre pontualmente em alguns trechos do maciço, que quando cruzadas com o modelo geológico verifica-se que se concentram principalmente junto a pontos de contato entre os derrames.

Com a análise dos resultados apresentados no Gráfico 48, pode-se observar que através da classificação as rochas são predominantemente de Classe II – Boa, com exceção do topo das ombreiras onde ocorrem as camadas riolíticas, que apresentam em 76 % dos casos, classificada como sendo um maciço de classe V, muito ruim.

No maciço como um todo o basalto vesículos amigdaloidais (BVA) são os que apresentam os melhores índices onde em cerca de 80% deles estão classificados como sendo um maciço Bom (Classe II) ou Muito Bom (Classe I).

Figura 28 – Modelo com a distribuição da classificação geomecânica “GSI” ao longo da seção da barragem

Gráfico 48 – Classificação do maciço pelo sistema “GSI” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre as litologias que ocorrem no sítio estudado.

Para verificar o comportamento das classificações apresentadas em cada derrame foi realizado um estudo comparativo entre os valores obtidos em cada um dos derrames, através do Gráfico 49.

Gráfico 49 – Classificação pelo sistema “GSI” – individualizado em classes de maciço do sistema “RMR” e separados entre os derrames ao longo do eixo da barragem.

Com estes dados verifica-se que o derrame A como ocorrido em todos os sistemas de classificação (composto por riolitos) apresenta cerca de 80% dos casos composto por um maciço de Classe V. Nos derrames F, H, J, L, e M apresentam pequenos trechos de Classe V,

já nos derrames B (15%), K(22%) e M (32%) apresentam trechos ainda mais representativos do maciço.

No entanto os derrames de modo geral são classificados predominantemente como sendo geomecânicas intermediárias de Classe III – Regular, onde apenas os derrames C (22%), F (18%), L (4%), M (18%), N (5%) apresentam maciços classificados como sendo da Classe II – Bom, com um especial destaque para o derrame D (52%) e O (55%) que tem mais de 50% do derrame correspondente a esta classe.

4.5.4. Comparação dos resultados obtidos com os três métodos de classificação

Para se comparar os dados obtidos com os três sistemas de classificação podem-se tomar como base as diferenças quanto a litologia e derrame de ocorrência.

A seguir será feito um confronto entre os métodos de classificação adotados se utilizando para este estudo do método de comparação gráfica individualizando o maciço entre os tipos litológicos que o compõe, observando em cada uma delas o comportamento distinto, na relação entre as classificações.

No Gráfico 50, é apresentada a correlação entre as classificações geomecânicas aplicadas a litologia que cobre os topos das obreiras, constituída por riocacitos e que compõe todo o derrame A.

Gráfico 50 – Classificação geomecânica do riocacito em comparação com os três métodos de classificação.

Pode ser notado que nesta litologia as classificações apresentaram resultados similares principalmente no sistema “Q” e “RMR”, onde houve um desvio de apenas 1%, o sistema “GSI” apresentou um comportamento um pouco menos conservador para alguns dados. No

entanto nos três métodos de classificação, em 80% dos casos o maciço nesta litologia (derrame A), apresenta um comportamento “Muito Ruim” (Classe V).

No gráfico 51 são aplicados aos basaltos a mesma metodologia aplicadas para a litologia anteriormente apresentadas. Neste confronto é observado que neste caso os padrões de classificação “RMR” apresentam uma correlação muito grande, onde neste sistema a rocha é predominante classificado como “Regular” (Classe III).

Gráfico 51 – Classificação geomecânica do basalto em comparação com os três métodos de classificação.

O sistema “Q” apresenta resultados menos conservadores nesta litologia, apresentando valores onde o maciço é classificado predominantemente como “Muito Bom” (Classe I) a “Bom” (Classe II) em 83% dos casos, com o mesmo padrão de similaridade para o sistemas “GSI”, que apresentam características mais positiva para as escavações nesta litologia, do que as que são apresentados na classificação “RMR”, onde a porcentagem referente a esta classe é de apenas de 11%.

Nos trechos em que a rocha apresenta características “ruins” (Classe IV) a “muito ruins” (Classe V), o mesmo padrão de similaridade entre os sistemas é mantido entre o “Q” e o “GSI”, com diferenças menores que 1% entre eles e onde 8% dos dados estão nestas classes. No sistema “RMR” estas classes representam cerca de 23% de toda a espessura de ocorrência desta litologia.

O Gráfico 52 apresenta a classificação geomecânica realizada nas litologias compostas por basaltos vesículo amigdaloidal (superior a 10% de concentração destas estruturas), onde neste tipo de litologia é onde ocorreu o maior índice de incoerência entre os sistemas de classificação realizados em todo o maciço, principalmente no trecho em que o maciço apresenta Classe II e III.

Pelos resultados apresentados observa-se que o sistema “Q” e o “GSI” são os únicos sistemas utilizados que apresentam rochas classificadas como sendo “muito boa” (Classe I) para 13% de todo o trecho ensaiado.

Gráfico 52 – Classificação Geomecânica do basalto vesículo-amigdaloidal em comparação com os métodos.

O maciço é classificado como de “boa” qualidade (classe II), em 69% dos trechos avaliados pelo sistema “Q” e “GSI” e para 38% quando classificado pelo “RMR”. Assim como o maciço classificado como regular (Classe III), em 13% dos trechos avaliados pelos sistemas “Q” e “GSI” e 50% para o sistema “RMR”.

Para as outras três classes de classificação onde o maciço é colocado como “ruins” ou “muito ruins” há variações menores onde a classificação equivale a 5% no sistema “Q”, 6% para o “GSI” e 12% no “RMR”, com variações de 10% entre os sistemas.

Com os resultados apresentados verificam-se que os sistemas apresentam uma grande similaridade entre os sistemas “Q” e “GSI” e uma variação em relação ao “RMR” sendo difícil de estabelecer um critério de classificação mais ou menos confiável para esta litologia, sendo possível estabelecer critérios mais conservadores com a adoção do sistema “RMR” a menos conservadores quando adotados o sistema “GSI” ou “Q”.

O Gráfico 53 apresenta a relação entre os sistemas de classificação na avaliação da brecha basáltica. Assim como no basalto denso, as brechas apresentam uma classificação muito similar entre os sistemas “Q” e “GSI”, apresentando um maciço formado por litologia predominantemente “boa” (Classe II) em 60 % do maciço avaliado. Quando esta mesma rocha é avaliada seguindo-se os critérios de classificação “RMR” o maciço é tido como “regular” (Classe III) em 65%.

Verifica-se que diferentemente do que ocorreu nos basaltos para as brechas o sistema “Q” não teve uma similaridade com os outros métodos quando a rocha é classificada como “ruim” ou “muito ruim” (Classes IV e V), onde no sistema “Q” o maciço está inserido nestas classes em 6%, no sistema “GSI” em 23% e no sistema “RMR” em 30%.

Gráfico 53 – Classificação geomecânica da brecha basáltica em comparação com os três métodos.

Esta grande diferença entre as classes apresentadas entre os métodos de classificação aplicados ao maciço constituído por brechas basálticas é muito significativa, pois pode causar grandes conflitos na interpretação dos dados levantados durante a fase de estudo.

Com a aplicação do “RMR” modificado (onde não se considera as descontinuidades em relação às escavações), os dados do “RMR” se tornam muito mais próximos dos dados apresentados pelo sistema “Q” e “GSI”, o que confere para o maciço uma característica de melhor qualidade.

Onde, os fatores que competem uma tendência mais conservadora para o sistema “RMR”, é a consideração das características estruturais do maciço (estudo da direção das descontinuidades) em relação às escavações.

4. COMPARTIMENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

No desenvolvimento da compartimentação do maciço, foi requerida certa subjetividade associadas às metodologias adotadas ao longo da pesquisa e a utilização dos dados disponíveis (amostragem).

Para a realização da compartimentação, cabe ressaltar, que são utilizados dados frutos do entendimento do profissional que os aplicou. As atividades não absolutas, não se concentram apenas nesta etapa de trabalho, decisões interpretativas foram tomadas em diversas etapas do trabalho. Estas se iniciam com os levantamentos de superfície, nas descrições dos furos de sondagem quando tomadas apreciações como a avaliação do grau de alteração das rochas e na aplicação dos sistemas de classificação geomecânica, durante a realização dos ensaios “*In Situ*” ou laboratoriais – onde estas informações passivas de análises, podem influenciar na fidelidade dos resultados finais.

A compartimentação associada aos modelos obtidos para o maciço rochoso dá ao maciço suas características globais, definindo-se as classes geomecânicas mais adequada, e as particularidades relevantes que possam condicionar o seu comportamento, tais como os tipos litológicos, o nível d’água subterrânea e o padrão das atitudes das descontinuidades, com seus respectivos parâmetros geotécnicos.

É recomendado por Serra e Ojima em 2004, para que se obtenham aspectos específicos para o local estudado, que ao se utilizar os dados da caracterização e da classificação do maciço, reunindo-se todas as informações obtidas e definidas para o maciço através da compartimentação.

Como base para a compartimentação do maciço se utilizou o modelo geológico do local, onde são definidos os tipos litológicos e o posicionamento das principais estruturas geológicas, formadas pelas individualizações horizontais dos derrames.

Os modelos geomecânicos apresentados para cada aspecto geomecânico levantado na região onde será implantada a barragem do empreendimento, é a reprodução aproximada das condições da fundação onde se abrange apenas um aspecto geomecânico como base de dados.

O grande passo para esta etapa de trabalho é que com posse de todas estas informações possamos compartimentar o maciço de forma a agrupar todas as informações geológicas e geotécnicas necessárias para a previsão do comportamento do maciço quando solicitado.

Sendo assim, pode-se compartimentar o sítio em alguns estratos de características distintas.

O nível mais superficial é formado por um capeamento de solo, que ocorre em ambas às ombreiras que se revela pouco espesso, composto por coluviões (pouco resistente a penetração e de permeabilidade mais elevada) e solos de alteração (mais resistentes a penetração e pouco permeável) com espessuras médias totais ao longo da seção estudada inferiores a 5,0 m.

Neste estrato, os maiores valores de cobertura são obtidos no topo das ombreiras, e nos trechos em que o contato entre os derrames estão junto a superfície. Isto se da por estas porções do maciço serem compostos por um material mais suscetível ao intemperismo químico devido a características intrínsecas das rochas que compõem este trecho do maciço ou proporcionadas por descontinuidades associadas a estruturas de alívio.

Os solos de alteração são compostos por um material predominantemente argilo-siltoso a silto-arenoso associados a fragmentos de rocha na matriz que tem coloração marrom avermelhada.

A transição solo/rocha ocorre com o contato abrupto entre o solo de alteração e uma camada de rocha aliviada com alto grau de fraturamento e alteração, com fraturas abertas e oxidadas que raramente ultrapassando os 15 m de profundidade. Este maciço aliviado varia para um maciço são e pouco fraturado que podem ser claramente observados nos modelos formulados e apresentados nas Figuras 22 e 23. O maciço apresenta uma espessura de alteração dos derrames básicos em geral inferiores a 5 m ao longo de toda encosta,

Litologicamente o maciço pode ser compartimentado em dois grandes grupos de rochas as que compõem os derrame ácido que são rochas riolíticas/riodacitas (derrame A) e os demais derrames basálticos.

O derrame ácido de cobertura ocorre acima da elevação 800 m na ombreira esquerda e 805 m na direita, constituído por rochas ácidas com alto grau de fraturamento e alteração, onde a cobertura de solo com espessuras superiores a 10 m, com grandes blocos de rocha dispersos em toda a matriz.

Abaixo deste derrame ácido, foi identificada uma seqüência de 14 derrames basálticos, denominados seqüencialmente de “B” a “Q” (com supressão das letras “E” e “I” devido a evolução das interpretações ao longo dos estudos) a partir da elevação 805m até a elevação 570 m aproximadamente, são dispostos de forma subhorizontal com mergulhos da ordem de 0,5 graus para SW. No sítio os derrames de modo geral tem espessura relativamente pequenas

– em torno de 20 m – com exceção dos derrames “F”, “L” e “N” que são mais espessos com espessuras em torno de 30 m.

De modo geral os derrames se caracterizam por apresentar uma camada central de basalto denso, limitada na base por delgada uma camada de basalto amigdaloidal e no topo uma camada de basalto vesículo-amigdaloidal mais espessa, com ou sem a presença de brecha basáltica.

No entanto as feições mais importantes para a fundação são os contatos entre derrames observados foram em sua grande maioria caracterizados como sendo contatos com boas características geomecânicas, tronando-se necessário salientar que estas estruturas constituem planos de descontinuidade. Nestas estruturas notou-se através dos ensaios de perda d’água um maior índice de condutividade hidráulica, assim como trechos com maior grau de fraturamento e baixo “RQD”.

Observa-se que em nenhuma sondagem foi observada a presença de grandes camadas de sedimento “inter-trap”, comuns no Serra Geral normalmente arenitos, associado aos sedimentos do Botucatu, que podem potencializar a condutividade hidráulica no maciço

Os contatos entre as litologias e os derrames deverão merecer uma atenção especial durante a fase construtiva, sendo necessário o estabelecimento da resistência a cisalhamento destes contatos, já que necessariamente estruturas de concreto serão implantadas sobre elas o que pode comprometer a estabilidade.

Abaixo destas cotas o maciço se apresenta no geral são a pouco alterado (A1-A2), pouco a medianamente fraturado (F2-F3), com muito baixos a baixos valores de condutividade hidráulica (H1-H2). A extensão do intemperismo ao longo dos contatos é predominantemente pequena, podendo ocorrer variações em pontos localizados mais profundos.

Observa-se com os resultados obtidos que a maior parte dos derrames são caracterizados, por ter condutividade “muito baixa” (H1) a “baixa” (H2). Os trechos do maciço em que a percolação é “muito alta” (H5), é mais significativo nos derrames A (89%), nos demais derrames a percolação muito alta ocorre em taxas que variam de 17% a 5%, de modo geral a condutividade hidráulica deste maciço rochoso é condicionada pelas características das descontinuidades, (como já era esperado) numa relação direta com o processo de alívio do maciço.

O contato entre os derrames “L” e “M”, não observaram grandes perdas d’água, apenas constataram que o basalto denso do derrame “L”, à medida que se aproxima da encosta, mostra-se mais fraturado e conseqüentemente com maior condutividade hidráulica.

Foi identificado a presença de passagens centimétricas (inferiores a 20 cm de espessura) de material decomposto (solo) no topo do derrame “J” a profundidades de 63,0 m e no topo do derrame “L” na profundidade de 99,0 m, com a execução de sondagens ao longo destes horizontes observou-se que este trecho de grau de alteração é uma característica isolada associada a elementos de descontinuidades locais.

No leito do rio Pelotas as sondagens confirmaram a presença do topo do derrame “M”, que se mostra mais fraturado em sua porção superficial, seguido pelo derrame “N” onde foram observados diques de diabásio e verificada a presença de zonas com disqueamento nos derrames “N”, “O” e “P”, evidenciando um maciço rochoso com tensões residuais. No leito o maciço é mais aliviado em superfície, com valores de condutividade hidráulica elevada (H5), seguido de trechos com menos condutivos de acordo com o aumento da profundidade.

Quando aplicado os sistemas de classificação no maciço optou-se pela aplicação de três metodologias distintas como apresentado nos itens anteriores, onde foram obtidos resultados diferentes cada uma com as características referentes aos dados de entrada. Sendo que os sistemas “GSI” e “Q” apresentaram resultados muito próximos diferentemente do sistema “RMR”.

Os sistemas “GSI” e “Q” apresentam resultados muito positivos para o maciço o classificando predominantemente como sendo um maciço predominantemente bom a muito bom com características positivas em praticamente todos os trechos com exceção dos já sabidos que são classificados de forma negativa como em alguns contatos e no topo das ombreiras no derrame A.

No sistema “RMR” o maciço é classificado como sendo composto por rochas predominantemente regulares. Após a análise destes dados, percebeu-se que estes valores mais conservadores apresentados pelo maciço neste sistema de classificação, são dados pela aplicação de elementos geométricos referentes as descontinuidades em relação as escavações e posição das estruturas.

No entanto deve-se destacar que em ambos os sistemas caracterizaram os trechos acima das obreiras e abaixo do leito do rio como sendo um maciço que apresentam características geomecânicas que demandem ter precaução para o desenvolvimento das escavações, assim como pontualmente alguns trechos próximos aos contatos já mencionados nesta compartimentação.

Cabe considerar que durante o projeto executivo sejam realizadas novas investigações, com a utilização de televisamento para a realização da caracterização estruturais mais precisas

nas regiões de contato e a realização de ensaio “in situ” como já citado de cisalhamento direto ao longo das descontinuidades e os ensaios fraturamento hidráulico para verificar a influência das tensões naturais no maciço – apesar de serem observadas apenas abaixo do leito do rio onde não há interferência direta com o empreendimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos projetos geotécnicos não é possível à obtenção de resultados fiáveis sem uma rigorosa caracterização dos parâmetros dos materiais envolvidos. Devido à variabilidade dos maciços a avaliação das propriedades geotécnicas é o aspecto sobre o qual recai o maior grau de incerteza.

Onde o valor característico de uma propriedade deve ser entendido como sendo uma estimativa cautelosa do seu valor médio e que a sua avaliação deve também basear-se na experiência e no risco inerente à obra. Neste trabalho executou-se uma análise crítica do modo como se obtém os parâmetros geomecânicos nas formações rochosas marcadamente heterogêneas.

Nos maciços rochosos o processo de caracterização resulta da combinação de ensaios “*In Situ*” e em laboratório com a aplicação de sistemas empíricos. Neste contexto foi sistematizada uma metodologia que se julga adequada para a avaliação do maciço.

O presente trabalho pretendeu contribuir para um melhor conhecimento dos métodos de caracterização e classificações dos maciços, já que estes levantamentos (apesar de sua fácil aplicação) são em geral muito complexos e ainda há muito que se estudar.

Com os dados obtidos percebeu que a caracterização, classificação e compartimentação geológica realizada estão extremamente condicionadas a geologia do local estudado, devido a heterogeneidade litológica.

No entanto se pode afirmar que há um padrão na distribuição espacial das características geomecânicas do maciço rochoso de fundação em termos de Alteração, Fraturamento e Permeabilidade principalmente entre as discontinuidades horizontais de contato entre os derrames. Observa-se uma variação vertical a partir da superfície topográfica e uma quase ausência de variação lateral, observada apenas nas proximidades das encostas.

Pode-se afirmar que o maciço investigado é constituído por rochas sãs a pouco alteradas, pouco a medianamente fraturadas e com valores de condutividade hidráulica, elevados em superfície e muito baixos a baixos em profundidade, configurando um maciço com boas características geomecânicas como rocha de fundação (de forma geral).

As juntas e fraturas se mostram tanto lisas quanto rugosas, mas praticamente sem preenchimento, apenas com evidências de oxidação e presença de minerais secundários. As

alterações das paredes invariavelmente acompanham a da matriz rochosa. Com a constatação da presença de um horizonte superficial mais aliviado, pouco espesso.

As rochas de fundação apresentam características geomecânicas muito boas. Os resultados nas brechas basálticas demonstraram que a presença desta na fundação não se configura como um plano de fraqueza no conjunto do maciço rochoso – principalmente pelos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

Com a aplicação dos métodos de classificação foi possível identificar um grande desvio entre os sistemas principalmente entre o sistema RMR e em relação ao “GSI” e o “Q”. Obtendo-se também uma grande alteração nos resultados obtidos quando o maciço apresentava características geomecânicas inferiores (classes IV e V).

Com todos os dados apresentados, se pode afirmar que o maciço estudado é constituído por rochas sãs a pouco alteradas, pouco a medianamente fraturadas e predominantemente com baixos valores de condutividade hidráulica, configurando um maciço com complexas propriedades geológicas, mas que apresentam características geomecânicas onde maciço é classificado predominantemente como “Bom” a “Regular”. Adequado para ser utilizado como rocha de fundação, para implantação de um empreendimento hidráulico.

Quanto a escolha do método de classificação mais adequado isso dependerá demasiadamente da posição final dos cortes dos taludes – já que a grande diferença entre os métodos aplicados é a consideração dos dados geométricos do maciço em relação aos das escavações – e dos riscos que o projetista queira assumir em utilizar classificações com valores mais conservadores (“RMR”) ou mais arrojados (“Q” e “GSI”).

6. SUGESTÕES

Em uma dissertação de Mestrado não pode haver a pretensão de abordar todos os aspectos de um tema tão complexo como o de caracterização classificação e compartimentação do maciço, para fins de utilização como fundação de um grande empreendimento. Logo, considera-se oportuno vir a prosseguir no futuro com esta temática para tentar aperfeiçoar a aplicação destes tipos de levantamento. Neste sentido, propõe-se desenvolver e implementar estudos futuros considerando aspectos de geomecânica mais recorrentes como o fenômeno de ruptura, métodos de escavação e a aplicação dos ensaios de campo.

Pontos a serem mais bem estudado:

- A Influência das amídalas e vesículas no maciço para a resistência do maciço;
- A Influência das argilas que preenchem as amídalas e imerso em parte da matriz;
- Análise e comparação das classificações adotadas e os resultados obtidos pós-escavação;
- Aplicar programas mais complexos na análise numérica, de maneira a permitir quantificar os deslocamentos totais;
- Calibrar os sistemas de classificação geomecânica e as correlações para as características do maciço estudado
- Realizar métodos comparativos com outros empreendimentos que se utilizaram da mesma metodologia;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAD, J., CELADA, B., CHACON, E., GUTIERREZ, V., HIDALGO, E., Application of geomechanical Classification to Predict the Convergence of Coal Mine Galleries and to Design Their Supports. In: Proc. 5 th Int. Congr. Rock Mech. ISRM, Melbourne, v.2, pp. E15-E19, 1983.
- ABGE, Manual de Sondagem, Boletim nº3, São Paulo, 73p., 1999.
- ABGE. Glossário de termos técnicos de Geologia de Engenharia: equipamentos de sondagens, 62p., 1980.
- ABGE, Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos, São Paulo: ABGE/CBMR, 1983.
- ALMEIDA, F.F.M. Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. Revista Brasileira de Geociências, p.325-349, 1986.
- ALMEIDA, F.F.M, Aspectos Gerais da Geologia da Bacia do Alto Paraná, *In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná*), São Paulo, 1983.
- ALMEIDA, F.F.M. Botucatu: a triassic desert of South America. In: IUGS, International Geological Congress,19, Argélia, Comptes Rendus, v.7, p. 9-24, 1953.
- ANGELIER, J., MECHLER, P., Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. Bulletin de La Societe Geologique de France, v.7, n.6, 13p., 1977.
- ARTHAUD, F., Méthode de détermination graphique des directions de reccourcissement,d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. Bulletin de La Societe Geologique de France, v7,n.11, p. 729-737, 1969.
- ASSIS, A.P., Apostila de Geotecnia Aplicada à Mineração. Universidade de Brasília, UNB, 94 p., 2001.
- ASSUNÇAO, M. The regional intraplate stress field in South America. Journal Geophysical Research., 97, p.11889-11903. 1992.

- BARTON, N., A Review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *In: Norwegian Geotechnical Institute Publication*, n. 105, 38p., 1974.
- BARTON, N., Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Society of Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 15, p. 319-368, 1978.
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. *In: Rock Mechanics, Springer Verlag*, v.6, p.189-236, 1974.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J., Estimation of Support Requirements for Underground Excavations". Society of Mining Engineering. W. A. Hustrulid editor. p. 1540-1555, 1982.
- BARTON, N. "Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System," *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, 1988.
- BARTON, N., GRIMSTAD, E., The Q-system following twenty years of application *in NMT support selection*, 1994.
- BARTON, N., Influência das propriedades das fraturas na modelação dos maciços rochosos, *In: Comitê Brasileiro de Mecânica de Rochas*, 1996.
- BELLIENI, G., BROTZU, P., COMIN-CHIARAMONTI, P., Flood basalt to rhyolite suites in the Southern Paraná Plateau (Brazil): paleomagnetism, petrogenesis and geodynamic implication. *In: Journal of Petrology*, 25, p. 579-618, 1984.
- BELLIENI, G., COMIN-CHIARAMONTI, P., MARQUES, L.S., MELFI, A.J., NARDY, A.J.R., PAPTRECHAS, C., PICCIRILLO, E.M., ROISEMBERG, A., STOLFA, D., Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from Paraná Plateau (Brazil): Geological, mineralogical and petrochemical relationships. *In. Journal of Petrology*, v.27, n.4, p. 915-944, 1986.
- BIENIAWSKI, Z. T., Engineering Classification Rock Masses. *The Civil Engineer in South Africa*, v.15, p.335-343, 1973.

- BIENIAWSKI, Z. T., The Point Load Test in Geotechnical Practice. *In: Eng. Geol.*, Sept., p. 1-11, 1975.
- BIENIAWSKI, Z. T., Rock Mass Classification in Rock Engineering". *In: Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, p.97-106, 1976.
- BIENIAWSKI, Z. T. "Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 15, p. 237- 248, 1978.
- BIENIAWSKI, Z. T., The rock Mass Rating ("RMR") System (Geomechanics Classification) in Engineering Practice. *In Systems for Engineering Purposes*. Philadelphia. p 17-31, 1988.
- BIENIAWSKI, Z.T., Engineering Rock Mass Classification - A complete Manual for Geologist, Mining and Petroleum Engineers, New York, John Wiley, 251p., 1989.
- BIENIAWSKI, Z.T., Classification of Rock Masses for Engineering: the "RMR" System and Future Trends. *In: Comprehensive Rock Engineering*, v.3, p.553-573, 1993.
- BJORNBERG, A.J.S., KUTNER, A.S., Resumo das Feições Geológicas de Interesse às Fundações em Rocha, em Barragens da Bacia do Alto Paraná, *In: Simpósio sobre a geotecnia da bacia do Alto Paraná, São Paulo, 1983*.
- BRADY, B.H.G., BROWN, E.T., Rock mechanics for underground mining, London, UK, 527 p. 1985.
- BRADY B. H., BROWN E. T., Rock Mechanics for underground mining, 571 p., Chapman e Hall, London, 1994.
- BROCH, E., FRANKLIN, J.A., The Point Load Strength Test., *In: Int. Journal Rock Mech. Min. Sci.* 9, p. 669-697, 1972.
- CAMARGO, F.P. et al., Características Geomecânicas de Maciço Rochoso de Fundação das Estruturas de concreto da Barragem de Ilha Solteira. *In:Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 8, v.1, CBGC, São Paulo, 1972.

- CAMARGO, F.P. et al., Development of conceptual geomechanical models for foundations of concrete dam; approach applied to three projects. *In: International Symposium on Rock Mechanics related to Dam Foundations*, Rio de Janeiro, 1978.
- COON, R.F., MERRITI, A. H., Predicting In-Situ Modulus of Deformation Using Rock Quality Indexes, "Determination of the In Situ Modulus of Deformation of Rock, American Society for Testing and Material, p.154-173, 1970.
- CORNET, F.H., Stresses in rocks and rock masses, *In: Comprehensive Rock Engineering (ed. J.A. Hudson)*, Oxford, Chapter 17, Vol.3, p.297-324, 1993.
- DEERE, D.U., HENDRON, A.J., PATTON, F.D. AND CORDING, E.J., Design of surface and near surface construction in rock. *In Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst)*, p. 237-302, New York, 1967.
- DEERE, D.U. & DEERE, D.W., The Rock Quality Designations ("RQD") Index in Practice. *In: Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. Philadelphia, p.91-101, 1988.
- DEERE, D.U. Rock quality designation ("RQD") after 20 years. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station, 1989.
- DYKE, C.G. Core discing: its potential as an indicator of principal in situ stress directions, *In: Proc. Int. Symp. On Rock at Great Depth, Pau, Balkema, Rptterdam*, v.2, p1057-1064, 1998.
- FERREIRA, F.J.F. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 170p. 1982.
- FRANCIS, F. O., ROCHA, H.C., Obras Subterrâneas Cíveis. *In Geologia de Engenharia*, Oliveira, ABGE, São Paulo, SP, p. 439-456, 1998.
- GALLAGHER, K., HAWKESWORTH, C. J. Mantle plumes, continental magmatism and asymmetry in the South Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*, v.123, p.105-117, 1994.

- GAMA, C. D., Cálculo Expedito da Estabilidade de Túneis e de suas Necessidades de Suporte, *In: VI Simpósio Brasileiro de Mineração*, 1976.
- GAMA, C.D., Análise da composição volumétrica de maciços rochosos compartimentados. *In: Revista "Solos e Rochas"*, Rio de Janeiro, v.9, nº1, p.3-13, 1986.
- GOODMAN, R.E., Introduction to Rock Mechanics, p.562, 1989.
- GUERRA, A. T., Dicionário geológico-geomorfológico. Rio de Janeiro, IBGE, 1975.
- GUIDICINI, G. & CAMPOS, J.O., Notas sobre a Morfogênese dos Derrames Basálticos. Bol. Sociedade Brasileira de Geologia, v.17, 15-28, 1968.
- GUIDICINI, G., OLIVEIRA, A.M.S., CAMARGO, F.P., KAJI, N. Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos, São Paulo, v.4, p.275-282, 1972.
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M., Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo, 196p., 1984.
- HACK, R., ORLIC, B., OZMUTLU, S., ZHU, S., RENGERS, N., Three and more dimensional modeling, *In: Geo-engineering. Bulletin Eng. Geol. Env.*, v.65. p.143-153, 2006.
- HAIMSON, B.C., TUNBRIDGE., LEE, M.Y., COOLING, C.M., Measurements of rock stress using the hydraulic fracturing method in Cornwall U. K. – part II. Data reduction and stress calculation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr.*, v.26, n. 5 p.361-372, 1989.
- HERGET, G., Stresses in rock. Rotterdam, The Netherlands: A.A. Balkema, 179p., 1988.
- HOEK, E.; BROWN, E.T., Underground Excavations in Rock, *In: Institution of Mining and Metallurgy*, London, p.527, 1980.
- HOEK, E.; BRAY, J.R., Slope engineering, London, p.527, 1981.
- HOEK, E.; BROWN, E.T., The Hoek-Brown failure criterion, *In: 15 Canadian Rock Mechanics Symposium*, 8p., 1988.

- HOEK, E., Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), p. 4-16. 1994.
- HOEK, E. & BROWN, E.T., Practical estimates of rock mass strength. *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. 34(8), p. 1165-1186. 1997
- HOEK, E., KAISER, P.K., BAWDEN, W.F., Support of Underground excavations in and Rock. Balkema, 215p., 1995.
- HOEK, E.; BROWN, E.T., Practical Estimates of Rock Mass Strength. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, v.34, n.8, p.1165-1186, 1998.
- HOEK, E., MARINOS, P., BENISSI, M. Applicability of the Geological Strength Index ("GSI") classification for very weak and sheared rock masses. *In: The Case of the Athens Schist Formation*. *Bull. Engg. Geol. Env.*, p.151-160, 1998.
- HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., CORKUM, B. Hoek-Brown failure criterion, Vancouver, Canada, 2002.
- HOEK, E., *Rock Practical Engineering*, 237p. 2007.
- HOUDING. S.W., 3D Geosciences modeling: computer techniques for geological characterization. Berlin Springer, 309p., 1994.
- IAEG. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping, n.24, p.235-274, 1981.
- IPT. Estudos Geológicos e geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens), São Paulo, 1984.
- ISRM, Recommendations on Site Investigation Techniques, 1975.
- ISRM, Rock Characterization Testing and Monitoring. Suggested Method of International Society of Rock Mechanics. Pergamon Press, 211 p., 1981.
- KIM, K., S. A. DISCHLER, AGGSON, J. R., HARDY, M. P., The State of In Situ Stresses Determined by Hydraulic Fracturing at the Hanford Site. *In: Rockwell Hanford Operations*, Richland, Washington, 1986.

- KIRKALDIE, L., WILLIAMSON, D. A., PATTERSON, P. V. Rock material field classification procedure. *In: ____ Rock classifications Systems for Engineering Purposes*. Philadelphia, p. 32-33, 1988.
- KIRSTEN, P. O., Discussion of The Rock Quality Designations ("RQD") Index in Practice, *In: Kirkaldie, L. ed. Rock Classification Systems For Engineering Purposes*, Philadelphia, p. 32-34, 1988.
- KLENGEL, K. J. Types of rock slopes - possibilities of classification and derivation of corrective measures. *In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v. 17, p. 52-55, 1978.
- LAUBSCHER, D. H., Geomechanics classification of jointed rock masses—mining applications. *Trans. Instn. Min. Metall.* p. A1-A8, 1977.
- LAUBSCHER, D. H., A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, n° 10. p. 257-273, 1990.
- LAUFFER, H., Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. *Geol. Bauwesen* 24(1), p. 46- 51, 1958.
- LEITE, E. N., Estudo do Comportamento Geomecânico do Pilar Superior da Mina Ipueira V (Ferbasa Mineração – Andorinha, BA), *In: Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, M.G.*, 81p., 2004.
- LINS, P. G., Classificação de Maciços Rochosos: Uma Abordagem por Redes Neurais, *In: Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, 167p., 2001.
- MAFRA, J. M. Q., Estudo de Tensões Virgens em Maciços Rochoso: O Caso UHE Itá – Sissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 200p., 2001.
- MAGALHÃES, F. S., Tensões regionais e locais: casos no território brasileiro e padrão geral, *In: Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo*, 225p., 1999.

- MANTOVANI, M. S. M., WILDNER, W., JUNCHEN, P. L. Paraná Basin Magmatism, Stratigraphy and Mineralization (Southern Brazil). In: International Geological Congress, 31. p. 63, Rio de Janeiro, 2000.
- MARCHI, A.J., CURY JR.,A., ALVES, F.A., Tradução do original ABGE/CBMR, Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos de 1978, São Paulo, p.132, 1983.
- MARIMON, M.P.C., AYALA, L., MOREIRA, M.L.O., Formação Serra Geral no Sul do Brasil: rochas básicas e ácidas: sua distribuição, petrografia e litoquímica. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 32, Salvador. v.2, p.403-414, 1982.
- MARINOS, P. & HOEK, E., From The Geological to the Rock Mass Model: Driving the Egnatia Highway through difficult geological conditions, 2000.
- MARQUES L.S., CONCEIÇÃO H., PONTE NETO C.F., ERNESTO M., Litogeoquímica e paleomagnetismo dos diques alcalinos neoproterozóicos da província alcalina do sul da Bahia (setores Itabuna – Itajú do Colônia): resultados preliminares. In: *SBGq Cong. Geoq. dos Países de Língua Portuguesa*, p. 232-236, 2001.
- MELLO MENDES, F. Mecânica das Rochas. Ed. Seção de Folhas da Associação dos Estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. 541p., 1968.
- MILANI E.J., Evolução Tectôno-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v2, 255 p, 1997.
- MILANI, E.J., Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana sul-ocidental e a evolução geológica da Bacia do Paraná, In: *Geologia do Rio Grande do Sul*; Ros, L.F. & Holz,M., v 1, Rio Grande do Sul, Brasil, 302p., 2001.
- MIOTO, J. A., COELHO, L. F. M., Estado de Tensão dos Maciços Rochosos. In: ____ *Geologia de Engenharia*. 4ª Reimpressão. São Paulo: ABGE, p.153-156, 2004.

- MONTICELI, J. J., Influência da Compartimentação Geológico Geotécnica de Maciços Rochoso no Projeto de Fundações de Barragens em Fase de Viabilidade, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983.
- NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. de; BETANCOURT, R.H.S.; VERDUGO, D.R.H.; MACHADO, F.B., Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. *Geociências*, v. 21, n. 2, p. 15-32, 2001.
- NAVARRO, F.C., Caracterização Petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de “granitos” ornamentais. Dissertação de Mestrado IGCE/UNESP, Rio Claro, SP. 88p. 2002.
- OJIMA, L. M., Metodologia de Classificação de Maciços Rochoso Aplicável a Túneis. *In: Síntese de Teses de Pós Graduação n.1*, ABGE, 1982.
- OLIVEIRA, A.M., BRITO, S.N.A., Geologia de Engenharia. ABGE. São Paulo, 2000.
- OLIVEIRA,R., Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas. Conceitos Fundamentais. Metodologia de Estudo de Maciços Rochosos. *In: II Simpósio Sul Americano de Mecânica das Rochas*, Porto Alegre, Brasil. p. 203- 214, 1986.
- PAIVA FILHO, A., Estratigrafia e tectônica do nível de riodacitos pórfiros da Formação Serra Geral – o Membro Goio-En. Tese de Doutorado, 185 p., mapas e seções. 2000.
- PINCUS, H. J., Opening remarks. *In: Kirkaldie, L. (ed), Rock classification systems for engineering purposes*, Filadelfia, EUA, p.1-3, 1988.
- REDONDO, F., Classificação Probabilística do Padrão Geomecânico de um Maciço Rochoso Mineralizado com Base no Índice “RQD”. *In: Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, UNESP Rio Claro*, 80p., 2003.
- ROBERTSON, A. M., Estimating weak rock strength. *In: ____ AIME – SME Annual meeting*, Phoenix, AZ, 1988.
- ROMANA, M., “SMR” Classification. *In: International Congress on Rock Mechanics, 7th. 1991, Aachen. Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema*, v.2, p. 955-968, 1991.

- RUIZ, M.D., GUIDICINI, G., Introdução. In: *Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A. Geologia de Engenharia*. ABGE, São Paulo, p.1-5,1998.
- RZHEVSKY, V. E NOVIK, G. The Physics of Rocks. Moscow, MIR Publishers, 320p., 1971.
- SANCIO, R. T., BROWN, I. A classification of weathered foliated rocks for use in slope stability problems. In: *Australia – New Zealand Conference on Geomechanics. 1980, Wellington. Proceedings of the Australia – New Zealand Conference on Geomechanics*. New Zealand Institution of Engineers, v.2, p. 81-86, 1980.
- SCARPELLI, A. G., Classificação Geomecânica Aplicada a Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. 187p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP São Carlos, São Carlos, 1994.
- SCHEIBE, L. F., Geologia e petrologia do distrito alcalino de Lages, SC. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, USP, 224p. 1986.
- SERRA JR., E., OJIMA, L. M., Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: ____ *Geologia de Engenharia*. 4ª Reimpressão. São Paulo: ABGE, p. 211-226, 2004.
- SERRA, E., OJIMA, L. M., Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: *OLIVEIRA, A.M.S, BRITO, S.N.A. Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998.
- SILVA, C. M., NEVES, A. P. F., PEREIRA, H. C., SOUSA, M. R., Critérios para a Caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos para Obras Subterrâneas, In: *Congresso de Engenheiros, Ordem dos Engenheiros*, Vidalgo, 2001.
- SOFIANOS, A.I., MARINOS, P.G., Rock classification and primary support of a tunnel. In: *7th International Congress on Rock Mechanics*. Alemanha, v1 p.1363-1368, 1991.
- TAKEDA, F. K., Esboço geológico de Santa Catarina e geologia da região carbonífera de Santa Catarina. In: *Atlas Geográfico de Santa Catarina, Dep. Est. Geogr. Cartogr.*, p.23-28, 1958.

- TELLES, I. A., Vargas, E. A., Lira, W. W. M., Martha, L. F. Uma Ferramenta Computacional para a Geração de Sistemas de Fraturas em Meios Rochosos, PUC Rio de Janeiro, 2005.
- TERZAGHI, K., "Rock defects and loads in tunnel supports." Rock tunneling with steel supports. R.V. Proctor and T.L. White, eds., The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio, p.17-99, 1946.
- TOGNON, A. A., et al., Classificação Geotécnica de Maciços Rochoso em Túneis Viários Construção Pesado, São Paulo, 7, p. 22-30. 1977.
- TOGNON, A. A., Estudos geológicos geotécnicos para a definição da melhor alternativa do segundo conduto forçado da Usina Hidroelétrica de Eloy Chaves, rio Mogi Guaçu, São Paulo, In: *Congresso Brasileira de Geologia de Engenharia*, 3, Itapema-SC, São Paulo, ABGE, v.2, p. 425-441, 1981.
- TOGNON, A. A., Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia. 1º Edição. São Paulo: ABGE-Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985
- TURNER, A. K., Challenges and trends for geological modeling and visualization. In: *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, v. 65, n.2, p.109-127, 2006.
- VARGAS,M.; BARROS, F.P.; História das Barragens da Bacia do Alto Paraná, In: *Simpósio sobre a geotecnia da bacia do Alto Paraná, São Paulo*, v.IA, p.59-78, 1983.
- VAZ, L. F., Estudo geológico de barragens. In: *1ª Semana Paulista de Geologia Aplicada*, 1, São Paulo, 1969.
- VAZ, L. F., Aplicabilidade de Investigações e Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos para Obras Subterrâneas. In: *Simpósio Sobre Escavações Subterrâneas*, ABGE, Rio de Janeiro, v.1, p.1-21, 1982.
- WICKHAM, G. E.; TIEDEMANN, H.R., SKINNER, E.H., Support Determination Based on Geologic Predictions, Proc. Rapid Excavation Tunneling Conf., AIME, p. 43-46 New York, , 1972.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.;
NETO, E. V.S., MARQUES, A. The Paraná basin, Brazil. *In: Interior cratonic basins*,
p. 681-708, 1990.

Sites: www.alphageos.com.br
www.roscience.com, Practical Rock Engineering/ 2007
www.embrapa.br
earth.google.com

ANEXO

Quadro 1- Graus de Alteração entre as litologia

LITOLOGIA	A1	A2	A3	A4	A5
Riolito	m 10	15	1	6	8
	% 25%	38%	1%	16%	20%
Basalto	m 499	61	4	3	1
	% 88%	11%	1%	1%	0%
BVA	m 104	43	3	1	2
	% 68%	28%	2%	1%	1%
Brecha	m 10	73	12	2	6
	% 9%	71%	12%	2%	6%

Quadro 2- Graus de Fraturamento entre as litologia

LITOLOGIA	F1	F2	F3	F4	F5
Riodacito	m 0	8	1,75	0	30,2
	% 0%	20%	4%	0%	76%
Basalto	m 61	329	80	40	58
	% 11%	58%	14%	7%	10%
BVA	m 30	100	11	5	6
	% 20%	65%	7%	3%	4%
Brecha	m 2	74	12	5	9
	% 2%	72%	12%	5%	9%

Quadro 3 - “RQD” entre as litologia

LITOLOGIA	R1	R2	R3	R4	R5
Riodacito	m 3	0	3	5	29
	% 8%	0%	8%	12%	73%
Basalto	m 326	118	63	30	31
	% 57%	21%	11%	5%	6%
BVA	m 103	32	10	6	2
	% 67%	21%	6%	4%	1%
Brecha	m 65	19	14	4	1
	% 64%	18%	14%	3%	1%

Quadro 4 - Divisão do maciço quanto Condutividade
Hidráulica entre as litologia

LITOLOGIA	H1	H2	H3	H4	H5
Riodacito	m 0	3	1	0	36
	% 0%	8%	3%	0%	89%
Basalto	m 314	131	57	11	55
	% 55%	23%	10%	2%	10%
BVA	m 88	45	6	0	14
	% 57%	30%	4%	0%	9%
Brecha	m 46	39	3	0	15
	% 45%	38%	3%	0%	14%

Quadro 5 – Graus de Alteração entre os derrames

DERRAME	A1	A2	A3	A4	A5
A	m 10	15	1	6	8
	% 25%	38%	1%	16%	20%
B	m 30	19	0	7	0
	% 54%	35%	0%	12%	0%
C	m 66	21	0	0	0
	% 76%	24%	0%	0%	0%
D	m 25	9	1	0	0
	% 73%	24%	3%	0%	0%
F	m 60	15	3	0	0
	% 77%	19%	4%	0%	0%
G	m 22	7	0	0	0
	% 75%	25%	0%	0%	0%
H	m 50	19	2	0	0
	% 70%	26%	3%	0%	0%
J	m 80	10	6	0	6
	% 79%	10%	6%	0%	6%
K	m 40	20	5	0	0
	% 61%	31%	8%	0%	0%
L	m 85	16	2	0	1
	% 82%	15%	2%	0%	1%
M	m 53	22	0	0	2
	% 69%	28%	0%	0%	2%
N	m 79	19	0	0	0
	% 80%	20%	0%	0%	0%
O	m 24	0	0	0	0
	% 100%	0%	0%	0%	0%

Quadro 6 –Graus de fraturamento entre os derrames

DERRAME	F1	F2	F3	F4	F5
A	m 0	8	2	0	30
	% 0%	20%	4%	0%	76%
B	m 2	42	3	3	5
	% 4%	75%	5%	6%	9%
C	m 19	66	0	2	0
	% 22%	76%	0%	2%	0%
D	m 18	11	6	0	0
	% 52%	30%	17%	0%	0%
F	m 16	51	3	0	7
	% 21%	66%	3%	0%	10%
G	m 0	29	0	0	0
	% 0%	100%	0%	0%	0%
H	m 0	61	9	0	3
	% 0%	85%	12%	0%	4%
J	m 0	72	19	8	3
	% 0%	71%	18%	8%	3%
K	m 1	46	0	4	15
	% 2%	70%	0%	6%	22%
L	m 4	38	48	9	4
	% 4%	37%	47%	9%	3%
M	m 15	34	12	10	6
	% 19%	45%	16%	13%	8%
N	m 5	44	4	15	31
	% 5%	45%	4%	15%	32%
O	m 13	11	0	0	0
	% 55%	45%	0%	0%	0%

Quadro 7 – “RQD” entre os derrames

DERRAME	R1	R2	R3	R4	R5
A	m 3	0	3	5	29
	% 8%	0%	8%	12%	73%
B	m 35	6	9	1	4
	% 64%	10%	16%	2%	8%
C	m 85	0	0	2	0
	% 97%	0%	0%	2%	0%
D	m 27	1	2	0	5
	% 78%	1%	7%	0%	14%
F	m 48	18	6	5	0
	% 62%	23%	8%	6%	0%
G	m 27	0	2	0	0
	% 93%	0%	7%	0%	0%
H	m 34	33	0	5	0
	% 47%	46%	0%	7%	0%
J	m 51	38	12	0	1
	% 50%	38%	11%	0%	1%
K	m 39	17	5	4	1
	% 59%	26%	8%	6%	2%
L	m 54	18	16	7	8
	% 52%	18%	15%	7%	8%
M	m 48	19	7	2	0
	% 63%	25%	10%	3%	0%
N	m 24	18	27	14	15
	% 24%	19%	28%	14%	15%
O	m 23	1	0	0	0
	% 95%	5%	0%	0%	0%

Quadro 8- Divisão do maciço quanto a Condutividade
Hidráulica entre os derrames

DERRAME		H1	H2	H3	H4	H5
A	m	0	3	1	0	36
	%	0%	8%	3%	0%	89%
B	m	24	12	10	0	10
	%	44%	21%	18%	0%	17%
C	m	42	32	14	0	0
	%	48%	37%	16%	0%	0%
D	m	17	13	0	0	5
	%	49%	37%	0%	0%	14%
F	m	42	28	0	0	7
	%	54%	37%	0%	0%	10%
G	m	18	9	0	0	2
	%	62%	31%	0%	0%	7%
H	m	46	16	3	0	7
	%	64%	22%	4%	0%	10%
J	m	73	18	0	3	8
	%	72%	18%	0%	3%	7%
K	m	41	12	0	0	12
	%	62%	19%	0%	0%	19%
L	m	64	14	10	0	16
	%	62%	13%	10%	0%	15%
M	m	47	18	5	0	6
	%	61%	24%	7%	0%	8%
N	m	24	33	24	8	10
	%	25%	33%	24%	8%	10%
O	m	12	11	0	0	1
	%	49%	45%	0%	0%	5%

Quadro 9 - Resultado dos ensaios de resistência a
compressão uniaxial e Módulo de Elasticidade

Derrame	Litologia	σ_u (Mpa)	E (Gpa)
B	BD	169,99	48,53
C	BVA	230,07	54,98
C	BD	381,19	75,22
D	BVA	78,78	35,47
K	BD	89,92	68,62
K	BD	160,18	73,51
L	BRECHA	118,89	25,5
L	BRECHA	35,96	14,95
L	BRECHA	44,1	16,19
L	BVA	74,27	31,89
L	BVA	66,9	32,13
K	BD	266,84	73,96
L	BD	183,11	72,98
M	BVA	127,81	39,8
M	BVA	108,56	54,23
M	BVA	165,1	48,85
M	BVA	54,07	46,79
M	BVA	90,07	35,35
L	BD	155	41,51
L	BD	163,66	75,48
F	BD	210,46	58,82
G	BRECHA	67,76	23,57
G	BVA	180,7	67,36
G	BVA	168,22	48,31
H	BRECHA	88,15	36,71
H	BRECHA	71,24	32,59
H	BRECHA	93,08	28,13
H	BD	176,42	48,67
H	BD	307,64	61,64
J	BRECHA	48,22	*
J	BVA	21,95	44,09

Quadro 10- Resultado dos ensaios de compressão triaxial com o numero de ciclos de carga e descarga, tensões confinantes, módulo de elasticidade e tensão de ruptura para amostras de basalto vesículo amigdaloidal

Amostra	Ciclos	σ_3 (Mpa)	Módulo de Elasticidade	σ_1 máxima (Mpa)
2	1	0,00	19,60	
	2	2,00	22,36	
	3	4,00	22,93	
	4	8,00	24,11	119,93
3	1	12,00	32,86	
	2	0,00	30,82	
	3	4,00	35,06	
	4	8,00	39,76	209,99
4	1	0,00	24,75	
	2	4,00	29,11	
	3	8,00	30,35	221,60

Quadro 11 - Resultado dos ensaios de compressão triaxial com o numero de ciclos de carga e descarga, tensões confinantes, módulo de elasticidade e tensão principal de maior ruptura para amostras de basalto.

Amostra	Ciclos	σ_3 (Mpa)	Módulo de Elasticidade	σ_1 máxima (Mpa)
2	1	0,00	24,19	
	2	2,00	28,34	
	3	5,00	31,12	
	4	12,00	28,68	211,10
3	1	0,00	35,66	
	2	5,00	40,67	
	3	10,00	42,41	
	4	15,00	44,89	340,56
4	1	0,00	30,60	
	2	2,00	33,79	
	3	4,00	37,08	
	4	8,00	39,68	399,86

Quadro 12 – Resumo das classificações “Q”, separadas pela Litologia com a espessura total de ocorrência e a porcentagem equivalente

LITOLOGIA	I	II	III	IV	V
Riolito	m 0	0	3	5	32
	% 0%	0%	8%	13%	80%
Basalto	m 129	339	54	25	21
	% 23%	60%	9%	4%	4%
BVA	m 20	106	19	6	1
	% 13%	69%	13%	4%	1%
Brecha	m 5	65	27	3	3
	% 5%	63%	26%	3%	3%

Quadro 14 - Resumo das classificações “RMR”, separadas pela Litologia com a espessura total de ocorrência e a porcentagem equivalente

LITOLOGIA	I	II	III	IV	V
Riolito	m 0	0	3	5	32
	% 0%	0%	8%	13%	80%
Basalto	m 0	65	356	109	38
	% 0%	11%	63%	19%	7%
BVA	m 0	59	77	12	6
	% 0%	38%	50%	8%	4%
Brecha	m 0	9	63	25	6
	% 0%	9%	61%	24%	6%

Quadro 16 - Resumo das classificações “GSI”, separadas pela Litologia com a espessura total de ocorrência e a porcentagem equivalente

LITOLOGIA	I	II	III	IV	V
Riolito	m 0	8	0	1	30
	% 0%	20%	1%	3%	76%
Basalto	m 58	335	77	40	58
	% 10%	59%	14%	7%	10%
BVA	m 29	101	11	5	6
	% 19%	66%	7%	3%	4%
Brecha	m 0	68	11	10	13
	% 0%	67%	11%	10%	13%

Quadro 13 - Resumo das classificações “Q”, separadas pelos derrames com a espessura total de ocorrência e a porcentagem equivalente

DERRAME	I	II	III	IV	V
A	m 0	0	3	5	32
	% 0%	0%	8%	13%	80%
B	m 0	39	9	1	7
	% 0%	70%	16%	2%	12%
C	m 31	38	18	0	0
	% 35%	44%	21%	0%	0%
D	m 0	24	6	0	5
	% 0%	68%	17%	0%	14%
F	m 0	59	15	3	0
	% 0%	76%	20%	4%	0%
G	m 6	20	2	0	0
	% 22%	71%	7%	0%	0%
H	m 13	52	5	3	0
	% 18%	72%	6%	4%	0%
J	m 48	41	11	0	1
	% 47%	41%	11%	0%	1%
K	m 15	34	8	5	4
	% 23%	52%	11%	7%	6%
L	m 3	81	5	6	8
	% 3%	79%	5%	6%	8%
M	m 14	107	4	0	0
	% 19%	75%	6%	0%	0%
N	m 7	59	14	18	0
	% 7%	60%	14%	18%	0%
O	m 19	5	0	0	0
	% 80%	20%	0%	0%	0%

Quadro 15 - Resumo das classificações “RMR”, separadas pelos derrames com a espessura total de ocorrência e a porcentagem equivalente

DERRAME	I	II	III	IV	V
A	m 0	0	3	5	32
	% 0%	0%	8%	13%	80%
B	m 0	0	42	5	9
	% 0%	0%	75%	9%	15%
C	m 0	17	68	2	0
	% 0%	20%	78%	2%	0%
D	m 0	12	15	3	5
	% 0%	34%	42%	9%	14%
F	m 0	0	67	3	7
	% 0%	0%	87%	3%	10%
G	m 0	0	27	2	0
	% 0%	0%	93%	7%	0%
H	m 0	0	61	4	7
	% 0%	0%	85%	6%	10%
J	m 0	0	68	33	1
	% 0%	0%	67%	32%	1%
K	m 0	0	43	13	9
	% 0%	0%	66%	20%	13%
L	m 0	0	67	24	12
	% 0%	0%	65%	23%	12%
M	m 0	50	15	11	0
	% 0%	66%	20%	14%	0%
N	m 0	41	11	46	0
	% 0%	42%	11%	47%	0%
O	m 0	12	12	0	0
	% 0%	49%	51%	0%	0%

Quadro 17 - Resumo das classificações “GSI”, separadas pelos derrames com a espessura total de ocorrência e a porcentagem equivalente

DERRAME	I	II	III	IV	V
A	m 0	0	8	0	32
	% 0%	0%	20%	1%	79%
B	m 0	0	44	3	9
	% 0%	0%	79%	5%	15%
C	m 0	19	66	2	0
	% 0%	22%	76%	2%	0%
D	m 0	18	11	6	0
	% 0%	52%	30%	17%	0%
F	m 0	14	53	3	7
	% 0%	18%	69%	3%	10%
G	m 0	0	29	0	0
	% 0%	0%	100%	0%	0%
H	m 0	0	61	9	3
	% 0%	0%	85%	12%	4%
J	m 0	0	68	27	7
	% 0%	0%	67%	26%	7%
K	m 0	0	43	8	15
	% 0%	0%	66%	12%	22%
L	m 0	4	38	57	4
	% 0%	4%	37%	56%	3%
M	m 0	14	35	22	6
	% 0%	18%	45%	29%	8%
N	m 0	5	44	18	31
	% 0%	5%	45%	18%	32%
O	m 0	13	11	0	0
	% 0%	55%	45%	0%	0%

Quadro 18- Quadro com os dados utilizados para a classificação do Maciço

DERRAME		Esp. Perfurada vertical (m)		Zonamento		Litologia		Barton (Q)										Bieniawski ("RMR")										HOEK																					
														Correlações p/ "RMR"		CLASSE "RMR"		Parâmetros						"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"											
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23		"GSI" = lnQ +44		CLASSE "RMR"	
																				1		2		3		4- Descontinuidades				5		Desc.		"RMR"		CLASSE "RMR"		"GSI" Tabela		CLASSE "RMR"		RMR ₃ = "RMR" = "GSI" x 5		"RMR" > 23					

K	4	TOPO	BRECHA	90	4	3	2.00	0.66	5.0	4.455	2.5	33.8	57	57	III	7	20	15	4	6	3	3	10	-25	43	III	30	IV	25	IV	25	IV	
L	11.5	TOPO	BASALTO	100	4	1	0.75	1.00	1.0	33.333	2.5	33.3	76	76	II	12	20	15	4	6	1	6	15	-25	54	III	65	II	60	II	60	II	
	4.8	TOPO	BRECHA	98	6	3	1.00	0.66	5.0	6.468	2.5	49.0	61	61	II	4	20	10	2	6	3	5	10	-25	35	IV	45	III	40	IV	40	IV	
	29.2	CENTRO/BASE	BASALTO	95	6	3	0.75	1.00	2.5	23.333	2.5	63.3	73	73	II	7	20	10	2	6	1	6	15	-25	42	III	45	III	40	IV	40	IV	
M	3.2	TOPO	BVA	99	9	3	1.00	1.00	1.0	33.000	2.5	33.0	75	75	II	7	20	10	2	6	3	5	15	-7	61	III	45	III	40	IV	40	IV	
	9.7	CENTRO	BASALTO	95	9	2	1.00	1.00	0.5	42.222	2.5	21.1	78	78	II	4	20	8	1	6	1	5	15	-7	53	III	30	IV	25	IV	25	IV	
	1.8	BASE	BVA	80	9	2	4.00	1.00	1.0	4.444	2.5	4.4	57	57	III	1	17	5	0	4	3	5	15	-7	36	IV	5	V	0	V	4	V	
N	8.2	TOPO	BRECHA	97	6	3	1.00	1.00	1.0	48.500	2.5	48.5	79	79	II	7	20	15	4	6	3	5	15	-7	68	II	65	II	60	II	60	II	
	0.45	CENTRO	BASALTO	97	6	2	0.75	1.00	7.0	6.159	2.5	43.1	60	60	II	12	20	15	4	6	1	6	15	-7	72	II	65	II	60	II	60	II	
	2.71		RIOLITO	1	15	1	1.00	0.10	5.0	0.001	2.5	0.1	-16	-16	V	7	3	10	2	6	1	5	0	-25	9	V	45	III	40	IV	40	IV	
	0.59		RIOLITO	1	15	1	2.00	0.10	5.0	0.001	2.5	0.0	-22	-22	V	1	3	5	0	4	1	0	0	-25	-11	V	5	V	0	V	4	V	
	1		RIOLITO	1	15	1	4.00	0.10	5.0	0.000	2.5	0.0	-28	-28	V	2	3	5	0	4	1	3	0	25	-8	V	10	V	5	V	4	V	
	2.09	TOPO	RIOLITO	1	15	1	0.75	0.10	5.0	0.002	2.5	0.1	-13	-13	V	2	3	5	0	4	1	6	0	-25	-4	V	10	V	5	V	4	V	
	2.17		RIOLITO	1	15	1	4.00	0.10	5.0	0.000	2.5	0.0	-28	-28	V	1	3	5	0	4	1	0	0	-25	-11	V	5	V	0	V	4	V	
	1.54		RIOLITO	1	15	1	3.00	0.10	5.0	0.000	2.5	0.0	-25	-25	V	2	3	5	0	4	1	1	0	0	-25	-11	V	5	V	0	V	4	V
	1.1		RIOLITO	1	15	1	4.00	0.10	5.0	0.000	2.5	0.0	-28	-28	V	1	3	5	0	4	1	0	0	-25	-11	V	5	V	0	V	4	V	
	3.4		RIOLITO	1	15	1	3.00	0.10	5.0	0.000	2.5	0.0	-25	-25	V	1	3	5	0	4	1	1	0	-25	-10	V	10	V	5	V	4	V	
	2.1	TOPO	BRECHA	50	6	1	3.00	0.10	5.0	0.056	2.5	2.8	18	18	V	1	8	5	6	4	3	1	0	-25	3	V	10	V	5	V	4	V	
	5.9	BASE	BASALTO	90	6	2	1.00	0.10	2.5	1.333	2.5	33.3	47	47	III	12	20	15	4	6	1	5	10	-25	38	IV	65	II	60	II	60	II	
	1.1	TOPO	BRECHA	95	6	3	1.00	1.00	2.5	19.000	2.5	47.5	70	70	II	12	20	15	4	6	3	5	15	-25	55	III	65	II	60	II	60	II	
	3.5	CENTRO	BVA	98	6	2	1.00	1.00	2.5	13.067	2.5	32.7	67	67	II	12	20	15	4	6	1	5	15	-25	53	III	65	II	60	II	60	II	
	11.3	BASE	BASALTO	100	6	2	1.00	0.66	2.5	8.800	2.5	33.3	64	64	II	12	20	15	4	6	1	5	10	-25	48	III	65	II	60	II	60	II	
D	1	TOPO	BRECHA	90	9	3	2.00	0.66	5.0	1.980	2.5	15.0	50	50	III	7	20	10	2	6	3	3	10	-25	36	IV	30	IV	25	IV	25	IV	
	1.2	CENTRO	BVA	100	9	4	0.75	0.66	1.0	39.111	2.5	59.3	77	77	II	12	20	20	6	6	1	6	10	-25	56	III	90	I	85	I	85	I	
	5	BASE	BASALTO	95	9	4	0.75	0.66	1.0	37.156	2.5	56.3	77	77	II	12	20	20	6	6	1	6	10	-25	56	III	90	I	85	I	85	I	
F	1.75	TOPO	BRECHA	100	12	3	1.00	0.66	2.5	6.600	2.5	25.0	61	61	II	12	20	15	4	6	3	5	10	-25	50	III	65	II	60	II	60	II	
	0.1732	CENTRO	BASALTO	40	4	1	3.00	0.10	0.5	0.667	2.5	3.3	40	40	IV	2	8	2	4	1	1	0	0	-25	1	V	10	V	5	V	4	V	
	4.5032	BASE	BASALTO	40	4	1	0.75	0.20	0.5	5.333	2.5	13.3	59	59	III	7	8	10	2	6	1	6	0	-25	15	V	45	III	40	IV	40	IV	
J	4.9362	TOPO	BRECHA	70	3	1	2.00	1.00	1.0	11.667	2.5	11.7	66	66	II	4	13	8	1	5	3	3	15	-25	27	IV	30	IV	25	IV	25	IV	
	1.6654	CENTRO	BASALTO	65	3	2	0.75	1.00	1.0	57.778	2.5	57.8	81	81	I	12	13	15	4	6	1	6	15	-25	47	III	65	II	60	II	60	II	
	2.598	CENTRO	BASALTO	80	3	2	0.75	0.66	1.0	46.933	2.5	71.1	79	79	II	12	17	15	4	6	1	6	10	-25	46	III	65	II	60	II	60	II	
	10.392	CENTRO	BASALTO	90	3	2	0.75	1.00	1.0	80.000	2.5	80.0	83	83	I	12	20	15	4	6	1	6	15	-25	54	III	65	II	60	II	60	II	
	2.598	CENTRO	BASALTO	90	3	2	0.75	0.66	1.0	52.800	2.5	80.0	80	80	II	12	20	15	4	6	1	6	10	-25	49	III	65	II	60	II	60	II	
	3.897	BASE	BASALTO	95	3	2	0.75	1.00	1.0	84.444	2.5	84.4	84	84	I	12	20	15	4	6	1	6	15	-25	54	III	65	II	60	II	60	II	
K	3.5073	TOPO	BRECHA	95	4	3	1.00	1.00	5.0	14.250	2.5	71.3	68	68	II	12	20	15	4	6	3	5	15	-25	55	III	65	II	60	II	60	II	
	0.6495	CENTRO	BVA	80	4	2	0.75	0.66	2.5	14.080	2.5	53.3	68	68	II	12	17	15	4	6	1	6	10	-25	46	III	65	II	60	II	60	II	
	0.2598	CENTRO/BASE	BASALTO	75	4	2	1.00	0.66	2.5	9.900	2.5	37.5	65	65	II	7	17	10	2	6	1	5	10	-25	33	IV	45	III	40	IV	40	IV	
	1.0392	TOPO	BRECHA	75	4	3	0.75	0.66	1.0	49.500	2.5	75.0	79	79	II	12	17	15	4	6	3	6	10	-25	48	III	65	II	60	II	60	II	
	1.0392	CENTRO	BASALTO	70	4	2	0.75	1.00	1.0	46.667	2.5	46.7	79	79	II	12	17	15	4	6	1	6	15	-25	51	III	65	II	60	II	60	II	
	9.5693	BASE	BASALTO	80	4	1	0.75	1.00	0.5	53.333	2.5	26.7	80	80	II	4	17	5	0	4	1	6	15	-25	27	IV	10	V	5	V	4	V	
	1.2	TOPO	BVA	97	9,0	4,0	0.75	0.10	1,0	5,748	2,5	57,5	60	60	III	12	20	20	6	6	3	6	0	-7	66	II	90	I	85	I	85	I	
	2.1	TOPO	BASALTO	40	9,0	0,5	0.75	0.50	0,5	2,963	5,0	3,0	54	54	III	4	8	5	0	4	1	6	7	7	28	IV	10	V	5	V	4	V	
	1.6	CENTRO	BVA	100	9,0	2,0	0.75	0.50	1,0	14,815	5,0	29,6	68	68	III	12	20	15	4	6	1	6	7	7	64	II	65	II	60	II	60	II	
M	0.9	CENTRO	BASALTO	98	9	4	0.75	0.66	0.5	76.658	5,0	58,1	83	83	I	12	20	20	6	6	1	6	10	-7	74	II	90	I	85	I	85	I	
	2.0	CENTRO	BVA	95	9	4	0.75	0.66	1,0	37,156	5,0	56,3	77	77	II	12	20	20	6	6	1	6	10	-7	74	II	90	I	85	I	85	I	
	1.5	BASE	BASALTO	90	9	1	0.75	0.66	0,5	17,600	5,0	13,3	70	70	II	4	20	15	4	6	1	6	10	-7	59	III	65	II	60	II	60	II	

1.7	CENTRO	BVA	100	6	2	0,75	1,00	1,0	44,444	2,5	44,4	78		78	II	12	20	15	4	6	1	6	15	25	54	III	65	II	60	II
7.1	BASE	BVA	95	6	2	0,75	1,00	1,0	42,222	2,5	42,2	78		78	II	12	20	15	4	6	1	6	15	25	54	III	65	II	60	II
1.6	TOPO	BRECHA	100	6	3	0,75	0,66	1,0	44,000	2,5	66,7	78		78	II	12	20	15	4	6	3	6	10	25	51	III	65	II	60	II
2.0	CENTRO	BVA	99	6	4	0,75	0,66	1,0	58,080	2,5	88,0	81		81	I	12	20	20	6	6	1	6	10	25	56	III	90	I	85	I
1.4	CENTRO	BASALTO	100	6	4	0,75	1,00	1,0	88,889	2,5	88,9	84		84	I	12	20	20	6	6	1	6	15	25	61	II	90	I	85	I